

ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ В ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ XXI ВЕКА

О.Л. Ташлыков, С.Е. Щеклеин

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина
620002 Екатеринбург, ул. Мира, д. 19
Тел: (343) 375-95-08, e-mail: s.e.shcheklein@urfu.ru; otashlykov@list.ru

Заключение совета рецензентов: 23.05.15 Заключение совета экспертов: 27.05.15 Принято к публикации: 31.05.15

Показана потенциальная роль ядерной энергетики в обеспечении устойчивого энергообеспечения и смягчении негативных экологических последствий производства электроэнергии при сжигании органического топлива. Приведены возможности реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем (РБН) в решении проблемы оптимального использования топливных ресурсов и минимизации отходов при замыкании ядерного топливного цикла. Выполнен анализ воздействия АЭС с РБН на окружающую среду и персонал. Описана архитектура перспективной двухкомпонентной ядерной энергетики XXI века.

Ключевые слова: атомная электростанция, реактор на быстрых нейтронах, радиоактивные отходы, система экологического менеджмента, безопасность, коллективная доза, закрытый ядерный топливный цикл, ядерная энергетическая система.

ECOLOGICAL FORECASTING IN THE NUCLEAR POWER OF XXI CENTURY

O.L. Tashlykov, S.E. Shcheklein

Urals Federal University named after the first President of Russia Boris Yeltsin
19 Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russia
Tel.: (343) 375-95-08, e-mail: s.e.shcheklein@urfu.ru; otashlykov@list.ru

Referred: 23.05.15 Expertise: 27.05.15 Accepted: 31.05.15

It is shown the potential role of nuclear energy in sustainable energy supply ensuring and mitigating of the negative environmental impacts of electricity production from fossil fuels. Given is the capability of fast neutron reactors with sodium coolant (FNR) for solving the problems of fuel resources optimal use and waste minimization by closing the nuclear fuel cycle. The analysis of the impact of nuclear power plants with FNR on the environment and personnel is made. The architecture of a promising two-component nuclear energy of XXI century is described.

Keywords: nuclear power plant, fast breeder reactor, radioactive waste, ecological management system, safety, collective dose, closed nuclear fuel cycle, nuclear energy system.



Олег Леонидович
Ташлыков
Oleg L. Tashlykov

Сведения об авторе: доцент кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» УрФУ, канд. техн. наук. Работал в системе Министерства по атомной энергии СССР (РФ). Имеет государственную и отраслевые награды: почетное звание «Заслуженный учитель профессионального образования РФ», серебряную медаль концерна «Росэнергоатом» – За заслуги в повышении безопасности атомных станций, звание «Ветеран атомной энергетики и промышленности России».

Образование: Томский политехнический институт (1978) по специальности «Атомные электрические станции и установки».

Область научных интересов: ядерная энергетика и технологии, радиационная безопасность персонала, оптимизация ремонтных работ на АЭС.

Публикации: 2 монографии, более 100 научных публикаций, 1 учебник и 12 учебных пособий.

Information about the author: Associate professor of the Nuclear Power Plants and Renewable Energy Sources Department of Ural Federal University, candidate of technical science. Worked in the complex of Atomic Energy Ministry of USSR (RF). Has a State and industry awards: honorable degree “Celebrated teacher of professional education of Russian Federation”, silver medal of Rosenergoatom concern for service in the rise of nuclear power plants safety, “Veteran of atomic energy and industry of Russia”.

Education: Nuclear Power Plants and Units in Tomsk Polytechnic Institute in 1978.

Research area: nuclear energy and technologies, personnel radiation safety, optimization of repair works at NPP.

Publications: 2 monographs, more than 100 scientific works, a textbook and 12 tutorials.

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина.

Научный руководитель ряда реализованных инновационных проектов, в т. ч. «Энергоэффективный дом для села», «Системы солнечного энергоснабжения автономных потребителей специального назначения», «Солнечные системы охранной сигнализации» и др.

Член редколлегии журнала «Известия вузов. Ядерная энергетика», сборника трудов УГТУ-УПИ «Теплофизика ядерных энергетических установок», научно-технического журнала «Энергоэффективность и анализ». Заслуженный энергетик России, действительный член Международной энергетической академии.

Образование: Уральский политехнический институт (УГТУ-УПИ) (1972).

Область научных интересов: термодинамика ядерных энергетических установок, проблемы атомной энергетики и теплофизики двухфазных потоков, продление ресурса и повышение надежности оборудования АЭС, солнечная энергетика, ветровая энергетика, биоэнергетика, энергосбережение, энергоэффективность.

Публикации: более 450, в том числе 6 монографий и учебников, 28 изобретений.

Information about the author: doctor of technical science, professor, Urals State Technical University “Atomic Stations and Renewable Energy Sources” Department head.

A scientific director of several realized innovation projects, including “The energoefficient house for the village”, “Special systems of individual consumer solar energy supply”, “The solar systems for the guarding alarm” etc.

A member of the editorial board of “Institute of Higher Education News. Nuclear Power” magazine, “Nuclear power units heat engineering” USTU article collection, “Energoeffectiveness and analysis” scientific magazine. A Honoured power engineering specialist of Russian Federation, a member of International Energy Academy.

Education: Urals Polytechnic Institute (1972).

Research area: nuclear power units thermodynamics; questions of nuclear energy and thermophysics of the two-phase flows; NPP equipment lifetime enduring and reliability increasing; solar, wind and bioenergetics, energy conservation, energy efficiency.

Publications: more than 450 scientific works, including 6 monographs and textbooks, 28 inventions.



Сергей Евгеньевич
Щеклеин
Sergey E. Shcheklein



Введение

Эксперты в области энергетики ожидают, что в XXI в. резко возрастет спрос на энергию, в особенности в развивающихся странах, где сегодня свыше миллиарда человек не имеют доступа к современным энергетическим услугам. Для удовлетворения глобального спроса на энергию потребуется на 75% увеличить к 2050 г. первичное энергоснабжение. Если не будет предпринято шагов по снижению выбросов, то за тот же период связанные с выработкой энергии выбросы CO₂ почти удвоятся.

Энергетические установки, работающие на органическом топливе, являются главными источниками загрязнения воздуха. Атомные электростанции практически не производят выбросов загрязнителей воздуха в ходе своей эксплуатации. ГЭС, АЭС и ветряные энергоустановки входят в число источников самых низких объемов выбросов CO₂, если учитывать выбросы в течение всего энергетического жизненного цикла.

По оценке межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), ядерная энергетика обладает самым большим потенциалом по смягчению негативных последствий различных технологий производства электроэнергии при наименьших средних затратах в секторе энергоснабжения [1].

Ядерная энергетика выгодно отличается от других технологий в сфере энергетики в плане «интернализации» всех внешних издержек на этапах от безопасности до захоронения отходов и снятия с эксплуатации. «Интернализация» затрат означает то, что затраты во всей этой деятельности в значительной степени уже учтены в цене, которую мы платим за электроэнергию, выработанную на АЭС. Если бы экологические издержки, связанные с использованием ископаемого (органического) топлива, были «интернализированы» в его цене, то цена, которую мы платим за электроэнергию, произведенную на основе ископаемого топлива, была бы значительно выше [2].

В мире насчитывается 438 энергоблоков АЭС общей мощностью около 400 ГВт. Авария на АЭС «Фукусима-дайти» в Японии в марте 2011 г. дала основания для беспокойства по поводу ядерной безопасности во всем мире и заставила задуматься о будущем ядерной энергетики. Теперь стало ясно, что в предстоящие десятилетия использование ядерной энергии будет продолжать расти, хотя этот рост будет медленнее, чем предполагалось до аварии. Многие страны, у которых имеются ядерно-энергетические программы, планируют их расширять. Многие новые страны – как развитые, так и развивающиеся – намерены встать на путь развития ядерной энергетики. Некоторые страны, например Германия, планируют отказаться от ядерной энергетики. Последние прогнозы МАГАТЭ говорят об устойчивом росте числа атомных электростанций в мире. Мощность

АЭС возрастет к 2030 г. на 23% по низкому прогнозу и на 100% по высокому прогнозу [3].

Однако современная ядерная энергетика, использующая реакторы на тепловых нейтронах, имеет системные проблемы, к которым относится непрерывное увеличение количества отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) и радиоактивных отходов (РАО) (ближнесрочная проблема) и ограниченность топливной базы ввиду низкой эффективности полезного использования природного урана (дальнесрочная проблема). В существующих реакторах на тепловых нейтронах может использоваться только около 1% урана (включая делящиеся и воспроизводящие изотопы), а в реакторах-размножителях на быстрых нейтронах – до 60% [4]. Такие реакторы способны преобразовывать ²³⁸U в делящийся ²³⁹Pu интенсивнее, чем сами поглощают делящийся материал (свойство, называемое «размножением»).

Перспективная крупномасштабная ядерная энергетика должна обладать гарантированной безопасностью, экономической устойчивостью и конкурентоспособностью, отсутствием ограничений по сырьевой базе на длительный период времени, экологической устойчивостью (малоотходностью). Этим условиям могут удовлетворить ядерные энергетические системы (ЯЭС) с реакторами-размножителями на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем.

Россия обладает многолетним опытом в области сооружения и эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. Это позволяет обобщить и проанализировать экологические особенности реакторов данного типа, возможность их использования для устойчивого обеспечения энергией человечества и решения экологических проблем.

Основные требования к перспективной ядерной энергетике

Соблюдение высоких стандартов ядерной безопасности является неременным условием для широкомасштабного развития ядерной энергетики в XXI в. После аварии на АЭС «Фукусима-дайти» повышенное внимание уделяется поиску путей предотвращения тяжелых аварий и смягчения их последствий. Для АЭС нового поколения ставится задача полного исключения необходимости эвакуации населения в районе размещения атомной станции при любых технически возможных авариях.

Уникальным свойством ядерной энергетики является воспроизводство ядерного топлива. Это определяет перспективы его использования, т.к. значительно возрастают ресурсы ядерного топлива. В настоящее время это свойство используется слабо, поскольку есть доступные ресурсы урана.

Существуют два основных варианта обращения с ОЯТ: однократный цикл, при котором топливо используется только один раз, после чего хранится как



отходы. Недостатками такого открытого ядерного топливного цикла (ЯТЦ) являются большой объем, уровень радиотоксичности и остаточное тепловыделение ОЯТ. Во втором варианте ОЯТ перерабатывается с извлечением урана и плутония для их дожигания в реакторах. Рециклирование и повторное использование минимизируют объем отходов. Эта концепция наряду с оптимальным использованием природных ресурсов является основой замкнутого ЯТЦ, в котором пригодные к повторному использованию компоненты отработавшего топлива рециклируются и не считаются отходами.

В связи с требованием обеспечения малоотходности перспективная ядерная энергетика должна рассматриваться комплексно. Поэтому используемый термин «ядерная энергетическая система» включает в себя реактор и переработку (рециклирование) ядерного топлива.

В 2000 г. государства – члены МАГАТЭ признали, что для внедрения инноваций, обеспечивающих возможность того, чтобы ядерная энергетика способствовала устойчивому удовлетворению потребностей в энергии в XXI веке, необходимы согласованные и скоординированные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы. Форум GIF (the Generation IV International Forum) создан в 2001 г. Еще одна международная инициатива, дополняющая GIF – Международный проект по инновационным ядерным реакторам и топливным циклам (ИНПРО), запущен МАГАТЭ в 2000 г. ИНПРО ориентируется на нужды «конечных пользователей» инновационных систем, в то время как проект GIF направлен на организацию международных исследований (поставщиков и разработчиков).

В 2002 г. по результатам рассмотрения более 100 различных проектов экспертами GIF были выбраны шесть инновационных ЯЭС (в том числе инновационных ядерных циклов). Среди них единственной технологией, для которой имеется значительный практический опыт проектирования, строительства, эксплуатации, является технология быстрых натриевых реакторов.

Методы и средства

Обоснование выбора реактора на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем для перспективной ядерной энергетической системы

АЭС с реакторами на быстрых нейтронах являются передовым типом ядерных установок и имеют следующие основные преимущества [5]:

- возможность работы при низком (близком к атмосферному) давлении в корпусе реактора радикально снижает риски выхода радиоактивных продуктов за его пределы;

- высокая тепловая эффективность и надежность работы оборудования реакторного контура (полное отсутствие коррозии и отложений на поверхностях твэлов и теплообменного оборудования);

- возможность получать высокие температуры теплоносителя, что повышает термодинамическую эффективность АЭС и открывает перспективы создания ядерно-технологических комплексов для цветной металлургии и химической промышленности;

- минимальный начальный запас реактивности, что практически исключает возможность ядерно-опасных событий;

- минимальный объем отходов производства (10-20 м³/год);

- наименьший среди всех АЭС уровень радиационных нагрузок на персонал и отсутствие воздействия на биосферу;

- наиболее высокая среди всех типов АЭС эффективность использования ядерного топлива (глубина выгорания выше, чем в тепловых реакторах, в 2-2,5 раза);

- возможность расширенного производства ядерного топлива (бридинга).

Реакторы с натриевым теплоносителем имеют дополнительные свойства внутренней самозащитенности, усиливающие их безопасность:

- натрий эффективно удерживает изотопы йода и цезия (подтверждено опытом эксплуатации БН-600), что исключает выход опасных изотопов газоаэрозольной фракции продуктов деления в окружающую среду при нормальной эксплуатации и авариях;

- слабое коррозионно-эрозионное воздействие натрия на конструкционные материалы исключает опасность перегрева твэлов вследствие забивания проходного сечения тепловыделяющих сборок (ТВС) и нарушения целостности корпуса реактора;

- хорошие теплофизические свойства натрия повышают эффективность отвода и рассеяния тепла в аварийных ситуациях.

Россия имеет значительный научно-технический и проектный задел по быстрым натриевым реакторам, а также опыт применения их для энерготехнологического использования (опреснение, теплофикация). Энергоблок № 3 Белоярской АЭС (БАЭС) с реактором на быстрых нейтронах БН-600 номинальной электрической мощностью 600 МВт эксплуатируется с 1980 г. Это единственный в мире успешно работающий столь длительное время быстрый реактор промышленного уровня мощности. За этот период освоена и усовершенствована технология безопасного обращения с натрием. Расчетный срок эксплуатации блока был запланирован до 2010 г. На основе накопленного опыта работы, оценки состояния материалов, модернизации и замены отдельного оборудования получена лицензия на его эксплуатацию до 2020 г. с правом последующего продления [6].

В 2015 г. запланирован энергетический пуск реактора БН-800, разработанного на базе реактора БН-600 и имеющего улучшенные технико-экономические показатели и характеристики безопасности. В БН-800 предусмотрена дополнительная аварийная защита реактора на пассивном принципе действия.



Введена аварийная система отвода остаточных тепловыделений через воздушные теплообменники. Предусмотрено устройство для локализации расплавленных фрагментов активной зоны в постулируемой аварии с отказом всех средств защиты реактора. БН-800 является необходимым этапом в создании серийного реактора на быстрых нейтронах. В нем предполагается использование МОКС-топлива для утилизации оружейного плутония с достижением выгорания МОКС-топлива до 15% т.а. и выше, проведение испытаний высокоплотных видов топлива, обеспечивающих коэффициент воспроизводства на уровне 1,35-1,45, предусматривается отработка замкнутого топливного цикла на МОКС-топливе, а также проведение работ по организации выжигания младших актинидов, как собственных, так и накопленных в тепловых реакторах. Проектный срок службы увеличивается с 30 лет (БН-600) до 45 лет с перспективой его продления до 60 лет.

В настоящее время разрабатывается проект реактора БН-1200, который может быть использован в ЯЭС четвертого поколения с замыканием ЯТЦ. Концепция проектируемого энергоблока БН-1200 базируется на большом положительном опыте России в разработке и эксплуатации быстрых реакторов с натриевым теплоносителем и максимально возможным использованием достижений этой технологии. Проект БН-1200 относится к реакторным установкам повышенной безопасности благодаря оптимальному сочетанию референтных и новых решений, обеспечению высоких показателей безопасности и высоких технико-экономических характеристик, возможности расширенного воспроизводства топлива. Вероятность тяжелого повреждения активной зоны БН-1200 на порядок меньше требований нормативных документов. Санитарно-защитная зона (СЗЗ) находится в границах промплощадки для любых проектных аварий [5]. В проекте БН-1200 предусмотрено повышение уровня радиационной и пожарной безопасности. Все системы с радиоактивным натрием размещены в пределах корпуса реактора, что исключает возможность выхода радиоактивного натрия в помещения реакторной установки из внешних коммуникаций. Уменьшение энергонапряженности активной зоны и увеличение выдержки отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС) во внутриреакторном хранилище до двух лет снизит удельное энерговыделение в топливе в три раза. Это повышает безопасность транспортировки и отмывки ОТВС от натрия перед их установкой в бассейн выдержки.

Протяженность натриевых трубопроводов второго контура снижена почти в три раза по сравнению с БН-800 благодаря переходу на парогенераторы корпусного типа и применению сильфонных компенсаторов. Все трубопроводы будут иметь страховочные кожухи. Это исключает большие течи и пожары с нерадиоактивным натрием.

Анализ воздействия АЭС с реакторами на быстрых нейтронах на окружающую среду и персонал

35 лет надежно и безопасно эксплуатируется самый мощный в мире энергетический реактор на быстрых нейтронах БН-600 на БАЭС. Как показывает многолетний опыт эксплуатации, БН-600 является одним из наиболее экологически чистых реакторов.

Основными видами нерадиационного воздействия БАЭС на окружающую среду являются: тепловое, сбросы вредных веществ в водные объекты, выбросы загрязняющих веществ (ЗВ) в атмосферный воздух и размещение отходов на промышленной площадке.

АЭС с реакторами на быстрых нейтронах имеют термический коэффициент полезного действия более 40%, что значительно снижает тепловые выбросы в окружающую среду по сравнению с традиционными АЭС с «тепловыми» реакторами (коэффициент полезного действия – 31-33%).

По данным Государственного доклада «О состоянии окружающей среды и влиянии факторов среды обитания на здоровье населения Свердловской области», доля БАЭС в валовом объеме выбросов ЗВ в атмосферный воздух, сбросах ЗВ в водные объекты составляет сотые доли процента. Основными источниками выбросов (более 98% выбросов от всех источников АЭС) являются котельные, работающие на мазуте.

Выбросы радиоактивных веществ Белоярской АЭС в атмосферу обусловлены, в основном, инертными радиоактивными газами (ИРГ) и составляют, как правило, менее одного процента от допустимого значения (рис. 1).

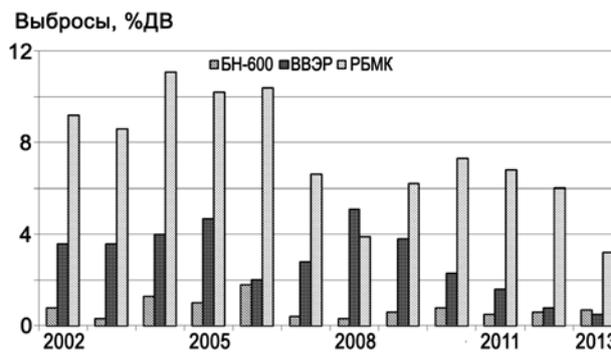


Рис. 1. Выбросы инертных радиоактивных газов АЭС с реакторами различных типов (% от допустимых выбросов)
Fig. 1. The release of the inert radioactive gases from different NPP types (% of the permissible release)

Систематические измерения концентрации радиоактивных веществ в атмосферном воздухе, в водоемах-охладителях, измерения активности почвы и растительности, продуктов питания в контрольных точках подтверждают отсутствие влияния работы АЭС в режиме нормальной эксплуатации на состояние объектов внешней среды. Радиационный

риск для населения, проживающего в районе расположения БАЭС, находится в области безусловно приемлемого риска, что не требует проведения каких-либо дополнительных мероприятий по снижению активности радионуклидов в выбросах и сбросах АЭС.

Радиационный контроль объектов окружающей среды в СЗЗ и зоне наблюдения (ЗН) проводит группа внешнего радиационного контроля, входящая в состав отдела радиационной безопасности БАЭС. Кроме того, обеспечивается мониторинг состояния окружающей среды на основании результатов длительного наблюдения. Отслеживается тенденция изменения параметров контролируемых объектов.

Для непрерывного измерения в заданных точках мощности дозы гамма-излучения и температуры на промплощадке в СЗЗ и ЗН БАЭС предназначена автоматизированная система контроля радиационной обстановки (АСКРО). Результаты измерений передаются по радиоканалу в Кризисный центр ОАО «Концерн Росэнергоатом» и ситуационно-кризисный центр корпорации «Росатом».

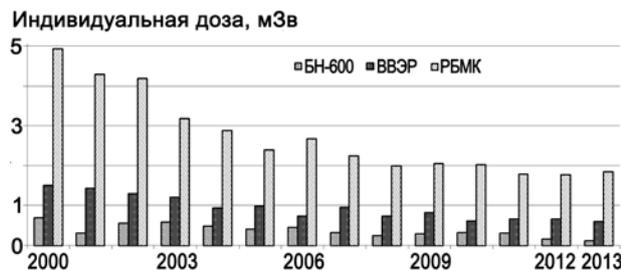


Рис. 2. Средневзвешенные индивидуальные дозы облучения на АЭС России по типам реакторных установок
Fig. 2. Weighted average individual exposure doses at Russian NPPs by reactor types

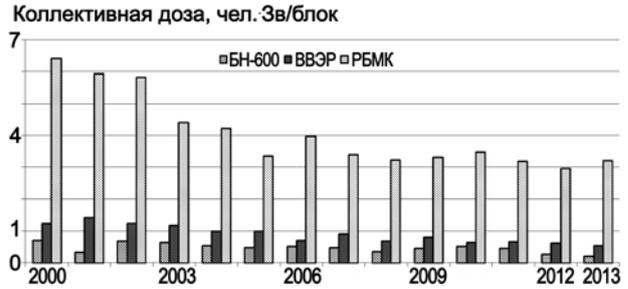


Рис. 3. Коллективные дозы облучения на энергоблоках АЭС России с реакторами РБМК, ВВЭР и БН-600
Fig. 3. Collective exposure doses at Russian RBMK, VVER and BN-600 reactor nuclear power plant units

Для энергоблока с реактором БН-600 достигнуты одни из наиболее низких уровней доз облучения как в России, так и в мире (рис. 2, 3). При этом на ремонт приходится 50-75% коллективной дозы [7].

Суммарные дозовые затраты при работах по продлению срока эксплуатации БН-600, основной объем которых был выполнен в 2005-2010 годах, значительно ниже, чем для реакторов типа РБМК и ВВЭР [5]. Во многом это определяется интегральной компоновкой реактора БН-600, при которой основное оборудование первого контура размещено в корпусе реактора.

Результаты и их обсуждение

Замкнутый ЯТЦ на основе быстрых реакторов (рис. 4) позволяет минимизировать объемы РАО и оптимизировать потребление природных ресурсов. Большинство трансурановых элементов могут делиться под воздействием нейтронов быстрого спектра с выделением энергии. Поэтому в высокоактивные отходы перейдет меньшее их количество.

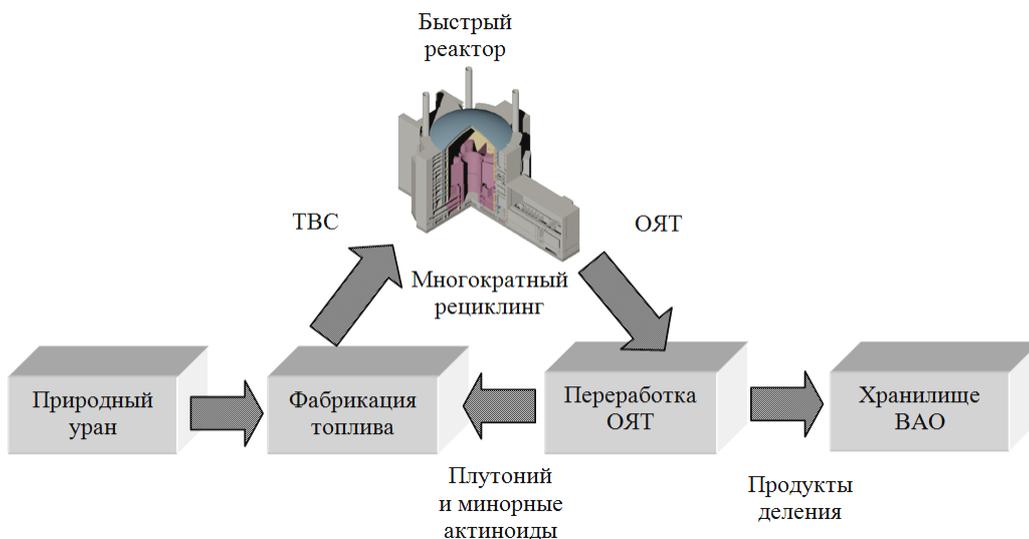


Рис. 4. Топливный цикл на основе быстрых реакторов
Fig. 4. Fast reactor based fuel cycle



Результаты анализа замыкания ЯТЦ показывают, что системные проблемы действующей ядерной энергетике (непрерывно возрастающее количество ОЯТ и РАО и неэффективное использование природного урана) решаются при формировании ЯЭС, в состав которой входят реакторы на быстрых нейтронах с улучшенными параметрами воспроизводства топлива в сочетании с реакторами ВВЭР при обеспечении переработки, рециклирования и регенерации топлива.

Создание серийного энергоблока с быстрым реактором с натриевым теплоносителем БН-1200, способного работать в коммерческом режиме эксплуатации, является одним из стратегических приоритетов атомной отрасли России. Он способствует переходу в промышленных масштабах на новую технологическую платформу – замкнутый ЯТЦ.

Серийный блок БН-1200, работая в замкнутом ЯТЦ, многократно расширит топливную базу ядерной энергетике за счет вовлечения в производственный цикл неиспользуемого сегодня изотопа урана-238. Также он позволит минимизировать образование РАО и утилизировать наиболее проблемные радиоактивные элементы из ОЯТ других реакторов. Совместная работа серийных реакторов на быстрых нейтронах и на тепловых нейтронах выведет ядерную энергетике на качественно новый уровень развития, позволит использовать наиболее передовую технологию производства энергии и максимально достижимую экологическую чистоту всего технологического процесса, от добычи урановой руды до утилизации отходов.

Технология натриевых реакторов рассматривается в России как приоритетная по следующим причинам [8]:

– в ближайшей и среднесрочной перспективе отсутствует альтернатива внедрению в замкнутый ЯТЦ иной реакторной технологии, кроме технологии быстрых натриевых реакторов, обладающей необходимыми обоснованностью, технико-экономическими характеристиками, референтностью и опытом эксплуатации;

– в замкнутом ЯТЦ эта технология предусматривает утилизацию в быстрых натриевых реакторах плутония от переработки ОЯТ ВВЭР (при этом ВВЭР и БН используют МОКС-топливо);

– возможно замещение сооружения энергоблоков с ВВЭР в инвестиционной программе Госкорпорации «Росатом» на энергоблоки с БН-1200 при условии превышения затрат на их сооружение по сравнению с ВВЭР не более чем на 10-20%.

Рециклирование актинидов в быстрых реакторах обеспечивает значительное сокращение времени, необходимого для уменьшения радиотоксичности отходов до уровня природной урановой руды, которая используется в топливе легководных реакторов. Имеется техническая возможность получать радиоактивные отходы, которые будут распадаться до таких природных уровней за 300-400 лет, а не за 250 000 лет, как в случае прямого захоронения отработавшего топлива [9].

Заключение

Без ядерной энергетике невозможно удовлетворить глобальный спрос на энергию и одновременно минимизировать экологические издержки, связанные с использованием органического топлива. Архитектура перспективной ЯЭС, удовлетворяющей требованиям стабильности и безопасности, должна быть двухкомпонентной и включать в себя реакторы на быстрых нейтронах с расширенным воспроизводством топлива и реакторы на тепловых нейтронах с обязательным замыканием топливного цикла. При этом переработка ОЯТ, многократный рецикл топлива, сепарация и изоляция РАО обеспечат неограниченность ресурсов ядерного топлива за счет производства ^{239}Pu и ^{233}U из природных урана и тория, снизят объемы хранилищ ОЯТ и решат проблемы обращения с РАО. Технология реакторов на быстрых нейтронах может уменьшить радиотоксичность отходов до уровня природного урана примерно за 400 лет вместо сотен тысяч лет.

Список литературы

1. https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull54-1/54104710506_ru.pdf.
2. https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull54-1/54104710404_ru.pdf.
3. <https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull54-1/54104710707.pdf>.
4. Справочник по ядерной энерготехнологии: пер. с англ. / Ф. Ран и др.; под ред. В.А. Легасова. М.: Энергоатомиздат, 1989.

References

1. https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull54-1/54104710506_ru.pdf.
2. https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull54-1/54104710404_ru.pdf.
3. <https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull54-1/54104710707.pdf>.
4. Spravočnik po ádernoj ènergotehnologii: per. s angl. / F. Ran i dr.; pod red. V.A. Legasova. M.: Ènergoatomizdat, 1989.

5. Tashlykov O., Shcheklein S., Sesekin A., Chentsov A., Nosov Y. & Smyshlaeva O. Ecological features of fast reactor nuclear power plants (NPPs) at all stages of their life cycle. 1st International Conference on Energy Production and Management in the 21st Century: The Quest for Sustainable Energy; WIT Transactions on Ecology and the Environment. Volume 190, 2014, Pages 907-918.

6. Носов Ю.В., Смышляева О.Ю., Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е. Обеспечение экологической безопасности при длительной эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах на примере Белоярской АЭС // Альтернативная энергетика и экология – ISJAE. 2012. № 4. С. 64-68.

7. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Булатов В.И., Шастин А.Г. О проблеме снижения дозовых затрат персонала АЭС // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2011. № 1. С. 55-60.

8. Пономарев-Степной Н.Н. Перспективы развития и внедрения замкнутого топливного цикла / Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетике. Доклады девятой международной научно-технической конференции 21-23 мая 2014 г. М.: ОАО «Концерн Росэнергоатом», 2014. С. 19-22

9. Бычков А.В. Будущее: инновационные технологии переработки и захоронения радиоактивных отходов // Бюл. МАГАТЭ 55-3-Сентябрь 2014. С. 22-23.

5. Tashlykov O., Shcheklein S., Sesekin A., Chentsov A., Nosov Y. & Smyshlaeva O. Ecological features of fast reactor nuclear power plants (NPPs) at all stages of their life cycle. 1st International Conference on Energy Production and Management in the 21st Century: The Quest for Sustainable Energy; WIT Transactions on Ecology and the Environment. Volume 190, 2014, Pages 907-918.

6. Nosov Ū.V., Smyšlâeva O.Ū., Tašlykov O.L., Šeklein S.E. Obespečenie êkologičeskoj bezopasnosti pri dlitel'noj êkspluatacii reaktorov na bystryh nejtronah na primere Beloârskoj AËS // Al'ternativnaâ ênergetika i êkologiâ – ISJAE. 2012. № 4. S. 64-68.

7. Tašlykov O.L., Šeklein S.E., Bulatov V.I., Šastin A.G. O probleme sniženiâ dozovyh ztrat personala AËS // Izv. vuzov. Âdernaâ ênergetika. 2011. № 1. S. 55-60.

8. Ponomarev-Stepnoj N.N. Perspektivy razvitiâ i vnedreniâ zamknutogo toplivnogo cikla / Bezopasnost', êffektivnost' i êkonomika atomnoj ênergetiki. Doklady devâtoj meždunarodnoj naučno-tehničeskoj konferencii 21-23 maâ 2014 g. M.: ОАО «Концерн Росэнергоатом», 2014. С. 19-22

9. Byčkov A.V. Budušee: innovacionnye tehnologii pererabotki i zahoroneniâ radioaktivnyh othodov // Bûlleten' MAGATË 55-3-Sentâbr' 2014. S. 22-23.

Транслитерация по ISO 9:1995

