

АКТУАЛЬНЫЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

© 2019 г. Ю.А. Оленин, В.И. Ильгисонис

Государственная корпорация по атомной энергии "Росатом", Москва, Россия

E-mail: YuAOlenin@rosatom.ru; vilkiaie@gmail.com

Поступила в редакцию 03.12.2018 г.

Поступила после доработки 03.12.2018 г.

Принята к публикации 21.01.2019 г.

В работе обсуждаются современные проблемы и перспективы отечественной атомной энергетики¹. Делается вывод о том, что атомная отрасль может выступать мощным драйвером научно-технологического прогресса, механизмом, стимулирующим развитие широкого спектра промышленных и технологических сегментов экономики страны. По материалам доклада на Научной сессии Общего собрания членов РАН 13 ноября 2018 г.

Ключевые слова: атомная энергетика, ядерный реактор, ядерный топливный цикл, реактор на быстрых нейтронах, радиоактивные отходы, отработавшее ядерное топливо, жидкосольевой реактор, атомные станции малой мощности, водородная энергетика, термоядерный синтез.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5873894335-342>

Интрига настоящего момента для атомной отрасли России заключается в появлении новых тенденций в развитии мировой энергетики, и в первую очередь мировой электроэнергетики, заставляющих переосмыслить типовые прогнозы роста установленных мощностей АЭС, известные с середины XX в. Примечательно, что в основе этих тенденций лежат как разного рода объективные факторы, так и их определённая трактовка, которая не всегда может считаться адекватной.

Во-первых, за последние годы изменилась производная роста объёмов ежегодного производства электроэнергии, стабильно наблюдаемого на протяжении всех лет истории электроэнергетики (рис. 1). Если в начале 1990-х годов этот рост происходил с убыстрением (то есть вторая производная была положительной), то сегодня темпы роста потребления электроэнергии снижаются, на основании чего делается вывод, что не стоит прогнозировать слишком большого увеличения этих объёмов в ближайшей перспективе, тем более если мы говорим о перспективе в десятки лет, а именно такими масштабами оперирует ядерная энергетика.

Во-вторых, наблюдающееся развитие энерго-сберегающих технологий, особенно технологий

возобновляемых источников энергии, порождает ощущение, что в создании новых энергоисточников нет необходимости и можно обойтись имеющимися мощностями.

В-третьих, имея в виду конкурентные преимущества возобновляемых источников энергии, связанные с экологией и быстротой освоения этих ресурсов, часто делают вывод, что ядерная энергетика из энергетической картины мира может относительно безболезненно быть вытеснена.

Напомним, что в настоящее время в мировом производстве электроэнергии ядерная энергетика составляет около 10%, а в нашей стране – почти 19%. При этом в Европейской части России на атомные электростанции (АЭС) приходится около 40% производства электроэнергии. Немаловажно и то обстоятельство, что сегодня экспорт атомных станций – один из ключевых несырьевых экспортов нашей страны, причём экспортов высокотехнологичных. По объёмам он сопоставим с поставками за рубеж вооружений: на ближайшее десятилетие "Росатомом" уже законтрактовано строительство 36 блоков за рубежом на сумму более 130 млрд долл.

Спрашивается, какие существуют основания рассчитывать на дальнейшее развитие ядерной энергетики и предлагать её в качестве перспек-

ОЛЕНИН Юрий Александрович – доктор технических наук, заместитель генерального директора по науке и стратегии Госкорпорации "Росатом". ИЛЬГИСОНИС Виктор Игоревич – доктор физико-математических наук, директор направления научно-технических исследований и разработок Госкорпорации "Росатом".

¹ Более точен термин "ядерная энергетика", который мы будем употреблять в статье, сохранив одновременно исторически устойчивую терминологию: атомная отрасль, атомная электростанция (АЭС) и т.п.

тивной составляющей российской экономики, учитывая вышеперечисленные тенденции?

В первую очередь не следует забывать, что прогнозы по энергопотреблению в мире могут кардинально поменяться буквально за ближайшее десятилетие. Основания тому — уже начавшаяся в мире масштабная электрификация транспорта, процессы цифровизации, довольно затратные по энергопотреблению, которые идут не только в нашей стране, но и во всём мире. В частности, в Евросоюзе они являются одним из приоритетных направлений научно-технического развития. Наконец, неравномерность развития мировых регионов говорит о том, что потенциал развития электроэнергетики колоссальный: около миллиарда жителей Земли сегодня не обеспечены электроэнергией. Заметим, что произошедший за последние 20 лет более чем трехкратный рост производства и потребления электроэнергии в Азиатском регионе вывел его в число мировых лидеров. Таким образом, если ориентироваться на возможность изменения тенденций в потреблении электроэнергии, то мы придём к тому, что необходимость новой генерации электроэнергии для мировой экономики по-прежнему существенна, и ядерная энергетика может составить значительную составляющую в этой генерации.

Отдельного комментария заслуживает выгода вложений в ядерную энергетику, поскольку строительство атомной станции — дело, безусловно, очень дорогостоящее. Оно растягивается по окупаемости на десятилетия. Если говорить на языке экономистов, оперируя средневзвешенной себестоимостью электроэнергии (так называемой LCOE — Levelised Cost of Energy), которая включает все затраты от сооружения до вывода из эксплуатации, то нетрудно увидеть, что сегодня в результате массового внедрения возобновляемых источников энергии LCOE для них уже находится на уровне или даже опустилась ниже LCOE всех остальных источников генерации. Тем не менее необходимо иметь в виду определённую условность этих расчётов, в большой степени зависящих от типа электростанции и используемых агрегатов, характера природных условий, времени полной загрузки и др. Так, для ветростанций Германии LCOE колеблется от 3,9 до 13,8 евроцентов за кВт·ч [2]. Следует также помнить, что возобновляемые источники энергии обладают весьма низкой плотностью потока энергии, то есть требуют больших затрат и площадей для размещения, крайне сильно зависят от погодных условий и времени суток, мало пригодны для основного энергоснабжения крупных потребителей — городов и предприятий, что вызывает необходимость дополнительного резервирования мощности.

На этом фоне конкурентоспособность ядерной энергетики может быть обеспечена при учёте следующих её очевидных достоинств:

- стабильная генерация;
- большая мощность и высокая плотность генерации энергии;
- обеспеченность эффективным топливом (теплотворная способность в миллион раз выше, чем у органического топлива);
- долговременность и низкие эксплуатационные расходы;
- независимость от волатильности цен на органическое топливо;
- отсутствие выбросов окислов углерода.

Однако эти достоинства могут быть приняты во внимание лишь в случае, если ядерная энергетика будет удовлетворять следующим требованиям.

Во-первых, это безусловное *обеспечение безопасности* в отношении крупных аварий. Именно угроза крупных аварий и представляет основную платформу для негативного отношения к ядерной энергетике, так или иначе укоренившуюся и старательно укореняемую отдельными средствами массовой информации и пропагандистами альтернативной энергетике в головах людей. Неслучайно, что после аварии на Чернобыльской АЭС темпы роста мирового производства электроэнергии на АЭС снизились в 6 раз. Во-вторых, мы обязаны идти по пути *повышения экономической эффективности АЭС*, что требует решения целого ряда научно-технических задач, о которых будет сказано ниже. В-третьих, не надо забывать, что ядерная энергетика обладает определённой *экологической привлекательностью* уже сейчас, поскольку эта энергетика безуглеродная, а тенденция на безуглеродную энергетiku — едва ли не главная в наше время. Но, конечно, мы должны позаботиться и о том, чтобы минимизировать угрозу накопления радиоактивных отходов, которые образуются в результате деятельности атомных станций. В перспективе желательно перейти на так называемый замкнутый ядерный топливный цикл, который минимизировал бы и наши потребности в природном уране, и объёмы отходов ядерной электроэнергетики.

Удовлетворение вышеперечисленным требованиям может быть достигнуто путём *совершенствования основных на сегодня реакторов ВВЭР* — водо-водяных энергетических реакторов. Следует отметить, что за всё время работы АЭС с реакторами типа ВВЭР на них не было зарегистрировано ни одной крупной аварии. Тем не менее после катастрофы на Чернобыльской АЭС, хотя и произошедшей с реактором иного типа — РБМК, в конструкцию реакторов ВВЭР были заложены

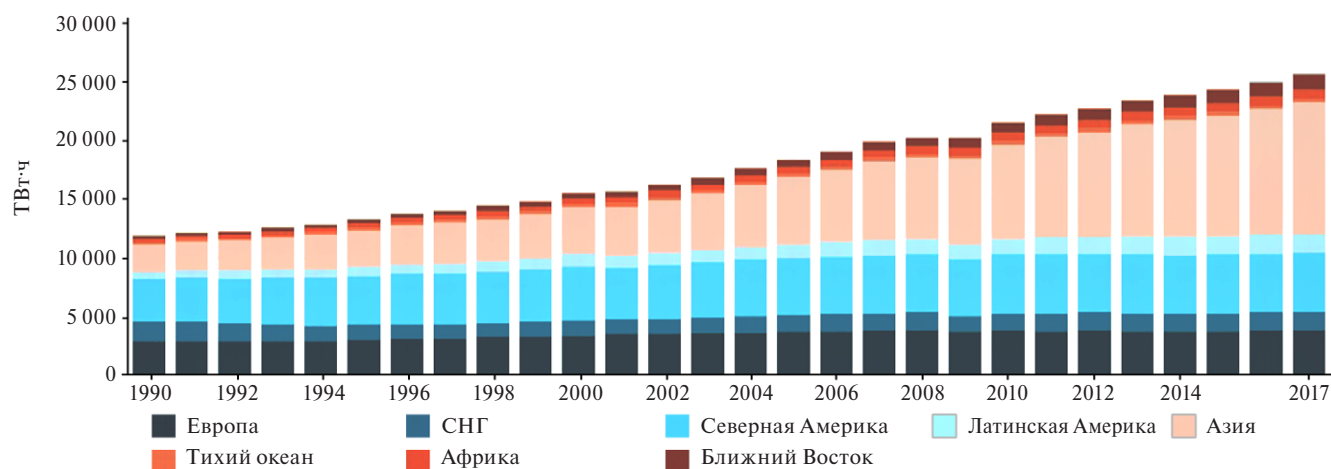


Рис. 1. Мировое производство электроэнергии по годам [1]

новые дополнительные барьеры безопасности. Сегодня мы говорим о том, что дополнительные реакторы водорода внутри контейнента³, пассивные системы отвода тепла, не требующие для своей работы электропитания и систем управления, и, наконец, ловушка расплава [3], обеспечивающая локализацию и охлаждение ядерных материалов после аварии наивысшего типа – расплавления активной зоны реактора – стали уникальной "визитной карточкой" повышенной безопасности российских ВВЭР.

Вместе с тем экстенсивное наращивание систем безопасности приводит к удорожанию энергоблока. Необходимое (наряду с обеспечением безопасности) для поддержания высокого экспортного потенциала российских реакторов и АЭС повышение их экономической эффективности планируется обеспечить техническими решениями, которые поэтапно сделают возможным отказ от борного регулирования, отказ от использования циркониевых сплавов в активной зоне, повышение КПД и коэффициента воспроизводства, снижение расхода урана. Фактически речь идёт о новом поколении реакторов ВВЭР с регулированием спектра нейтронов в активной зоне реактора в процессе работы (ВВЭР-С) [4, 5] и использованием теплоносителя со сверхкритическими параметрами (ВВЭР-СКД) [6–8]. Возможности создания таких реакторов (и некоторых других, о которых пойдёт речь ниже) в значительной степени ограничены характеристиками имеющихся конструкционных материалов; именно в области технического материаловедения необходим прогресс для обеспечения развития атомной техники.

³ Контейнмент – герметичная оболочка, выполняющая функцию обеспечения пассивной безопасности энергетического ядерного реактора, предотвращая выход радиоактивных веществ в окружающую среду при тяжёлых авариях.

В перспективе предполагается переход отечественной ядерной энергетики на новую технологическую платформу – с замкнутым топливным циклом и решением проблемы отработавшего ядерного топлива и накопления радиоактивных отходов (РАО). При этом ядерная энергетика должна как минимум стать двухкомпонентной: наряду с основными производителями электроэнергии – реакторами ВВЭР, значительную составляющую должны приобрести АЭС с реакторами на быстрых нейтронах, способные обеспечить наработку ядерного топлива с использованием природного (необогащённого) или отвалного урана, дожигание в реакторах минорных актинидов и кардинальное снижение объёмов образующихся РАО.

Создание *двухкомпонентной ядерной энергетики* выводит на передний план целый комплекс задач, требующих расчётно-теоретических и экспериментальных исследований в связи с вовлечением в топливный цикл плутония и минорных актинидов, увеличением глубины выгорания топлива и удельной тепловой мощности, обеспечением требований радиозащиты и безопасности.

Считается, что конструкция реакторной установки реакторов нового типа должна быть интегральной, что позволит локализовать даже маловероятные утечки теплоносителя в корпусе реактора и избежать самого опасного, чем может грозить ядерная энергетика, – крупной аварии, требующей эвакуации населения со всеми вытекающими последствиями.

Напомним, что сегодня Россия является единственной страной в мире, которая эксплуатирует энергетические реакторы на быстрых нейтронах и тем самым ещё владеет необходимым технологическим преимуществом, которое мы в значительной степени потеряли в других отраслях промышленности. Сохранение этого лидерства

путём разработки и освоения прогрессивных технологических решений, включая реакторные установки на быстрых нейтронах с натриевым и свинцовым теплоносителями, на пути к двухкомпонентной ядерной энергетической системе будет способствовать поддержанию экспортного потенциала отрасли и минимизации рисков развития ядерной энергетики, связанных с неопределённостью энергетического рынка и ресурсного обеспечения [9, 10].

С целью повышения экологической привлекательности ядерной энергетики анализируются возможности ускоренного *внедрения ядерного топливного цикла с мультирециклированием ядерных материалов*, включающего извлечение и повторное использование делящихся компонент ядерного топлива наряду с эффективным обращением с образующимися радиоактивными веществами перед их захоронением. Фракционирование и переработка отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) вместе со "сжиганием" наиболее опасных продуктов реакций — минорных актинидов — неотъемлемая часть такой стратегии.

Помимо разрабатываемых реакторов на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем, для трансмутации минорных актинидов можно использовать и другие реакторные установки с большими потоками нейтронов, например, так называемые жидкосольевые реакторы (ЖСР). Основные и весьма существенные преимущества ЖСР — это устранение необходи-

мости традиционной фабрикации таблеточного топлива, крайне затруднённой даже для америция и практически нереальной для кюрия, возможность без изменения конструкции использовать широкий спектр топливных загрузок, включающих плутоний и все минорные актиниды (в том числе кюрий) из накопленного ОЯТ. Вследствие высокой удельной энергонапряжённости активной зоны и циркуляции расплавленного топлива дожигание минорных актинидов в ЖСР происходит весьма эффективно [11, 12].

Сказанное обосновывает целесообразность разработки проекта ЖСР опережающими темпами, не дожидаясь внедрения в энергосистему реакторов на быстрых нейтронах и перехода на двухкомпонентную энергетику. При этом следует учитывать, что переработка ОЯТ с помощью ЖСР может стать для "Росатома" и нашей страны новой эффективной статьёй международного бизнеса, не требуя при этом сооружения большого количества реакторных установок.

Возможная организация процесса замыкания ядерного топливного цикла без непосредственного перехода к реакторам на быстрых нейтронах, в том числе используя уже существующие возможности, схематически изображена на рис. 2. Как видно, схемой предусмотрена возможность использования регенерированного топлива разного типа, технически реализуемая уже сегодня и привлекающая всё больший интерес, в том числе при строительстве новых АЭС.

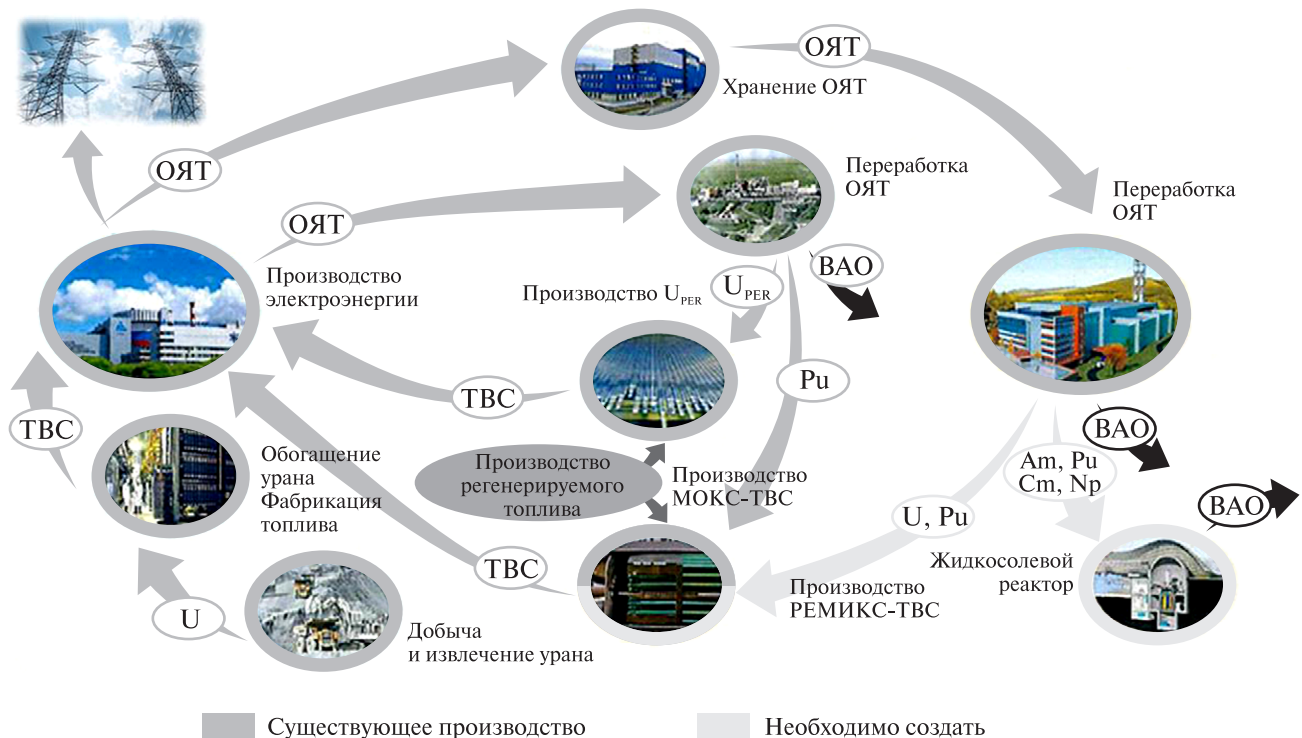


Рис. 2. Возможности и пути замыкания ядерного топливного цикла

В качестве ещё одного возможного направления технологического развития ядерной энергетики рассматривается *малая ядерная энергетика*, развёртывание которой может быть целесообразно с учётом низкой плотности населения нашей страны и ограниченности охвата территории электрическими сетями.

Потенциально объекты использования малой ядерной энергетики существуют, они хорошо известны и не сводятся сегодня исключительно к числу оборонных. Это главным образом объекты локальной энергетики или крупные единичные потребители – такие, как предприятия нефтегазового промысла, горно-обогатительные комплексы, металлургические предприятия, аэропорты и порты. Небольшое, но стабильное энергоснабжение посредством атомных станций малой мощности (АСММ) необходимо метеорологическим и гидрологическим станциям, для обеспечения радиосвязи, радиолокационной и навигационной поддержки транспортной инфраструктуры в Арктике и др. Существенно, что АСММ также могут стать предметом экспорта в страны Юго-Восточной Азии, Африки, Океании и др.

Высокие капитальные затраты на строительство АЭС означают рост LCOE при снижении мощности станции. Вот почему довольно старая идея об АСММ до сих пор не была реализована, несмотря на обилие (более четырёх десятков!) проектов подобного рода. Однако сегодня речь идёт о том, чтобы делать такие станции индустриально с полной заводской готовностью или с высокой степенью готовности, выпускать их серийно, добившись повышенной (в идеале – полной) автономности. Тем самым можно будет существенно сократить расходы на проектирование, капитальное строительство на местах и эксплуатацию, минимизировать численность обслуживающего персонала.

Таким образом, если мы сможем реализовать конструкцию станции, которая будет привезена на место и, не требуя специального обслуживания при эксплуатации, отработает какое-то время, а потом будет увезена обратно (перегруз топлива и выгрузка ОЯТ также предусматриваются в заводских условиях или организуются специальным транспортабельным модулем), то отношение к АСММ как к экономически малопривлекательному объекту изменится. Добавим, что при использовании в отдалённых районах может быть востребована АСММ, работающая в режимах теплоснабжения или когенерации (с одновременным отбором как электрической, так и тепловой энергии), опреснения воды и/или выработки водорода.

Технологии получения и использования водорода в энергетических целях в последнее время привлекают повышенное внимание в развитых

странах, говорят даже о ренессансе *водородной энергетики*. Действительно, во всё более и более актуальных вопросах, связанных с декарбонизацией промышленности, транспорта и энергопотребления, необходимо иметь эффективные буферы – накопители энергии для повышения устойчивости энергетических систем, в том числе включающих возобновляемые источники энергии, наиболее интересные, экономически и социально выгодные решения основаны на использовании водорода. С этой точки зрения, разворачивание сегодня научно-технологической деятельности, нацеленной на расширение масштабов производства и использования водорода в экономике страны, представляется делом насущным и крайне своевременным.

Потребление водорода в мире быстро растёт, и, согласно современным прогнозам, рынок водорода в перспективе до 2050 г. способен занять долю до 18% в структуре глобальной энергетики. В январе 2017 г. в ходе Всемирного экономического форума в Давосе был образован Международный водородный совет. В этот совет вошли ведущие мировые компании, в том числе нефтяные, которые признали, что широкомасштабное использование водорода может стать новым этапом развития энергетики. А премьер-министр Японии Синдзо Абэ на совещании по проблемам новой энергетики в 2017 г. в Токио заявил о намерении первыми в мире построить общество, основанное на использовании водорода, и со временем полностью отказаться от нефти и природного газа как топлива.

Идея водородной энергетики для нашей страны не нова; её проработка активно велась во второй половине прошлого века. Основными препятствиями широкому внедрению водорода считались высокая энергоёмкость производства и взрывоопасность кислород-водородной смеси, требующая специальных мер безопасности, в том числе при хранении/транспортировке водорода в баллонах высокого давления. Эти факторы делали использование водорода в энергетике и на транспорте экономически невыгодным. С тех пор изменилось многое. Изменения, связанные в том числе с научным и технологическим прогрессом, затронули все элементы водородной цепочки "производство – хранение/транспортировка – потребление". Появившиеся излишки генерирующих мощностей требуют организации гибкого процесса энергонакопления, и производство водорода способно служить универсальным и весьма эффективным способом использования таких излишков. Если говорить о потреблении, то прежде всего речь идёт о водородных топливных элементах – наиболее интересном и перспективном способе использования водорода как на транспорте (для электродвижения), так и для мобильных

устройств, — имеющих более высокую (в 3–6 раз) плотность энергии на единицу массы и, соответственно, кратное увеличение длительности работы устройства без подзарядки по сравнению с литиевыми батареями. В области хранения и транспортировки появились новые эффективные адсорберы водорода — как твёрдые (борсодержащие) соединения, так и жидкие (на основе нитридов металлов и интерметаллидов), что позволяет уйти от хранения водорода в баллонах высокого давления.

"Росатом" имеет богатый опыт разработок по водородной тематике во всех элементах жизненного цикла обращения водорода, что позволяет оперативно включиться в формирующийся мировой тренд. Наиболее принципиальный вклад атомная отрасль может внести в развитие водородной энергетики на стадии крупномасштабного производства водорода с помощью так называемого высокотемпературного газоохлаждаемого реактора, концепция и возможности применения которого для целей водородной энергетики в нашей стране достаточно давно и хорошо проработаны [13, 14].

Отдельно следует сказать о термоядерном синтезе как о потенциальном источнике фактически бесконечной энергии. Аргументы, зачем можно и должно заниматься этой проблемой, у нас сегодня те же, что были более 60 лет назад на заре термоядерных исследований. Главные — это, конечно, отсутствие углеродсодержащих выбросов, принципиальная невозможность разгона реактора (термоядерные реакции — не цепные) и неограниченность топливных ресурсов: как известно со школьных времён, энергосодержание дейтерия, находящегося в стакане воды, эквивалентно энергосодержанию бочки (барреля) бензина.

Что сделало человечество в области освоения термоядерной энергии за истекшие годы? Довольно много, и сегодня мы вплотную приблизились к финишной черте: мы уже умеем демонстрировать возможность производства термоядерной энергии, правда, на очень сложных устройствах и в течение короткого времени.

Строящийся в настоящее время на юге Франции в ядерном центре Кадараш токамак ИТЭР (интернациональный термоядерный экспериментальный реактор) является, без преувеличения, самым крупным и самым дорогим научным проектом современности [15]. ИТЭР — это крупнейшая коллаборация ведущих мировых держав. В неё вошли Россия, США, Европейский союз, Япония, потом к ним присоединились Китайская Народная Республика, Индия и Корея.

На рис. 3 стрелками показаны сложные технологические элементы, которые изготавливаются разными сторонами коллаборации. Несмотря на то, что проект движется и строительство идёт успешно, первая плазма в токамаке ИТЭР будет получена только в 2025–2026 гг., а на реальный режим работы с дейтериево-тритиевой смесью токамак выйдет не ранее 2035 г. Спрашивается, зачем мы делаем такое дорогое устройство, не только же из чисто научного интереса?

Для нашей страны ключевое значение имеет то, что, участвуя в этом проекте, мы получаем доступ к самым современным технологиям, причём развиваемым не только у нас, но и во всём мире — согласно договору по ИТЭР. Каждый партнёр, в том числе Российская Федерация, имеет право на получение безвозмездных лицензий на использование технологий, созданных в рамках проекта

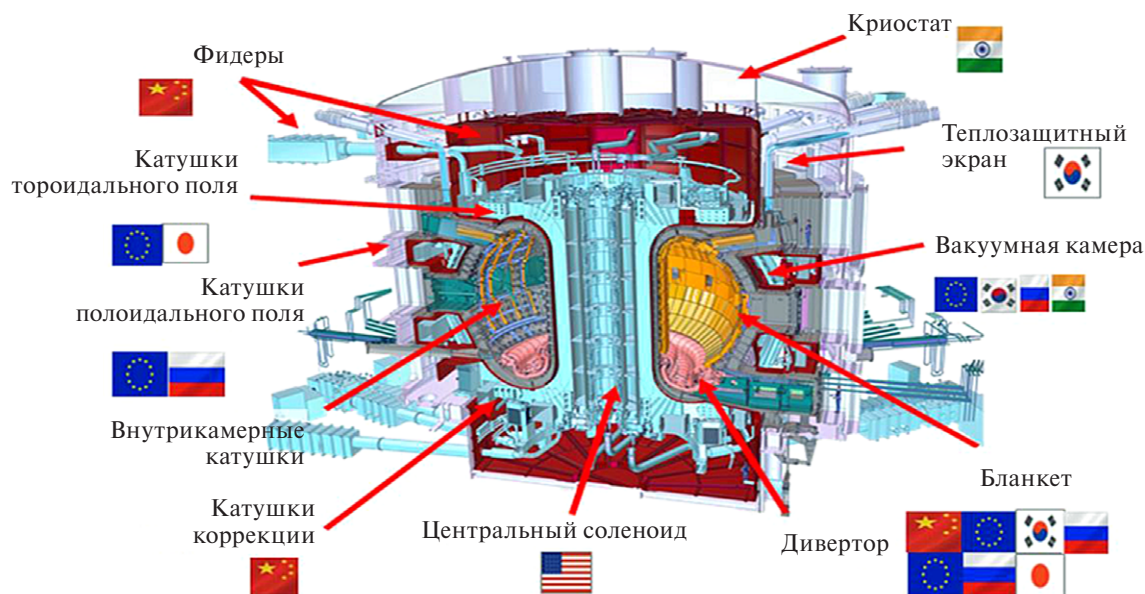


Рис. 3. Основные элементы токамака ИТЭР и страны — разработчики этих элементов [15]

ИТЭР, для собственных (национальных) целей. Поэтому сегодня все участники коллаборации (кроме России) имеют собственные национальные программы и проекты, финансируемые на уровне, превышающем вклады этих стран в проект ИТЭР. Такие национальные программы необходимы для освоения и последующего использования полученных ИТЭР результатов и технологий. Достаточно упомянуть технологии сверхпроводников, мощных источников частиц и электромагнитного излучения, самых прецизионных диагностик плазмы и многое другое.

В России *исследования и разработки в области УТС* развиваются в направлениях освоения энергии как "чистого" термоядерного синтеза, так и в сфере создания гибридных систем. Концепцию гибридного реактора следует рассматривать в увязке с ключевыми проблемами устойчивого развития ядерной энергетики и замыкания топливного цикла. Главное преимущество гибридного термоядерного реактора по сравнению с любой другой ядерной установкой, обеспечивающей конверсию сырьевых изотопов в делящиеся, заключается в использовании термоядерных нейтронов высокой энергии, что позволяет почти в 10 раз увеличить интенсивность наработки новых делящихся изотопов из сырьевых при одинаковой мощности установок. Это важнейшее качество приводит к тому, что присутствие гибридных термоядерных реакторов в структуре ядерной энергетической системы можно ограничить небольшой (менее 15%) долей и при этом в полном объеме решить проблему обеспечения топливом [16, 17]. Реакторы деления, составляющие основу существующей атомной энергетики, будут обеспечены делящимися изотопами, произведёнными в гибридных реакторах. Одновременно с этим гибридные реакторы будут обеспечены тритием, нарабатанным в реакторах деления. Вторая возможная задача гибридных реакторов – высокоэффективное дожигание минорных актинидов, накапливающихся в результате работы ядерных реакторов.

Несколько особняком стоят работы по так называемому инерционному термоядерному синтезу, принцип которого состоит в поджиге (микровзрыве) термоядерной мишени за время, меньшее времени её разлёта. Такие работы позволяют продвигаться в область сверхплотных состояний вещества и сверхвысоких плотностей энергии, что имеет ещё и принципиальное значение для фундаментальной науки. Заметим, что помимо овладения такими технологиями термоядерный синтез продемонстрировал большое количество побочных технологических применений, которые уже сейчас внедрены в промышленность.

Подводя итог, хотелось бы отметить, что перечисленные здесь направления развития ядерной

энергетики – все без исключения – основаны на продвижении отечественной ядерной науки и развитии сферы высоких технологий, что отвечает требованиям утверждённой Президентом РФ Стратегии научно-технологического развития, обеспечивая энергетическую и национальную безопасность нашей страны. Следует подчеркнуть, что атомная отрасль до сих пор остаётся одной из самых наукоёмких и высокотехнологичных сфер нашего народного хозяйства и при этом обеспечивает экономический профицит, довольно заметный в бюджете страны. Чтобы сохранить эти позиции, атомной отрасли необходимы системные инвестиции в научно-технологическое развитие. Перечисленные нами направления этого развития в настоящее время включены в национальный проект "Атомная наука, техника и технологии", который Госкорпорация "Росатом" предлагает к реализации.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны многочисленным коллегам по Госкорпорации "Росатом" за плодотворные обсуждения, в том числе в ходе отраслевой научной конференции 3–4 апреля 2018 г. Особую признательность выражаем В.Е. Фортову за рассмотрение перспектив развития атомной энергетики на заседании Совета по приоритетному направлению научно-технологического развития Российской Федерации "Переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышение эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, формирование новых источников, способов транспортировки и хранения энергии" 25 октября 2018 г. и Е.О. Адамову, В.Г. Асмолову, Л.А. Большову, А.В. Дубу, И.А. Ермакову, О.В. Крюкову, Н.Н. Пономарёву-Степному, А.А. Саркисову за подготовку и представление материалов на данном заседании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Статистический Ежегодник мировой энергетики 2018. <https://yearbook.enerdata.ru/electricity/world-electricity-production-statistics.html>
2. Levelized Cost of Electricity Renewable Energy Technologies, March 2018. Fraunhofer Institute for Solar Energy System. https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/publications/studies/EN2018_Fraunhofer-ISE_LCOE_Renewable_Energy_Technologies.pdf
3. Расплав. Удержание расплавленных материалов активной зоны водоохлаждаемых реакторов / Под ред. В.Г. Асмолова, А.Ю. Румянцева, В.Ф. Стрижова. М.: Концерн "Росэнергоатом", 2018.
4. Чибиняев А. В., Алексеев П. Н., Теплов П. С. Оценка влияния регулирования нейтронного спектра на глубину выгорания топлива ВВЭР-1000 // Атомная энергия. 2006. Т. 101. Вып. 3. С. 231–234.
5. Chibinyaev A. V., Alekseev P. N., Gorohov V. F., Teplov P. S. The main characteristic of the evolution project SuperVVER with spectrum shift regulation. Kerntechnik. 2013. V. 78. № 4. P. 285–291.

6. Долгов В. В. Энергоблоки на основе ВВЭР с закритическими параметрами теплоносителя // Атомная Энергия. 2002. Т. 92. Вып. 4. С. 277–280.
7. Silin V. A., Voznesensky V. A., Afrov A. M. The Light Water Integral Reactor with natural circulation of the coolant at supercritical pressure B-500 SKDI // Nuclear engineering and Design. 1973. V. 144. P. 327–336.
8. Schulenberg T., Starflinger J., Heinecke J. Three pass core design proposal for a high performance light water reactor // Progress in Nuclear Energy. 2008. V. 50. P. 526–531.
9. Адамов Е. О., Соловьев Д. С. Ядерная энергетика – вызовы и решение проблем // Энергетическая политика. 2017. Вып. 3. С. 21–30.
10. Адамов Е. О., Рачков В. И. Новая технологическая платформа формирования национальной стратегии развития ядерной энергетики // Известия РАН. Сер. "Энергетика". 2017. № 2. С. 3–12.
11. IAEA Technical Meeting on the Status of Molten Salt Reactor Technology. 31 Oct – 3 Nov 2016. Vienna, Austria.
12. Molten Salt Reactors and Thorium Energy / Eds. J.D. Thomas. Cambridge, MA, USA: Woodhead Publ., 2017.
13. Гребенник В. Н., Кухаркин Н. Е., Пономарёв-Степной Н. Н. Высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы – инновационное направление развития атомной энергетики // М.: Энергоатомиздат, 2008.
14. Ядерные энергетические установки с высокотемпературными модульными газоохлаждаемыми реакторами. В 2-х томах / Под ред. Н. Н. Пономарёва-Степного. Нижний Новгород, 2018.
15. ITER – the way to new energy. <https://www.iter.org/proj/inafewlines>
16. Велихов Е. П., Ковальчук М. В., Ильгисонис В. И. и др. Ядерная энергетическая система с реакторами деления и синтеза – стратегический ориентир развития отрасли // ВАНТ. Сер. "Термоядерный синтез". 2017. Т. 40. Вып. 4. С. 5–13.
17. Велихов Е. П., Ковальчук М. В., Ильгисонис В. И. и др. Эволюционное развитие атомной энергетики в направлении крупномасштабной ядерной энергетической системы с реакторами деления и синтеза // Энергетическая политика. 2017. Вып. 3. С. 12–21.

THE ACTUAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL PROBLEMS OF NUCLEAR ENERGY

© 2019 Yu. A. Olenin, V. I. Ilgisonis

State Atomic Energy Corporation "Rosatom", Moscow, Russia

E-mail: YuAOlenin@rosatom.ru; vilkia@gmail.com

Received: 03.12.2018

Revised version received: 03.12.2018

Accepted: 21.01.2019

Present-day problems and possible prospects of domestic nuclear power energy are discussed. The nuclear industry is concluded to can act as a powerful driver of scientific and technological progress, as a mechanism that stimulates the development of a wide range of industrial and technological segments of the country's economy. Based on the report at the General meeting of the RAS on November 13, 2018.

Keywords: nuclear power, nuclear reactor, nuclear fuel cycle, fast neutron reactor, radioactive waste, spent nuclear fuel, liquid-salt reactor, small modular reactors, hydrogen energy, thermonuclear fusion.