

ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

**А.Ю. Петров, А.В. Шутиков, Н.Н. Пономарев-Степной, В.С. Беззубцев,
М.В. Баканов, В.М. Троянов**

***АО «Концерн Росэнергоатом»
109507, Москва, ул. Ферганская, 25***



Рассмотрены возможные варианты организации двухкомпонентной ядерной энергетической системы с ЗЯТЦ и нового бизнеса, связанного с оказанием услуг ЗЯТЦ иностранным заказчикам.

При построении ядерной энергетики будущего доминирующая роль отводится реакторным установкам ВВЭР с постепенно увеличивающейся долей реакторов на быстрых нейтронах (БН) с натриевым теплоносителем, объединенных единым замкнутым топливным циклом на МОКС-топливе.

В такой системе реакторные установки БН

- вырабатывают электроэнергию в режиме базовой нагрузки (предполагается маневрирование мощности в ограниченном диапазоне 100 – 75 – 100%);
- используют для подпитки накопленный отвалный или регенерированный уран, производят плутоний, максимально пригодный для изготовления МОКС-топлива ВВЭР;
- выжигают долгоживущие высокоактивные отходы – младшие актиниды, выделенные при переработке ОЯТ БН и ВВЭР.

Реакторные установки ВВЭР

- вырабатывают электроэнергию в режиме с выполнением требований системного оператора по маневренности;
- используют МОКС-топливо взамен топлива из UO_2 ;
- поставляются за рубеж с услугой по возврату ОЯТ в Россию;
- выделенный из ОЯТ ВВЭР плутоний направляется на изготовление МОКС-топлива для РУ БН.

Предприятия ЯТЦ

- обеспечивают переработку ОЯТ ВВЭР и БН, выделение ядерных материалов для повторного использования;
- отвалный или регенерированный уран и выделенный из ОЯТ плутоний используют для изготовления МОКС-топлива;
- обеспечивают фракционирование РАО с целью последующей утилизации младших актинидов и снижения рисков распространения ЯМ, кондиционирование и захоронение РАО.

Россия имеет возможности организации двухкомпонентной ядерной энергетической системы с ЗЯТЦ и нового бизнеса, связанного с оказанием услуг в сфере ЗЯТЦ иностранным заказчикам.

Ключевые слова: двухкомпонентная ядерная энергетическая система, централизованный ЯТЦ, промышленный энергокомплекс Поставщика (Росатом).

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА РОССИИ В НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ

Сегодня Концерн эксплуатирует 36 энергоблоков АЭС с установленной мощностью 30,3 ГВт, при этом мощность блоков с реакторами ВВЭР составляет 17,9 ГВт, 11 ГВт – реакторов РБМК и 1,4 ГВт – реакторов на быстрых нейтронах. За рубежом работают энергоблоки российского дизайна общей мощностью около 28 ГВт.

За последние годы уровень нарушений на действующих АЭС не превышает уровень первой шкалы INES. Вводятся в эксплуатацию новые блоки поколения 3+.

В Энергетической стратегии России на период до 2035 г. предполагается сохранение доли атомной энергии в общей выработке электроэнергии в России на уровне 18%, при этом установленная мощность АЭС может составить около 38 ГВт.

С учетом выбывания из эксплуатации реакторов РБМК основной вклад в выработку электроэнергии должны составить энергоблоки с реакторами ВВЭР нового поколения.

СОЗДАНИЕ ДВУХКОМПОНЕНТОЙ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ – СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ

Условием развития ЯЭ является решение проблемы накопления ОЯТ с учетом поступления ОЯТ от зарубежных энергоблоков, а также повышение их экономической конкурентоспособности.

В Программе инновационного развития ГК «Росатом» предусмотрено начало создания двухкомпонентной ядерной энергетической системы на основе РУ ВВЭР и БН [1 – 4]. Правительство РФ утвердило в 2018 г. схему размещения энергоблоков АЭС до 2035 г. [5], в которой предусмотрено сооружение энергоблока с РУ БН-1200 на площадке Белоярской АЭС.

Ввод в эксплуатацию БН-800 и использование в нем МОКС-топлива с его последующей переработкой и фабрикацией нового МОКС-топлива наряду с перспективами сооружения энергоблоков с БН-1200 являются началом формирования двухкомпонентной ЯЭС.

Вводимые в эксплуатацию АЭС с ВВЭР с учетом продления срока их эксплуатации будут эксплуатироваться за пределами XXI в.

Технология ВВЭР (первого компонента двухкомпонентной ЯЭС) отработана и надежна, но требует улучшения экономических показателей. Действующие и проектируемые ВВЭР могут частично или полностью использовать в качестве топлива плутоний, нарабатываемый в быстрых реакторах, замещая при этом ^{235}U .

С пуском БН-800 и положительным опытом эксплуатации БН-600 созданы основы для дальнейшего развития технологии БН, а также отработки опытно-промышленных технологий замыкания ЯТЦ. На сегодня технология БН уже готова к промышленному освоению.

Основой второго компонента двухкомпонентной атомной энергетики могут стать усовершенствованные энергоблоки с РУ БН-1200М.

Следует отметить, что развитие технологий БН в двухкомпонентной ЯЭС оптимально сочетается с переработкой ОЯТ ВВЭР как источника плутония для БН. При этом энергоблок с РУ БН создает плутониевую топливную базу для РУ ВВЭР. Схема взаимного топливного обеспечения ВВЭР и БН показана на рис. 1.

Соотношение между БН и ВВЭР в такой системе определяется внедряемой стратегией развития атомной энергетики и ее сырьевого обеспечения. Схематично это соотношение показано на рис. 2.

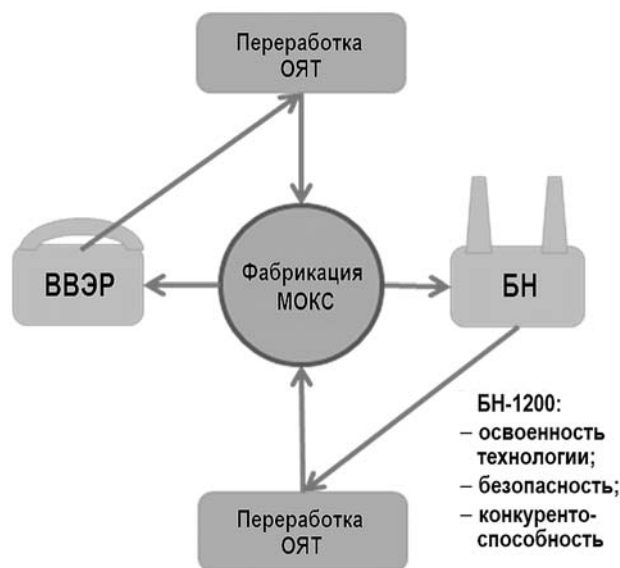


Рис. 1. Схема взаимного топливного обеспечения ВВЭР и БН

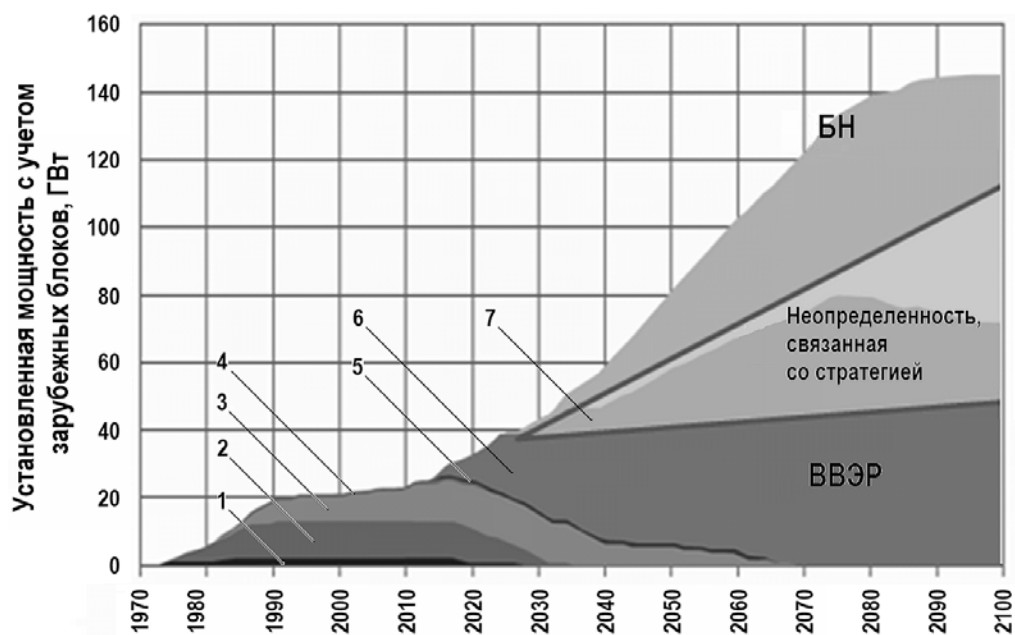


Рис. 2. Соотношение между БН и ВВЭР в двухкомпонентной ЯЭС: 1 – ВВЭР-440; 2 – РБМК; 3 – ВВЭР-1000; 4 – БН-600; 5 – БН-800; 6 – ВВЭР-ТОИ; 7 – БН-1200

Преимуществом двухкомпонентной ЯЭС является то, что она обеспечит экономическую системную эффективность ядерной энергетики на рынке за счет

- использования неограниченного потенциала отвального и природного урана для подпитки топливного цикла реакторов БН и ВВЭР при неминуемом дефиците урана и повышении его стоимости при однокомпонентном лаге;
- ликвидации запасов накопленного плутония;
- сокращения объемов накопленных ОЯТ в результате его переработки и рецикла ЯМ – снижение затрат АО «Концерн Росэнергоатом» по обязательствам по

- обращению с ОЯТ;
 - снижения активности РАО и их объемов за счет выжигания в БН долгоживущих РАО – младших актинидов;
 - наработки плутония в БН и его использования в виде МОКС-топлива в ВВЭР.
- Кроме того ЯЭС откроет новые возможности Госкорпорации «Росатом» на внешнем рынке за счет
- экспорта ВВЭР совместно с «лизингом» ядерного топлива;
 - коммерческого и научно-технического сотрудничества по технологиям БН;
 - дополнительного набора услуг по хранению, переработке ОЯТ зарубежных АЭС и последующего использования выделенных ядерных материалов в БН.

РОЛИ В ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Реакторы БН

- вырабатывают электроэнергию в режиме базовой нагрузки; предполагают маневрирование мощности в ограниченном диапазоне 100 – 75 – 100%;
- используют для подпитки накопленный отвалный или регенерированный уран, производят плутоний, максимально пригодный для изготовления МОКС-топлива ВВЭР;
- выжигают долгоживущие высокоактивные отходы – младшие актиниды, выделенные при переработке ОЯТ БН и ВВЭР.

Реакторы ВВЭР

- вырабатывают электроэнергию в режиме с выполнением требований системного оператора по маневренности;
- частично используют МОКС-топливо взамен топлива из UO_2 ;
- поставляются за рубеж с услугой по возврату ОЯТ в Россию;
- выделенный из ОЯТ ВВЭР плутоний поступает на изготовление МОКС-топлива для БН.

Предприятия ЯТЦ

- обеспечивают переработку ОЯТ ВВЭР и БН, выделение ядерных материалов для повторного использования;
- используют отвалный или регенерированный уран и выделенный из ОЯТ плутоний для изготовления МОКС-топлива;
- обеспечивают фракционирование РАО с целью последующей утилизации младших актинидов и снижения рисков распространения ЯМ, кондиционирование и захоронение РАО.

ОТРАБОТАННОСТЬ ТЕХНОЛОГИЙ БЫСТРЫХ НАТРИЕВЫХ РЕАКТОРОВ

Технологии БН в России отработаны в течение 60-ти лет (рис. 3).

Энергоблок БН-600 в течение 35-ти лет демонстрирует безаварийную работу. Средний КИУМ – 77,55%, максимально достигнутый КИУМ – 87,45 %. Расчетная вероятность тяжелой аварии (повреждения активной зоны) после выполнения мероприятий ПСЭ – $3,5 \cdot 10^{-5}$ в год.

БН-800 имеет проектный КИУМ 85%. Расчетная вероятность тяжелых аварий – $2 \cdot 10^{-6}$ в год.

Разработанный проект усовершенствованного энергоблока с РУ БН-1200М обеспечивает

- улучшение эксплуатационных и экономических показателей;
- исключение необходимости эвакуации населения при авариях;
- вероятность тяжелого повреждения активной зоны меньше $1 \cdot 10^{-6}$ на реактор в год;

– удержание поврежденных при тяжелой аварии элементов активной зоны внутри корпуса реактора.



Рис. 3. Отработанность технологий БН в России

ВЫБОР ТОПЛИВА ДЛЯ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ЯЭС

Использование ядерного топлива с высокими показателями эксплуатационной надежности, энерговыработкой и перспективами повышения достигнутых технико-экономических показателей является для Концерна как эксплуатирующей организации обязательным условием.

В настоящее время этим требованиям отвечают урановое оксидное и МОКС-топливо.

Себестоимость изготовления МОКС-топлива в сравнении со СНУП-топливом ниже, а доказанная референтная глубина выгорания и энерговыработка МОКС-топлива – выше.

В двухкомпонентной ЯЭС для снижения стоимости ЯТЦ целевым является использование унифицированного МОКС-топлива для обеих компонентов ЯЭС, когда производимое топливо для ВВЭР и БН требует использования однотипных оборудования и технологий. При этом технология должна быть наиболее простой и референтной.

Концерн участвует в разработке инновационного топлива, в том числе СНУП, и при доведении работ по СНУП-топливу до необходимого уровня готов применять его.

ВЫБОР ТИПА ОРГАНИЗАЦИИ ЯТЦ: ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫЙ ЯТЦ

Необходимо учитывать, что АЭС в России размещаются вблизи потребителей электроэнергии, где невозможно создание многочисленных производств по изготовлению и переработке ядерного топлива.

Необходимость переработки ОЯТ ВВЭР в распределенных по стране АЭС и из зарубежных источников, требует централизации производства по переработке с использованием уже существующих объектов ЯТЦ, таких как ФГУП «ПО «Маяк», АО «СХК» или ФГУП «ГХК». Естественно, что в таком случае переработка ОЯТ от реакторов БН должна быть организована в том же месте на централизованном производстве.

Такой подход соответствует всем требованиям нормативных документов в области использования атомной энергии по разделению функций организаций, эксплуатирующих АЭС и производства ЯТЦ.

При этом следует учитывать, что экономика крупномасштабного централизованного производства ЯТЦ лучше малопроизводительных производств в пристанционном ядерном топливном цикле.

Схема централизованного (разнесенного по отдельным площадкам) ЯТЦ в двухкомпонентной ЯЭС представлена на рис. 4.

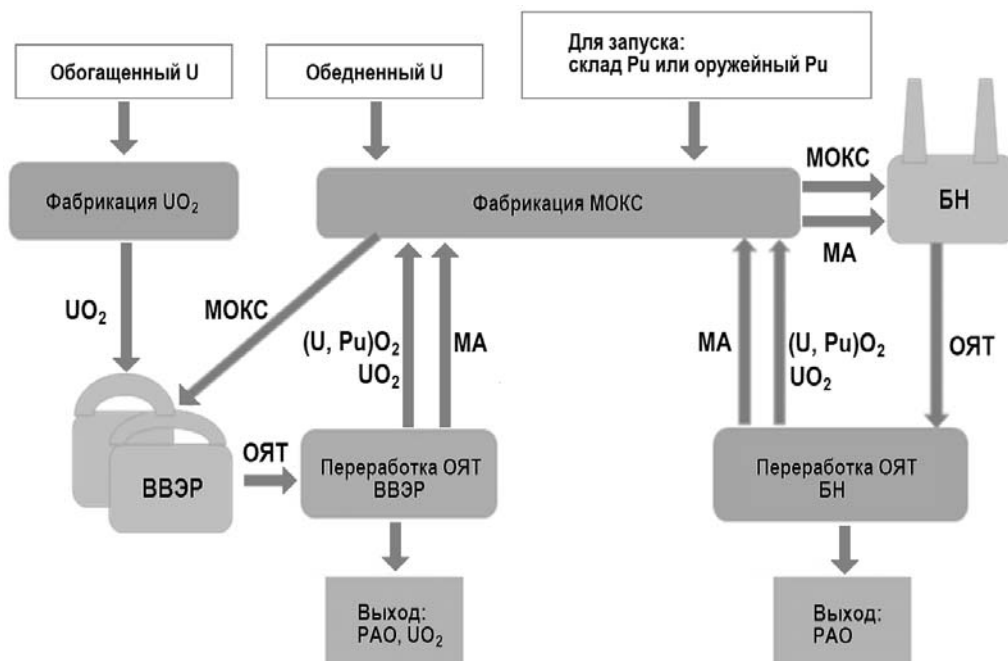


Рис. 4. Схема централизованного (разнесенного по отдельным площадкам) ЯТЦ в двухкомпонентной ЯЭС

ВАРИАНТ МЕЖДУНАРОДНОЙ КООПЕРАЦИИ: ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫЙ ЯТЦ В РОССИИ – АЭС ЗА РУБЕЖОМ

На рисунке 5 показано, как предполагается организовать работу в двухкомпонентной ЯЭС с замкнутым ядерным топливным циклом при участии зарубежных потребителей. Здесь показан случай оказания российскими предприятиями комплекса услуг по переработке ОЯТ от АЭС с реакторами ВВЭР, построенных Госкорпорацией «Росатом» за рубежом, и фабрикации свежего топлива с использованием регенерированных ядерных материалов.

Главный принцип заключается в том, что зарубежный Потребитель (АЭС) должен быть избавлен от необходимости решения проблем долговременного хранения ОЯТ или переработки ОЯТ в условиях ЗЯТЦ. Это прежде всего касается Потребителей, имеющих у себя ограниченное количество энергоблоков и не имеющих планов создания полномасштабной ядерной промышленности.

Зарубежному Потребителю предлагается только энергоблок с усовершенствованным реактором ВВЭР-1200, для обеспечения которого в течение всего жизненного цикла Поставщиком оказываются услуги по поставкам ядерного топлива и его последующему возврату в Россию. При этом централизованный замкнутый ЯТЦ, энергоблоки с РУ БН-1200 находятся в зоне ответственности Поставщика (Госкорпорации «Росатом») на территории России.

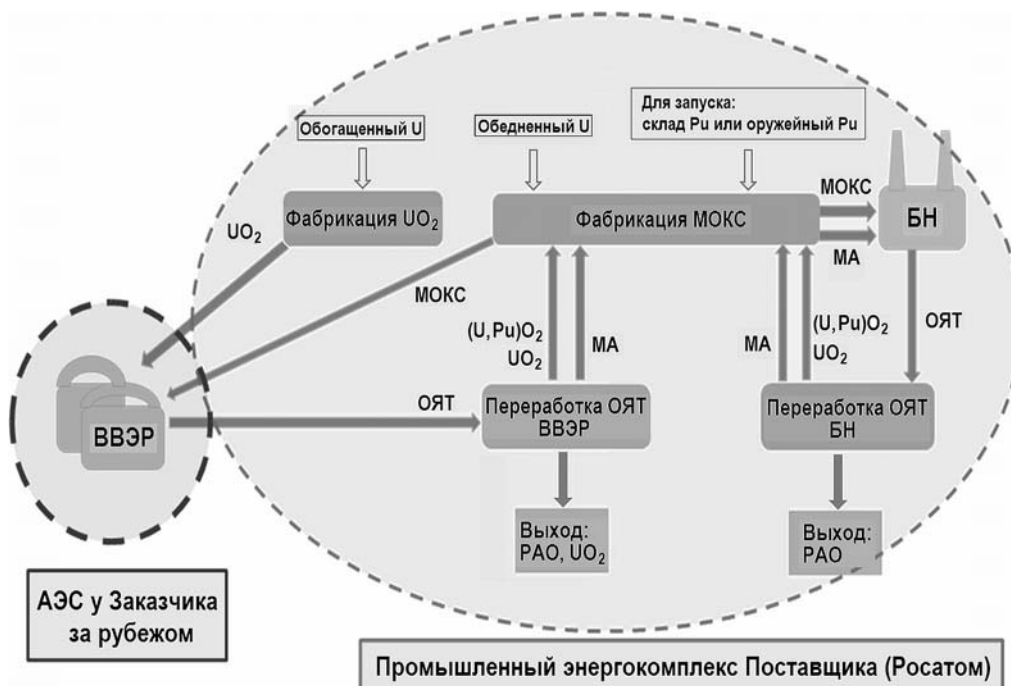


Рис. 5. Организация работы в двухкомпонентной ЯЭС с замкнутым ядерным топливным циклом при участии зарубежных потребителей

Возможны варианты организационных схем по обращению с образующимися продуктами при переработке ОЯТ, полученного от зарубежного потребителя:

- возврат кондиционированных РАО, оказание услуг по хранению выделенных ядерных материалов до принятия решения по ним;
- возврат кондиционированных РАО и части выделенных ядерных материалов в составе свежего ядерного топлива, хранение младших актинидов до принятия решения по ним;
- возврат кондиционированных РАО, оказание услуг по выжиганию младших актинидов в быстрых реакторах и частично их технологическому хранению, возврат эквивалентного количества выделенных ядерных материалов в составе свежего ядерного топлива;
- решение Поставщиком ядерного топлива всех вопросов самостоятельно в случае, если топливо предоставлялось Потребителю в лизинг.

ОЖИДАЕМЫЕ СРОКИ СОЗДАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ЯДЕРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Ожидаемые сроки создания двухкомпонентной ядерно-энергетической системы приведены на рис. 6.

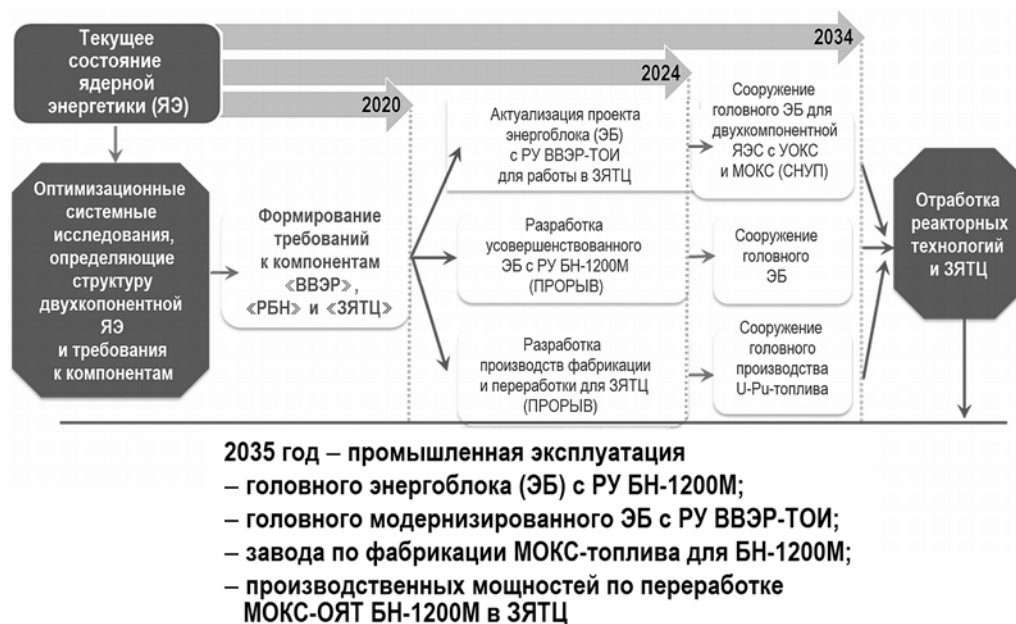


Рис. 6. Ожидаемые сроки создания двухкомпонентной ядерно-энергетической системы (УОКС – урановое оксидное топливо, СНУП – смешанное нитридное уран-плутониевое топливо)

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ТРЕНД В ВЫБОРЕ ПУТИ РАЗВИТИЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанная стратегия развития ядерной энергетики, в основном, совпадает с общемировыми тенденциями. Все указанные в работах [6 – 10] источники (уполномоченные представители КНР, Франции, Индии, Японии) предусматривают стратегическое развитие ядерной энергетики в своих странах в виде двухкомпонентной системы на основе реакторов типа PWR и натриевых быстрых реакторов. На основе анализа развернутых в США работ по созданию тестового натриевого быстрого реактора VTR [11] можно сделать вывод о возврате США к идеологии развития быстрых реакторов в составе национальной ядерной энергетики.

Роли в двухкомпонентной ядерной энергетической системе, отводимые тепловым и быстрым реакторам, совпадают с описанной выше стратегией развития ядерной энергетики России. Отличия в настоящее время касаются только Кореи и США, которые пока ориентируются на технологии использования металлического уран-плутоний-циркониевого топлива в быстрых реакторах.

На текущий момент Россия опережает остальные страны в готовности к созданию двухкомпонентной ядерной энергетической системы с замкнутым топливным циклом, поскольку имеет реальный опыт создания и эксплуатации энергоблоков БН-600 и БН-800, разработанный проект РУ БН-1200 и действующие производства по переработке облученного ядерного топлива. Используя этот приоритет, Россия имеет возможности создания и предложения на рынке нового бизнеса, связанного с оказанием услуг ЗЯТЦ иностранным заказчикам.

Литература

1. Шутиков А.В. Перспективы создания двухкомпонентной ядерной энергетической системы – взгляд российского заказчика. – АТОМЭКСПО 2017, круглый стол: «Инновационные технологические решения на жизненном цикле атомной энергетики как условие устойчивого развития» Москва, 19 июня 2017 г.
2. Петров А.Ю. Роль и место эксплуатирующей организации в реализации стратегии раз-

вития ядерной энергетики России. / XI Международная научно-техническая конференция «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» (МНТК-2018). М., 23 мая 2018г. Электронный ресурс: mntk.rosenergoatom.ru/mediafiles/u/files/2018/.../Petrov_A.Yu._MNTK_2018.pdf (дата доступа 12.05.2019).

3. Клинов Д.А., Гулевич А.В., Баканов М.В., Троянов В.М. Двухкомпонентная ядерная энергетика с замкнутым топливным циклом и роль реакторов на тепловых и быстрых нейтронах. / XI Международная научно-техническая конференция «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» (МНТК-2018). М., 23 мая 2018 г. Электронный ресурс: mntk.rosenergoatom.ru/mediafiles/u/files/2018.../Gulevich_A._MNTK_2018.pdf (дата доступа 12.05.2019).

4. Алексеев П.Н. и др. Двухкомпонентная ядерная энергетическая система с тепловыми и быстрыми реакторами в замкнутом ядерном топливном цикле / Под ред. академика РАН Пономарева-Степного Н.Н. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016. – 160 стр. ISBN 978-5-94836-434-6.

5. Распоряжение Правительства РФ от 9 июня 2017 г. № 1209-р об утверждении Генеральной схемы размещения объектов электроэнергетики до 2035 года. Электронный ресурс: static.government.ru/media/files/zzvuuhfq2f30JIK8AzKV5XrGIbW8ENGp.pdf (дата доступа 12.05.2019).

6. Zhang Dong Hui. Research, development and deployment of fast reactors and related fuel cycle in China. / Proc. of the Intern. Conf. «Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17)». Yekaterinburg, Russian Federation, 26-29 June 2017. STI / PUB / 1836 | 978-92-0-108618-1.

7. Pivet S. Status of the French Fast Reactor Programme. / In Proc. of the Intern. Conf. «Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17)». Yekaterinburg, Russian Federation, 26-29 June 2017. STI / PUB / 1836 | 978-92-0-108618-1.

8. Laugier F. Strategy for two-component NP fleet: PWR and SFR. / «Feedback experience on SFR REA-EDF Seminar». Beloyarsk NPP, April 25th, 2019.

9. Bhaduri A.K., Puthiyavinayagam P. Indian Fast Reactor Programme: Status and R&D Achievements. / Proc. of the Intern. Conf. «Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17)». Yekaterinburg, Russian Federation, 26-29 June 2017. STI / PUB / 1836 | 978-92-0-108618-1.

10. Sagayama Y. Current Status and Future View of the Fast Reactor Cycle Technology Development in Japan. / Proc. of the Intern. Conf. «Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17)». Yekaterinburg, Russian Federation, 26-29 June 2017 STI / PUB / 1836 | 978-92-0-108618-1.

11. Heidet F. Current status of the VTR core design. / Proc. of the Intern. Conf. RRFM 2019, March 24-28, 2019. Электронный ресурс: <https://www.euronuclear.org/meetings/rfrm2019/index.htm> (дата доступа 12.05.2019).

Поступила в редакцию 17.05.2019 г.

Авторы

Петров Андрей Ювенальевич, генеральный директор, к.т.н.

E-mail: petrov-au@rosenergoatom.ru

Шутиков Александр Викторович, первый заместитель генерального директора, к.т.н.

E-mail: shutikov-av@rosenergoatom.ru

Пономарев-Степной Николай Николаевич, научный консультант генерального директора, академик РАН, д-р техн. наук

E-mail: ponomarev-stepnoy-nn@rosenergoatom.ru

Беззубцев Валерий Сергеевич, заместитель генерального директора

E-mail: bezzubtsev-vs@rosenergoatom.ru

Баканов Михаил Васильевич, руководитель проектного офиса

E-mail: bakanov-mv@rosenergoatom.ru

Троянов Владимир Михайлович, главный технолог проектного офиса, д-р техн. наук

E-mail: troyanov-vm@rosenergoatom.ru

UDC 621.039.5

PROSPECTS OF CREATION OF THE DUAL COMPONENT NUCLEAR ENERGY SYSTEM

Petrov A.Yu., Shutikov A.V., Ponomarev-Stepnoy N.N., Bezzubtzev V.S., Bakanov M.V., Troyanov V.M.

JSC «Rosenergoatom»
25 Ferganskaya str., Moscow, 109507 Russia

ABSTRACT

Nuclear power of the future will be represented by a dual component energy system dominated by VVER reactors with gradually increasing proportion of sodium fast reactors SFR, joint with a singular closed MOX fuel nuclear cycle.

The components of such system play the following parts.

1. Reactors SFR:

- Base-load production of power; assumes power manoeuvrability within the limits of 100 – 75 – 100%;
- Utilizes accumulated depleted or reprocessed uranium for refuelling, produces plutonium most suitable for manufacturing MOX fuel for VVER;
- Burns up long-life high-level waste (minor actinides partitioned during reprocessing of spent nuclear fuel from SFR and VVER).

2. Reactors VVER:

- Produces power according to the system power manoeuvrability mode;
- Uses MOX fuel instead of UO₂;
- Exported with the option of returning SNF back to Russia;
- Plutonium extracted from VVER spent fuel is used for MOX fuel manufacturing for SFR.

3. Nuclear fuel cycle industries:

- Provide reprocessing of SNF from VVER and SFR, extracting of nuclear materials for recycling;
- Use depleted or reprocessed uranium and plutonium from spent nuclear fuel to manufacture MOX fuel;
- Provide partitioning of RAW in order to consequently utilize minor actinides and reduce the risk of proliferation of nuclear materials; conditioning and disposal of RAW.

This article presents several ways of establishing the dual component system with CNFC, as well as the new business approach to rendering CNFC services to foreign investors.

Key words: dual component nuclear energy system, centralized nuclear fuel cycle, industrial power complex from the supplier (Rosatom).

REFERENCES

1. Shutikov A.V. *The prospects of creation of two-component nuclear power system – a look of the Russian customer*. ATOMEKSPO 2017, Round table: «Innovative technology solutions on life cycle of nuclear power as a condition of sustainable development» Moscow, on June 19, 2017 (in Russian).
2. Petrov A.Yu. *A role and the place of operating organization in implementation of the strategy of development of nuclear power industry of Russia*. The XI International scientific and technical conference «Safety, Efficiency and Economy of Nuclear Power» (MNTK-2018). Moscow, on May 23, 2018. Available at: mntk.rosenergoatom.ru/mediafiles/u/files/2018/.../Petrov_A.Yu._MNTK_2018.pdf

(accessed May 12, 2019) (in Russian).

3. Klinov D.A., Gulevich A.V., Bakanov M.V., Troyanov V.M. *Two-component nuclear power with the closed fuel cycle and a role of reactors on thermal and fast neutrons*. The XI International scientific and technical conference «Safety, Efficiency and Economy of Nuclear Power» (MNTK-2018). Moscow, on May 23, 2018. Available at:

mntk.rosenergoatom.ru/mediafiles/u/files/2018.../Gulevich_A._MNTK_2018.pdf (accessed May 12, 2019) (in Russian).

4. Alekseev P.N., et al. *Two-component nuclear power system with thermal and fast reactors in the closed nuclear fuel cycle*. Ed. by the academician of RAS Ponomarev-Stepny N.N. Moscow. Tekhnosfera Publ., 2016, 160 p. ISBN 978-5-94836-434-6 (in Russian).

5. The order of the Government of the Russian Federation of June 9, 2017 No. 1209-r about the approval of the General scheme of placement of power generation facilities till 2035. Available at:

static.government.ru/media/files/zzvuuhfq2f30JIK8AzKV5XrGibW8ENGp.pdf (accessed May 12, 2019) (in Russian).

6. Zhang Dong Hui. *Research, development and deployment of fast reactors and related fuel cycle in China*. Proc. of the Intern. Conf. «Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17)». Yekaterinburg, Russian Federation, 26-29 June 2017. STI/PUB/1836 | 978-92-0-108618-1.

7. Pivet S. *Status of the French Fast Reactor Programme*. In Proc. of the Intern. Conf. «Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17)». Yekaterinburg, Russian Federation, 26-29 June 2017. STI/PUB/1836 | 978-92-0-108618-1.

8. Laugier F. *Strategy for two-component NP fleet: PWR and SFR*. «Feedback experience on SFR REA-EDF Seminar». Beloyarsk NPP, April 25th, 2019.

9. Bhaduri A.K., Puthiyavinayagam P. *Indian Fast Reactor Programme: Status and R&D Achievements*. Proc. of the Intern. Conf. «Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17)». Yekaterinburg, Russian Federation, 26-29 June 2017. STI/PUB/1836 | 978-92-0-108618-1.

10. Sagayama Y. *Current Status and Future View of the Fast Reactor Cycle Technology Development in Japan*. Proc. of the Intern. Conf. «Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17)». Yekaterinburg, Russian Federation, 26-29 June 2017 STI/PUB/1836 | 978-92-0-108618-1.

11. Heidet F. *Current status of the VTR core design*. Proc. of the Intern. Conf. RRFM 2019, March 24-28, 2019. Available at: <https://www.euronuclear.org/meetings/rrfm2019/index.htm> (accessed May 12, 2019).

Authors

Petrov Andrey Yuvenalyevich, CEO, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: petrov-au@rosenergoatom.ru

Shutikov Alexander Viktorovich, the First Deputy CEO, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: shutikov-av@rosenergoatom.ru

Ponomarev-Stepnoy Nikolay Nikolaevich, scientific consultant of the CEO, academician of RAS, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: ponomarev-stepnoy-nn@rosenergoatom.ru

Bezzubtsev Valery Sergeyeovich, Deputy CEO

E-mail: bezzubtsev-vs@rosenergoatom.ru

Bakanov Mikhail Vasilyevich, Head of Design Office

E-mail: bakanov-mv@rosenergoatom.ru

Troyanov Vladimir Mikhaylovich, Chief Technologist of Design Office, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: troyanov-vm@rosenergoatom.ru