

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

Н.И. Андриянов, нач. отд. ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ

С.В. Генералова, ст. науч. сотр. ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ

С.П. Юркевичус, вед. науч. сотр. ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, канд. техн. наук

В статье сравниваются идеи, описанные в произведениях научной фантастики, с работами советских ученых, создававших ядерную и основы термоядерной энергетики. А также рассмотрено, что происходит в этих областях сейчас и где у России существует научно-технический задел выше мирового уровня.

Ключевые слова: Обнинская АЭС, ядерная энергетическая установка, жидкометаллический теплоноситель, бридер, ИТЭР, мазер, инерциальный термоядерный синтез.

Введение. Какие открытия в энергетике прогнозировали фантасты, и какой путь ее развития предсказывали, а также, какие прорывные, по их мнению, результаты нас ждут в будущем, и насколько это согласуется с работами, ведущимися в области энергетики сейчас? В статье приводится ссылка на источник предсказания в произведениях фантастов о прогнозируемом открытии в области энергетики, а затем идет описание того, как это было реализовано в СССР.

Причинами выбора СССР явились следующие: во-первых, у него большинство приоритетов в энергетике, во-вторых, СССР шел своим путем и от генерации идеи до промышленного изготовления, и все, вплоть до мельчайшей детали, способен был реализовать своими силами. И, в-третьих, самое главное, Россия решила сделать энергетику одним из приоритетов своего развития и для этого сконцентрировать усилия на развитие существующих научно-технических заделов мирового и выше мирового уровня.

Ядерные предсказания. В романе «Освобожденный мир» (1914 г.) Герберт Уэллс предсказывает расщепление атома и создание атомной бомбы. По сюжету романа ученый Холстен открывает в 1933 г. возможность радиоактивного распада тяжелых элементов, что сначала дает человечеству дешевую атомную энергию, а в последствие приводит к крушению всего существующего миропорядка [1]. В романе «Пылающий остров» (1936 г.) Александр Казанцев пишет, что 30 июня 1908 года в Сибири произошло не падение метеорита, а крушение инопланетного корабля с атомным двигателем.

И вот 30 июня 1954 г. на весь мир прозвучало сообщение ТАСС, потрясшее воображение людей: «В Советском Союзе усилиями ученых и инженеров успешно завершены работы по проектированию и строительству первой промышленной электростанции на атомной энергии полезной мощностью 5 МВт. Атомная станция была пущена в эксплуатацию 27 июня и дала электрический ток для промышленности и сельского хозяйства прилежащих районов».

На первой Женевской конференции по мирному использованию атомной энергии осенью 1955 г. доклад советской делегации был встречен бурей аплодисментов – так началась эра эксплуатации мирного атома.

Обнинский реактор. Обнинская АЭС – первая в мире атомная электростанция, построенная в поселке Обнинское Калужской области, на базе «Лаборатории В» (ныне – Государственный научный центр РФ «Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского»), была оснащена одним уран-графитовым канальным реактором с водяным теплоносителем. Идея конструкции активной зоны станции была предложена И.В. Курчатовым совместно с профессором С.М. Фейнбергом, главным конструктором стал академик Н.А. Доллежал. Запуск реактора осуществляли А.К. Красин и Б.Г. Дубовский под руководством И.В. Курчатова.

Поражают сроки, за которые были осуществлены проектирование, строительство и решение сложных технических задач, связанных с производством энергии:

– 12 июля 1951 г. – Постановление Совета министров СССР о начале строительства в Лаборатории «В» объекта «В-10»;

– 8 сентября 1951 г. – начало земляных работ и сооружения комплекса зданий Первой АЭС;

– 12 июня 1951 г. – выпущены технический проект и проектное задание на объект «В-10».

Разрабатывается около 10 вариантов тепловыделяющих элементов (ТВЭЛОВ);

– 30 марта 1952 г. – начало укладки бетона в основание реакторного зала Первой АЭС.

– 26 октября 1953 г. – заводу № 12 поручается приступить к изготовлению опытных ТВЭЛОВ;

– 3 марта 1954 г. – завершены монтаж реактора, контуров и оборудования АЭС;

– 30 апреля 1954 г. – на подмосковном машиностроительном заводе в г. Электросталь изготовлен первый комплект ТВЭЛОВ;

– 9 мая 1954 г. – осуществлена загрузка активной зоны топливными каналами. При внесении 61-го топливного канала достигнуто критическое состояние и в 19 ч. 40 мин, началась самоподдерживающаяся реакция деления ядер урана;

– 13–23 июня 1954 г. – последовательный выход на 10, 25, 50, 75 % мощности в водо-водяном режиме;

– 24 июня 1954 г. – переход в паровой режим на 57 % мощности;

– 26 июня 1954 г. в 17.45 – в присутствии И.В. Курчатова и А.П. Александрова открыта задвижка подачи пара на турбогенератор, и при 57 % мощности реактора генератор синхронизирован с сетью Мосэнерго;

– 25 октября 1954 г. – достигнута проектная мощность.

Первоначально планировалось только показать принципиальную практическую возможность получения промышленной энергии с помощью управляемой ядерной реакции, хотя бы на неделю-другую, а вот оказалось так, что 48 лет станция проработала без аварий и остановлена была не по причине окончания ресурса. Остановка реактора была вызвана научно-технической нецелесообразностью его дальнейшей эксплуатации.

Реактор Обнинской АЭС, помимо выработки энергии, служил базой для экспериментальных исследований. Практически с первых дней эксплуатации Обнинской АЭС на ней начали проводить экспериментальные работы в области режимов кипения и перегрева пара в реакторе. Анализ этих работ сыграл большую роль в проектировании таких АЭС, как Ленинградская, Белоярская, Билибинская.

Работы по изучению магнитных и атомно-кристаллических структур различных твердых тел велись методом нейтронной дифракции. Полученные результаты были общепризнанными и получили статус научного открытия. На АЭС велись исследования и по выработке изотопов для нужд медицины.

В процессе эксплуатации первой АЭС был приобретен большой научно-технический опыт, ставший основой дальнейшего развития ядерной энергетики.

В настоящее время Обнинская АЭС выведена из эксплуатации. Ее реактор был заглушен 29 апреля 2002 г. На базе Обнинской АЭС создан музей атомной энергетики. Станция имеет статус «Выдающееся достижение науки и техники».

Обнинская АЭС сыграла также значительную роль в истории советского атомного флота и космических энергетических установок. Она стала важнейшей экспериментальной и учебной базой для технического совершенствования корабельных ядерных энергетических установок (ЯЭУ).

Атомный ледокол. Первое в мире надводное судно с ядерной силовой установкой атомный ледокол «Ленин» спущен на воду 5 декабря 1957 г. Проект атомохода был разработан в ЦКБ-15 (ныне «Айсберг») в 1953–1955 гг. Главным конструктор был В.И. Неганов. Атомная паропроизводительная установка водо-водяного типа проектировалась под руководством И.И. Африкантова.

Судно было заложено в 1956 г. на судостроительном заводе им. А. Марти в Ленинграде. Главный строитель – В.И. Червяков. Судовые турбины – Кировского завода. Главные турбогенераторы – Харьковский электромеханический завод. Гребные электродвигатели – ленинградский завод «Электросила».

В 1989 г. ледокол был выведен из эксплуатации и поставлен на вечную стоянку в Мурманске. Сейчас на ледоколе действует музей.

В настоящий момент Россия обладает самым мощным ледокольным флотом в мире и уникальным опытом конструирования, постройки и эксплуатации таких судов. Атомный ледокольный флот России насчитывает 6 атомных ледоколов, 1 контейнеровоз и 4 судна технологического обслуживания.

Планируется строительство атомных ледоколов двухуровневой осадки, важным преимуществом которых по сравнению с предыдущими поколениями атомных ледоколов станет возможность работы как в открытом океане, так и в устьях рек, благодаря двухосадочной конструкции судна. Разработчиком реакторной установки для атомного ледокола нового поколения выступает «ОКБМ Африкантов».

Атомные подводные лодки проектов 705, 705К («Лира»). В 1957 г. Советский ВМФ сформулировал требования к подводной лодке-«перехватчику»: способность развивать скорость до 40 узлов при водоизмещении 1500 тонн.

Строительство опытной подводной лодки проекта 705 (К-64) с атомной энергетической установкой было начато в эллинге Ленинградского адмиралтейского объединения 2 июня 1968 г., а 22 апреля 1969 г. корабль был спущен на воду. Скорость надводного хода – 14 узлов, подводного – 41 (т. е. «Лиры» могли преследовать любую субмарину и оторваться от любого преследования. На разгон до полного хода им требовалось всего около 1 минуты. Скорость лодки позволяла ей отрываться даже от многих противолодочных торпед, на циркуляцию с разворотом на 180° ей требовалось всего 42 секунды) [2].

Лодки оснащались атомной установкой типа БМ-40А (или ОК-550) с одним реактором с жидко-металлическим теплоносителем, тепловой мощностью 155 МВт. В качестве теплоносителя применялся сплав свинца и висмута (температура кипения – 1679 °С). Применение жидкого металла в качестве теплоносителя позволяло держать низкое давление в первом контуре, что исключало его переопрессовку, тепловой взрыв ядерного реактора и выброс активных веществ наружу.

Искусственные спутники земли с ядерными энергетическими установками. Также ядерные энергетические установки (ЯЭУ) побывали и в космосе. Первая из них БЭС-5 была установлена на искусственном спутнике земли «Космос-367», запущенном 3 октября 1970 г. Она проработала всего 110 мин, после чего реактор экстренно увели на орбиту «захоронения» по причине «заброса» температуры первого контура выше предельно допустимой, вызванной расплавлением активной зоны реактора. От серьезных последствий спасла надежная работа двигательной установки самого космического аппарата.

Последний запуск отечественного КА с бортовой ЯЭУ состоялся 14 марта 1988 г. На спутнике «Космос-1932» была установлена доработанная установка с 6-месячным сроком функционирования и электрической мощностью в конце ресурса 2400 Вт. И хотя полет прошел нормально, от эксплуатации аппаратов с ЯЭУ было решено отказаться.

Последний «космический экземпляр» с ЯЭУ БЭС-5, так и не слетавший в космос, в 1993 г. был доставлен с космодрома Байконур на предприятие «Красная Звезда», где его и утилизировали.

За все годы запусков в нашей стране КА с ЯЭУ БЭС-5 на орбиту было отправлено 32 установки. Одна из них не долетела до цели, две возвратились назад, а остальные до сего дня продолжают пребывать на высоте 700–800 км от Земли.

В планах Росатома – создание транспортно-энергетического модуля на основе ядерной энергодвигательной установки мегаваттного класса. Оснащенный ею космический корабль

будет обладать увеличенным более чем в 30 раз уровнем энергообеспечения и повышенной более чем в 10 раз экономичностью по расходу топлива. Заложенные технические решения позволят создать космические аппараты, обеспечивающие выполнение всего спектра космических задач XXI века (доставка грузов на геостационарную орбиту; очистка околоземных орбит от космического мусора; защита Земли от астероидно-кометной опасности; создание систем энергоснабжения Земли из космоса; программа по освоению Луны и планет Солнечной системы).

Следующий этап развития ЯЭУ – *это бридеры, или реакторы на быстрых нейтронах («быстрые» реакторы)*. Первым в мире энергетическим реактором на быстрых нейтронах был реактор БН-350, запущенный в г. Шевченко (ныне Актау, Казахстан) в 1973 г. Он успешно проработал до распада СССР и был остановлен в 1998 г.

В 1980 г. на Белоярской атомной электростанции начал работать мощный энергоблок с ядерным реактором на быстрых нейтронах БН-600, проект которого был разработан ОАО «ОКБМ Африкантов» как главным конструктором и Ленинградским проектным институтом (ныне – СПбАЭП) под научным руководством ученых Физико-энергетического института. Этот реактор мощностью 600 МВт способен полностью обеспечить электроэнергией город с населением в 500 тыс. человек и является единственным в мире действующим энергетическим ядерным реактором на быстрых нейтронах.

Топливом в атомной энергетике служит уран. Цепную реакцию деления обеспечивает «горючий» изотоп уран-235, доля которого в природном уране составляет всего 0,7 %. Обогащение же топлива современных энергетических реакторов на тепловых нейтронах по урану-235 должно составлять от 2,5 до 4–5 %. Производство обогащенного урана – это довольно дорогой и сложный процесс, требующий специальной инфраструктуры промышленности.

Основную же часть природного урана составляет уран-238. Его ядра не делятся, а захватывают нейтроны, в результате образуется новое вещество – плутоний, который так же, как уран-235, может быть использован в качестве «горючего» в ядерных реакторах. Причем, в реакторах на быстрых нейтронах количество образующегося плутония существенно больше, чем в тепловых реакторах, и может даже превышать количество первоначально загруженного делящегося материала в реактор.

В «тепловых» реакторах нейтроны, выделяющиеся при ядерной реакции деления, специально замедляются водой до достижения теплового равновесия с окружающей средой. Быстрый же реактор – это реактор без замедлителя нейтронов. По этой причине в качестве теплоносителя в них используется не вода, хорошо замедляющая нейтроны, а расплавленный натрий или свинец-висмутовый теплоноситель.

Это объясняется повышенным количеством нейтронов, рождающихся в таком реакторе, и рядом других нейтронно-физических особенностей. В результате быстрый реактор в процессе работы нарабатывает плутоний в количестве, достаточном для обеспечения себя новым топливом и изготовления определенного количества топлива для других реакторов. При реализации этого процесса путем переработки отработавшего топлива и изготовления нового смешанного уран-плутониевого топлива количество энергии, которое можно получить от природного урана, увеличивается примерно в 70 раз. Это весьма актуально, так как, по прогнозам, запасов урана на планете хватит лишь на сто лет. Быстрые реакторы, таким образом, способны увеличить этот срок до 7000 лет. Стратегия развития атомной энергетики с повторным использованием отработанного топлива называется концепцией замкнутого топливного цикла.

У современной атомной энергетики есть и еще один недостаток – растущее количество отработавшего ядерного топлива. Отработавшее ядерное топливо – главная составляющая радиоактивных отходов, которые требуют особого внимания. В настоящее время в странах, нацеленных на масштабное развитие атомной энергетики (таких как Россия, Франция, Индия, Китай и др.), предполагается переработка отработавшего ядерного топлива с помо-

щью реализации замкнутого топливного цикла. Его дополнительным преимуществом является то, что после переработки отработавшего ядерного топлива остается относительно небольшое количество «бесполезных» элементов радиоактивных отходов, которые подлежат специальной обработке и захоронению.

Однако технология быстрых реакторов в целом все же сложнее, чем тепловых реакторов, из-за применения натриевого или свинец-висмутного теплоносителя. Преимущество быстрые реакторы имеют только при реализации замкнутого топливного цикла, и поэтому их целесообразно использовать совместно с тепловыми реакторами, т. к. благодаря избыточной наработке плутония быстрые реакторы будут подпитывать топливом тепловые.

Современное состояние. В России делаются важные шаги по дальнейшему развитию реакторов на быстрых нейтронах. Возобновлено сооружение более мощного (880 МВт) усовершенствованного реактора БН-800 на Белоярской АЭС, начатое еще в 1980-е гг. Пуск реактора БН-800 запланирован на осень 2013 г. (!), начало выработки электроэнергии на новом блоке БАЭС – на первый квартал 2014 г.

Серийное сооружение энергетических реакторов на быстрых нейтронах в нашей стране начнется на основе нового проекта ОАО «ОКБМ Африкантов». Этот проект реактора мощностью 1200 МВт планируется разработать к 2016 г.

Главными целями являются существенное улучшение экономических показателей будущего быстрого реактора, дополнительное повышение его безопасности и надежности. Научно-техническая основа разрабатываемых решений это уникальный опыт и новые знания, которые получены за 30 лет эксплуатации реактора БН-600. Многие технические решения прошли «обкатку» на этом реакторе и тем самым подтвердили свою эффективность. Первый реактор БН-1200, так же как и реакторы БН-600, БН-800, планируется построить на Белоярской АЭС.

Научно-технический задел. Работы по реакторам на быстрых нейтронах начались в 1950-е гг. во всех ведущих странах мира, развивающих атомную энергетику, – в США, Франции, Великобритании, а затем в Германии, Японии и Индии. Позднее к работам в этой области приступили Китай и Южная Корея. Однако практически достигнутые результаты в этих странах менее значительны. На сегодняшний день БН-600 – единственный в мире действующий промышленный энергетический реактор на быстрых нейтронах. Благодаря этому, а также проводимым работам по сооружению БН-800 и проектированию БН-1200, Россия занимает лидирующее место в мире в важном и перспективном направлении развития атомной энергетики.

Россия активно участвует в международном сотрудничестве по быстрым реакторам. Например, она являлась разработчиком проекта китайского экспериментального реактора на быстрых нейтронах CEFR и главным подрядчиком по изготовлению основного оборудования реактора, участвовала в осуществлении физического и энергетического пусков реактора в 2011 г. и оказывает помощь в освоении его мощности. В настоящее время идет подготовка межправительственного соглашения о сооружении в КНР демонстрационного быстрого реактора с натриевым теплоносителем (CDFR) на базе проекта БН-800 с участием ОКБМ и других предприятий Госкорпорации «Росатом».

Все вышесказанное свидетельствует о том, что наша страна сохраняет мировое лидерство в области освоения технологии быстрых натриевых реакторов.

Накопленный научно-технический потенциал в области создания реакторов на быстрых нейтронах позволяет Российской Федерации стать крупнейшим мировым игроком в этой области атомной энергетики, полагает один из создателей таких установок, лауреат премии «Глобальная энергия» 2003 г., американский физик Леонард Кох. «Я считаю, что Россия должна возглавить это направление в мировой атомной энергетике», – заявил Кох в Москве на саммите лауреатов «Глобальной энергии» (РИА Новости, от 25 октября 2012 г.).

Предсказания энергетики термоядерного синтеза. Около столетия назад Жюль Верн написал свои пророческие слова: «Я верю, что когда-то человечество возьмет на службу воду в качестве топлива, что водород и кислород, из которых она состоит, вместе или по отдельности, послужат неиссякаемым источником тепла и света.

Управляемый термоядерный синтез открывает возможность использования энергии, выделяющейся при слиянии легких атомных ядер и образовании более тяжелых. В качестве топлива здесь в первую очередь будут служить тяжелые изотопы водорода — дейтерий и тритий (D+D и D+T). Дейтерий составляет одну семитысячную добавку к природному водороду, а потому является практически безграничным источником энергии, его хватит для нужд человечества на миллионы лет даже при очень высоком росте потребления энергии. Промышленный тритий получают облучением лития-6 нейтронами в ядерных реакторах. Таким образом, в каждом полулитре любой окружающей нас воды заключена потенциальная энергия термоядерного синтеза, эквивалентная энергии сгорания бочки бензина!

Но чтобы осуществить эти реакции, надо сблизить два ядра на расстояние порядка их собственного размера 10-13 см. Чтобы это сближение произошло, положительно заряженные ядра должны преодолеть взаимное электростатическое отталкивание, т. е. обладать большой энергией. Осуществить это можно, нагрев вещество до очень высокой температуры, когда кинетическая энергия ядер оказывается достаточно большой для преодоления электростатического отталкивания при их столкновениях. А это температура порядка 10 млн. °С. В природе такие условия существуют в недрах звезд. Изучив природу этого источника энергии, люди сравнительно быстро осуществили этот процесс на Земле, создав мощнейшее оружие — термоядерную бомбу.

Но в отличие от ядерной — термоядерной энергетики пока нет.

Более 50 лет физики всего мира решают эту проблему. Но для того, чтобы осуществить управляемую термоядерную реакцию необходимо достичь этой температуры, получить выход энергии, превышающий затраченную, и иметь возможность остановить реакцию в любой момент.

После получения реакции, наиболее энергоемкие продукты реакции синтеза — быстрые нейтроны — могут быть использованы в традиционном энергетическом пароводяном цикле («чистый» синтез).

Работы по термоядерному синтезу ведутся в основном по таким направлениям: магнитное удержание плазмы — это токамаки (тороидальная камера с магнитными катушками) и стеллараторы, и инерциальный термоядерный синтез (термоядерное топливо удерживается силами инерции).

Магнитное удержание плазмы. Работы по управляемому термоядерному синтезу были начаты 5 мая 1951 г., с Постановления Совета Министров СССР о принятии первой в мире правительственной программы «О проведении научно-исследовательских и экспериментальных работ по выяснению возможности осуществления магнитного термоядерного реактора». В СССР была предложена идея магнитного удержания и термоизоляции горячей плазмы, которая легла в основу развития так называемых стационарных систем, в которых реакция синтеза дейтерия и трития должна протекать в форме медленного горения.

Параллельно велись работы в Великобритании и США, причем каждая из 3 стран открыла определенное направление магнитного удержания плазмы. Эксперименты с тороидальным газовым разрядом в Великобритании создали направление «тороидальные пинчи с обращенным тороидальным магнитным полем». В настоящее время соответствующие крупные установки имеются: одна — в Падуе (Италия), другая — в Бостоне (США). Предложение А.Д. Сахарова и И.Е. Тамма о «Магнитном термоядерном реакторе» привело к системам «токамак», занявшим лидерство в мировой программе исследований. Изобретение Л. Спитцера (США) породило фундаментальное научное направление стационарных «стел-

лараторных», или «винтовых систем» магнитного удержания плазмы. В настоящее время самым большим их представителем является крупнейшая винтовая система LHD в Японии, а также развиваются усовершенствованные, типа стелларатора WVII-X, который будет построен в Грайфсвальде (Германия) в 2014–2015 гг.

Помимо замкнутых систем, в США и СССР независимо родилось направление открытых магнитных систем. Однако сейчас они остались только в научном городке Цукубы (Япония) и Академгородке Новосибирска.

В 1956–1958 гг. произошло объединение усилий ученых всех стран, материалы исследований рассекретили.

К 1975 г. лидирующими установками магнитного удержания плазмы становятся системы с сильным магнитным полем – токамаки. В настоящее время работы по этой программе ведутся во всем мире.

В 1979 г. по инициативе Е.П. Велихова Международный совет по термоядерному синтезу рекомендовал генеральному директору Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) организовать международную рабочую группу по разработке проекта ИТЭР. В разработке проекта приняли участие ученые и инженеры Европейского Сообщества, СССР, США и Японии.

28 июня 2005 было официально объявлено, что реактор будет построен в Кадараше на юге Франции.

Было согласовано, что 50% расходов возьмет на себя европейский Союз, по 10% – Китай, Россия, США, Южная Корея и Япония, а Индия вложит 0,5 %. Строительство реактора началось. Планировалось начать демонстрационные и испытательные режимы термоядерной станции ИТЭР в 2016 г., но, видимо, пока сроки сдвинулись к 2020 г., а промышленную энергию предполагается получить к 2050 г. Расчетная термоядерная мощность ИТЭР должна составить 500 Мвт. Строительство и работа экспериментального реактора – существенный шаг к ответу на вопрос – может ли термоядерная энергия использоваться человечеством для выработки электричества во второй половине этого столетия.

Топливное потребление термоядерной электростанции будет чрезвычайно низко. Для производства 1 ГВт. энергии требуется приблизительно 100 кг дейтерия и 3 тонны природного лития, чтобы использовать в течение целого года, производя приблизительно 7 миллиардов кВт/час, без выбросов углекислого газа и других загрязнений. Получение такого же количества электроэнергии на тепловой электростанции требует приблизительно 1,5 миллиона тонн топлива и производит приблизительно 4-5 миллионов тонн CO₂.

Оценивая ситуацию с исследованиями альтернативных систем магнитного удержания, можно отметить, что по отношению к токамакам они отстают на 10–20 лет, а значит, исключена возможность создания в ближайшем будущем на их базе энергетического термоядерного реактора. Вместе с тем продолжение работ по альтернативным системам важно для подготовки последующих этапов развития термоядерной энергетики.

Инерциальный термоядерный синтез, при котором термоядерное топливо удерживается собственными силами инерции. Идея заключается в быстром и равномерном нагреве термоядерного топлива, так чтобы образовавшаяся плазма до разлета успела прореагировать.

Первый способ – это осуществление термоядерной реакции путем сжатия «замороженной» мишени из дейтерия и трития лазерным импульсом.

Существуют две схемы поджига мишени – прямой, когда лучи лазера падают непосредственно на ее поверхность. И при помощи отражающей камеры из тугоплавкого материала, например, вольфрама, в которую лучи проникают через отверстия и многократно отражаются от стенок.

Он основан на способности лазеров концентрировать энергию в малых объемах вещества за короткие промежутки времени и на использовании инерциального удержания плазмы. Эта способность лазеров обеспечивает сжатие и нагрев термоядерного горючего до высокой

плотности и температуры, при которых уже возможны термоядерные реакции. Время существования плазмы составляет 10–100 пс, поэтому лазерный термоядерный синтез может осуществляться только в импульсном режиме. Предложение использовать лазеры для таких целей было высказано впервые в 1961 г. Н.Г. Басовым и О.Н. Крохиным. В 1968 г. зафиксировано возникновение нейтронов от плазмы, полученной при воздействии луча лазера на твердую мишень из дейтерида лития (Н.Г. Басов).

15 марта 2012 г. в Ливерморской лаборатории в Калифорнии произвели лазерный импульс с рекордной энергией.

В ходе тестов гигантской установки инерциального ядерного синтеза достигнуто наибольшее значение энергии 2,03 МДж, переданной в ультракоротком импульсе лазера, при котором 192 синхронизированных световых луча были направлены в сферическую камеру, в центре которой на длинном держателе должна была быть закреплена крохотная криогенная капсула с замороженной смесью дейтерия, трития и водорода. По идее, свет должен сжать ее до плотности порядка килограмма на кубический сантиметр, чтобы запустить реакцию синтеза. Однако мишень в данном тесте отсутствовала – скопление ультрафиолетовых лучей било в пустоту.

Лазерный проект, аналогичный американскому создается во Франции и существенно более скромные существуют – в Японии и у нас (лазерная комплексная установка «Искра-6» ВНИИЭФ, г. Саров).

Также можно запустить термоядерную реакцию с помощью – Z-пинчи (большие токи) и ускорители тяжелых ионов. На установке «Ангара 5-1» в Троицком институте инновационных и термоядерных исследований (ТРИНИТИ) успешно продемонстрирована возможность использования Z-пинча, питающегося от сверхмощного (≈ 6 ТВт) электрического генератора для поджига мишени. Это направление получило дальнейшее развитие на крупнейшем в мире генераторе Z (≈ 50 ТВт) в США, где получены рекордные величины энергии мягкого рентгеновского излучения (1.8 МДж), необходимого для сжатия мишени. В России разрабатываются проекты таких установок на основе индуктивных накопителей («Байкал», ТРИНИТИ) и взрывомагнитных генераторов (ЭМИР, ВНИИ экспериментальной физики), а также совместно с лабораторией Сандиа (США) анализируется концепция энергетических реакторов на базе Z-пинчей.

Более перспективными для поджига мишеней являются ионные пучки тяжелых элементов, например, свинец. Однако здесь тоже возникают трудности с необходимой фокусировкой луча, а также потерей энергии при прохождении через остаточный газ в камере сгорания. Эта сравнительно новая технология носит название «Синтез при помощи тяжелых ионов»

В 2005 г. в американской национальной лаборатории Беркли удалось получить 4 мс. импульс, и хотя энергии для запуска пока не хватает, но первый принципиальный вопрос по времени импульса уже решен.

Существует также проект NYLIFE-11, где для поглощения энергии взрыва употребляется водянистая завеса из расплавленной соли Li_2BeF_4 , окружающая область, куда вбрасываются мишени, которая служит также для смывания остатков мишеней и демпфирования давления взрывов, сила которых эквивалентна 20–200 кг в тротиловом эквиваленте. Расход водянистого теплоносителя составляет $50 \text{ м}^3/\text{с}$.

О безопасности термоядерного реактора. В реакторе, где происходит горение, количество топлива в каждый момент очень мало – (1 г в объеме 1000 м^3) и если прекратить его подачу, то реакция затухнет через несколько секунд, т. е. любой сбой останавливает реакцию и реактор охлаждается.

Топливо (дейтерий и литий), а также выделяющийся в результате реакции гелий, не радиоактивны.

Промежуточный продукт горения тритий является радиоактивным и распадается относительно быстро, производя электроны с очень низкой энергией (бета-радиация). В воздухе

эти электроны могут путешествовать несколько миллиметров и не могут проникать даже через бумагу. Однако, тритий вреден, если попадет внутрь организма. Поэтому предусмотрены специальные средства для безопасного хранения и обработки трития. Поскольку тритий находится только в камере сгорания реактора, то нет никаких проблем относительно транспортировки радиоактивных материалов, кроме как при запуске и остановке реактора. Нейтроны, произведенные в результате термоядерной реакции, создают радиоактивность в материалах, из которых изготовлен реактор.

Относительно низкая удельная радиоактивность отработавших срок элементов конструкций позволяют хранить отходы на территории станции, причем подавляющее большинство из них может размещаться на открытой площадке. Возможна ручная или дистанционная переработка до 60 % материалов отслуживших срок конструкций, а еще 20–25 % после 100 лет выдержки без специального контроля могут быть переплавленными для дальнейшего использования, а значит, материалы и отходы термоядерной электростанции не будут бременем для будущих поколений.

В инженерном проекте ИТЭР приведен детальный анализ аварийных ситуаций с оценкой возможных выбросов радиоактивности. Максимально возможный аварийный выброс не превосходит примерно 50 г по тритию, 25 г по продуктам коррозии и 40–100 г по пыли, образующейся в плазменной камере. При аварии суммарные дозы облучения на границе площадки станции оказываются в 2–10 раз ниже допустимой для населения дозы, так что его эвакуации не потребуется. Пассивная безопасность реактора на основе токамака заложена в физике: температура плазмы падает из-за радиационного охлаждения в случае попадания в нее материалов первой стенки, если эта стенка плавится или испаряется. Низкая энергонапряженность и большая тепловая инерция обеспечивают пассивное охлаждение конструкций в случае аварийных ситуаций, связанных с потерей теплоносителя или ограничения его циркуляции. Согласно исследованиям, в том числе и проведенным в рамках проекта ИТЭР, максимальные температуры конструкционного материала не превысят 600–700 °С, а общая структурная устойчивость конструкции и барьеры безопасности сохранятся.

Заключение. Таким образом, энергетика ядерных реакций практически неисчерпаемый и экологически чистый источник энергии.

Доступность топлива для термоядерной электростанции – важный фактор для большинства стран мира. Равномерность топлива смягчит многие мировые конфликты, возникающие из-за крайне неоднородного распределения на земном шаре природных запасов нефти, газа и угля.

Необходимо решать и проблему выбросов CO₂. В мире до сих пор нет технологий очистки от CO₂ – основного продукта горения. А, например, такая страна, как Китай, при выходе на европейский уровень энергопотребления на душу населения должна сжигать ежегодно 2–3 т угля на одного человека, что при численности населения 1,5 млрд чел. увеличит количество сжигаемого на земном шаре угля на 100 %. Проблема экологически приемлемой энергетики Китая и других развивающихся стран, по сути, является общемировой. В ее решении атомные и термоядерные электростанции могут сыграть важную роль, они могут занять значительную долю (свыше 25 %) в мировом производстве электроэнергии.

На нынешнем этапе из-за сложности технологии и низкой энергонапряженности термоядерная электростанция будет проигрывать энергетике деления, энергетике угля, газа и нефти. Однако истощение невозобновляемых ресурсов, в том числе и урана для АЭС на тепловых нейтронах, рано или поздно вынудит обратиться к термоядерным электростанциям как экологичным и безопасным.

В последнее время активно рассматриваются варианты двухцелевых термоядерных электростанций, включающих параллельно с выработкой электроэнергии выжигание долгожи-

вущих радиоактивных отходов атомной энергетики, опреснение соленых вод, производство синтетического топлива, в том числе водорода из воды.

Отечественная школа ядерной энергетики и физики горячей плазмы имеют высокий международный рейтинг как в области теории, так и эксперимента, в том числе и наш токамак положен в основу первого Международного экспериментального термоядерного реактора.

Список литературы

1. Уэллс Г. Освобожденный мир, Война миров // Амфора, 2005.
2. Апальков Ю.В. Подводные лодки Советского Союза. 1945-1991 гг. // М.: Моркнига, 2011.
3. URL: <http://worldwepon.ru/flot/705.php>.
4. Толстой А. Гиперболоид инженера Гарина // Дрофа, 2004.
5. Воронов Г.С. Штурм термоядерной крепости // М.: «Наука», 1985.
6. Шафранов В.Д., Бондаренко Б.Д., Гончаров Г.А. К истории исследований по управляемому термоядерному синтезу // УФН, 2001. Т. 171. № 8. С. 877-908.
7. Мирнов С.В. Токамаки: триумф или поражение? // Природа, 1999. № 11. С. 10.
8. Кадомцев Б.Б. От МТР до ИТЕР // УФН, 1996. Т. 166 № 5. С. 449-458.
9. Спитцер Л. Стелларатор // УФН. 1960. Т. LXXI. Вып. 2. С. 327-338.
10. Прохоров А.М., Ансимов С.И., Пашинин П.П. Лазерный термоядерный синтез // УФН, 1976. Т. 119. Вып. 3. С. 401-424.
11. Крайнов В.П. Лазерный термоядерный синтез в кластерах // Соросовский образовательный журнал, 2001. Т. 7. № 10. С. 75-80.