

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ МЕЖДУНАРОДНОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦЕНТРА ПО ПРЕДОСТАВЛЕНИЮ УСЛУГ СТРАНАМ БЛИЖНЕГО ЗАРУБЕЖЬЯ

**В.М. Декусар, А.Ф. Егоров, А.Г. Калашников, В.В. Коробейников,  
В.Е. Коробицын, А.Л. Мосеев, П.А. Мосеев**  
*ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ» им. А.И.Лейпунского, г. Обнинск*

**Р**

Перед страной, только начинающей свою ядерную программу, стоит задача получить информацию о проблемах, сопровождающих все этапы ядерного топливного цикла. Четко определенная по срокам долгосрочная национальная программа атомной энергетики позволит определить требования к ЯТЦ и, соответственно, выявить необходимые в первую очередь компоненты ядерной энергетической системы. Не обладая опытом обращения с ядерными материалами, страны, впервые приступающие к развитию АЭ, вынуждены во многом полагаться на поставщика технологии. Использование странами-новичками практического опыта государств с развитой АЭ позволяет не только сократить существующий между ними технологический разрыв, но и уменьшить неопределенность оценок уровня стартовых затрат на развитие собственной ЯЭС. Гораздо сложнее стоит вопрос обращения с ОЯТ, объемы которого за время эксплуатации АЭС, скорее всего, накоплены существенные. Решение этого вопроса оказывает серьезное влияние как на экологическую оценку национального ядерного топливного цикла, так и на экономическую.

В статье описано расчетное моделирование работы международного ядерного топливного центра (МЯТЦ). В качестве потенциальных участников моделируемого центра были выбраны Россия, Украина, Армения и Белоруссия (страны СНГ). Для расчетного моделирования использовались программа энергетического планирования общей энергетики MESSAGE (разработка МАГАТЭ) и программное средство детального моделирования ЯТЦ CYCLE (разработка ГНЦ РФ-ФЭИ). Для анализа преимуществ, получаемых Россией и странами-участницами от создания МЯТЦ, были рассчитаны характеристики двух сценариев развития атомной энергетики России, Украины, республик Армения и Беларусь – независимого развития этих стран и совместного.

В результате исследований для выбранных сценариев установлено, что – запуск БР с использованием плутония, полученного при переработке топлива реакторов типа ВВЭР-1000, позволяет оптимизировать парк реакторов путем постепенной замены части тепловых реакторов на быстрые и, следовательно, экономить природный уран;

– совместное развитие АЭ стран-участниц МЯТЦ позволяет перерабатывать все наработанное облученное топливо, объем которого составит около 124 тыс. т. Это даст возможность избежать строительства хранилища, равного по вместимости двум хранилищам типа Юкка-Маунтин.

**Ключевые слова:** моделирование топливного цикла, легководные реакторы, тяжеловодные реакторы, реакторы на быстрых нейтронах, синергия, природный уран, оптимизация, мировая ядерная энергетика, топливные балансы.

### **ВВЕДЕНИЕ**

События в Фукусиме вновь заставляют задуматься о проблемах использования ядерной энергии. В первое время после аварии высказывалось опасение, что развитие атомной энергетики будет приостановлено. И действительно, ряд стран пересмотрели свои позиции, но в мире в целом данный тезис не получил серьезного распространения. Заявления о свертывании национальных мирных атомных программ сделали преимущественно страны, которые либо и так это планировали, либо еще не приступали к развитию атомной энергетики. Остальные страны, в которых доля ядерной генерации достаточно высока, не предполагают сворачивать свои программы развития мирного атома [1, 2].

Активное развитие атомной энергетики ведет не только к расширению круга стран, использующих АЭ, увеличению объемов поставляемой на рынок энергии [3, 4] и необходимости обеспечения атомной энергетики достаточными топливными ресурсами, но и к изменению ее глобальной инфраструктуры при одновременном совершенствовании принципов ее использования на уровне межгосударственных отношений. Крупномасштабная ядерная энергетика уже не может развиваться изолированно. В отдельных регионах требуется скоординированная многонациональная деятельность, связанная с широкомасштабными потоками ядерных материалов (от природного урана до ОЯТ) при соблюдении режимов нераспространения. Можно сказать, что глобальное развитие ядерной системы будет определяться решением проблемы безопасного обращения с ядерными материалами.

В целях повышения устойчивости ядерного топливного цикла к рискам распространения в последние годы было предложено ряд инициатив, направленных на интернационализацию наиболее чувствительных этапов [5, 6]. Основная цель – поставить ЯТЦ под международный контроль таким образом, чтобы исключить возможность скрытной наработки оружейных материалов, обеспечивая при этом заинтересованные страны гарантированными поставками ядерного топлива и других услуг в области ЯТЦ.

Таким образом, именно переход к международному сотрудничеству в области развития ядерных технологий, обмена знаниями и новыми технологиями позволит решать вопросы энергетической безопасности на основе рационального потребления природных ресурсов, экономической и экологической привлекательности и с соблюдением всех международных норм безопасности и нераспространения.

### **АНАЛИЗ ПОТРЕБНОСТЕЙ СТРАН В УСЛУГАХ ЯТЦ**

Для анализа потребностей в услугах ядерного топливного цикла можно выделить три крупные группы государств: страны, только начинающие развивать собственную ядерную программу; страны, имеющие опыт эксплуатации АЭС, но не обладающие технологиями для всех этапов топливного цикла, и страны, имеющие опыт работы со всеми этапами ядерного топливного цикла.

Перед страной, только начинающей ядерную программу, в первую очередь, стоит задача получить информацию о проблемах, сопровождающих все этапы ядерного цикла. Четко определенная долгосрочная национальная программа по атомной энергетике позволит определить требования к ЯТЦ и, соответственно, выявить первоочередные компоненты ядерной энергетической системы.

Не обладая опытом обращения с ядерными материалами, страны, впервые приступающие к развитию атомной энергетики, вынуждены во многом полагаться на поставщика технологии. Использование странами-новичками практического опыта государств с

развитой АЭ позволяет не только сократить существующий между ними разрыв, но и уменьшить неопределенность оценок уровня стартовых затрат на развитие собственной ядерно-энергетической системы (ЯЭС).

Существующий международный рынок услуг в начальной части топливного цикла позволяет вступить в ядерную программу, избегая строительства собственных заводов по производству ядерного топлива, либо благодаря самостоятельному выходу на мировой рынок, либо обращаясь в международные ядерные топливные центры (МЯТЦ), поставляющие ядерное топливо под гарантии МАГАТЭ [7]. Кооперация страны-новичка и страны-разработчика (владельца) ядерной технологии дает возможность развивать свою национальную программу, используя уже существующие коммерческие технологии, что экономит как временные, так и финансовые ресурсы, позволяя при этом все-сторонне использовать опыт, накопленный страной, реализующей коммерческий продукт, в процессе отработки технологий на своей территории. С другой стороны, под таким сотрудничеством чаще всего подразумеваются межправительственные соглашения, которые являются серьезной гарантией поставок ядерного топлива и услуг ЯТЦ.

Гораздо сложнее стоит проблема обращения с ОЯТ – за время эксплуатации АЭС накапливаются его существенные объемы. Решение этого вопроса оказывает серьезное влияние как на экологическую оценку национального ядерного топливного цикла, так и на экономическую.

Для примера, инвестиции в строительство завода по переработке и соответствующей инфраструктуре в США (штат Миссисипи) в среднесрочной перспективе (25 лет) оцениваются в 15 млрд US\$ [8]. Такая возможность рассматривалась 26 августа 2013 г. на заседании в Комитете по экономическому развитию Сената штата, Институт энергетике Миссисипи (МЕИ).

На сегодняшний день заводы по переработке ОЯТ действуют лишь в четырех странах мира – России, Франции, Великобритании и Японии. Единственная страна в мире, которая оказывает услуги по переработке ОЯТ, – Франция, причем отходы переработки, согласно французскому законодательству, возвращаются в страну назначения. Россия осуществляет вывоз на свою территорию произведенного в СССР (России) ядерного топлива реакторов, построенных за рубежом по российским проектам. Программой возврата такого топлива сегодня охвачены 14 стран – Белоруссия, Болгария, Венгрия, Вьетнам, Германия, Казахстан, Латвия, Ливия, Польша, Румыния, Сербия, Узбекистан, Украина и Чехия.

Таким образом, можно сказать, что решение проблемы конечной стадии ЯТЦ в наибольшей степени требует кооперации усилий различных стран. Совместная деятельность в этом направлении для стран-потребителей позволяет использовать уже разработанные технологии переработки, избегая стадии освоения и строительства собственного завода, а для стран-разработчиков технологии дает возможность ее экономически выгодного использования, что позволит расширять исследования в направлении развития этих технологий. Кооперация поставщиков и потребителей технологий переработки сможет сформировать взаимовыгодное сотрудничество в рамках Регионального международного ядерного топливного центра (РМЯТЦ).

### **ПРИНЦИПЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РМЯТЦ**

Основной задачей Регионального международного ядерного топливного центра является обеспечение гарантированного доступа ко всем составным элементам и услугам, предоставляемым Центром, включая доступ к мощностям по обогащению урана для изготовления топлива (порошков, таблеток, тепловыделяющих сборок) для нужд атомной энергетике, хранилищу ядерного топлива, заводу по переработке ОЯТ.

В наиболее общей форме можно выделить следующие услуги, которые мог бы предоставлять Центр:

- подготовка специалистов в области АЭ;
- обогащение урана;
- производство ядерного топлива;
- лизинг ядерного топлива;
- переработка ОЯТ;
- хранение «рециклированного» урана и плутония;
- окончательное захоронение РАО (в «централизованном» хранилище).

Вариант схемы реализации такого Центра представлен на рис. 1.



Рис. 1. Схема реализации РМЯТЦ

Безусловно, нельзя говорить о том, что все услуги Центра в полной мере выгодны абсолютно всем странам. Так, например, лизинг ядерного топлива для стран с уже развитой атомной отраслью не может рассматриваться как приоритетный, так как он тормозит развитие собственной инфраструктуры атомной энергетики но, с другой стороны, гарантированные поставки топлива могут снять напряжение в вопросе топливного обеспечения АЭС. С другой стороны, при строительстве АЭС страна-получатель может активно задействовать собственные промышленные возможности, взяв на себя изготовление значительной части оборудования. Таким образом, в зависимости от своих потребностей, перспектив развития и имеющейся инфраструктуры государство может выбирать наиболее интересные в технологическом и экономическом плане услуги Центра.

Пилотным проектом в реализации таких центров является Международный центр по обогащению урана (ОАО «МЦОУ»), созданный в России в г. Ангарске [9].

Основные принципы функционирования Центра:

- недискриминационные условия для членства в Центре;
- функционирование под гарантиями МАГАТЭ;
- политический и экономический эффекты участия в Центре превосходит потери от отказа в развитии собственных ядерно-чувствительных технологий и предприятий;
- возможность работы на рынке по реализации топливных услуг;
- прозрачность и рентабельность коммерческой деятельности.

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РМЯТЦ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНЫХ КОДОВ MESSAGE И CYCLE**

В качестве потенциальных участников Центра были выбраны страны СНГ:

Россия, Украина, Армения и Белоруссия.

Россия, обладая значительным опытом в освоении реакторных технологий, технологий топливного цикла и эксплуатации АЭС, имеет развитую инфраструктуру ядерного топливного цикла, включая предприятия по добыче, конверсии и обогащению природного урана, заводы по изготовлению свежего топлива, предприятия по сооружению АЭС и изготовлению оборудования для АЭС и реакторов, завод РТ-1 по переработке ОЯТ, сухие и мокрые хранилища ОЯТ, а также мощный научный и промышленный потенциал в разработке инновационных энергоэффективных и безопасных технологий. В рассматриваемой модели Россия выступает в роли потенциального организатора РМЯТЦ.

Украину и Армению можно отнести к группе стран-пользователей ядерных технологий. В настоящее время на Украине эксплуатируются легководные реакторы российского дизайна (ВВЭР-440, ВВЭР-1000). На территории Украины расположено крупнейшее в Европе предприятие по добыче и переработке урановой руды. Украина планирует в 2015 г. ввести в эксплуатацию завод по производству ядерного топлива мощностью 400 тонн урана в год для реакторов типа ВВЭР-1000. Основная масса образовавшегося ОЯТ всех АЭС Украины находится на стадии технологического хранения (в бассейнах выдержки и сухом хранилище). На Запорожской АЭС для безопасного хранения ОЯТ введено в эксплуатацию пристанционное хранилище ОЯТ ВВЭР-1000 на основе технологии сухого контейнерного хранения. Вопрос дальнейшего обращения с ОТВС после хранения не определен. Для обращения с ОЯТ Ровенской, Хмельницкой и Южно-Украинской АЭС реализована схема в рамках контрактов с Россией, согласно которой ОЯТ после выдержки в бассейнах направляется в Россию на переработку с возвратом остеклованных ВАО не позднее, чем через 20 лет после приема ОЯТ на переработку. В настоящее время на заводе РТ-1 ФГУП «Маяк» происходит переработка только ОЯТ ВВЭР-440, а ОЯТ ВВЭР-1000 находится на технологической выдержке ввиду отсутствия перерабатывающих мощностей (завод РТ-2).

18 октября 2011 г. Верховная Рада Украины приняла за основу законопроект «Об обращении с отработавшим ядерным топливом», который предусматривает строительство централизованного хранилища ОЯТ атомных станций Украины. Хранилище станет частью единого комплекса по обращению с ОЯТ ГСП «Чернобыльская АЭС», и на нем будет применена технология поверхностного «сухого» хранения контейнерного типа. Общая вместимость централизованного хранилища отработавшего ядерного топлива (ЦХОЯТ) будет составлять 16529 отработавших тепловыделяющих сборок реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 [10]. При моделировании анализировался сценарий «отложенное решение», где данное хранилище не моделируется.

В Армении работает единственная в регионе атомная станция – Армянская АЭС, состоящая из двух энергоблоков с российским реактором ВВЭР-440 первого поколения (первый блок в настоящее время остановлен). Армения использует открытый ядерный топливный цикл. Все ядерное топливо для Армянской АЭС поставляется Россией. Отработавшее ядерное топливо хранится три года «мокрым» методом в бассейне, а затем поступает в сухое хранилище, где содержится в течение 50-ти лет.

16 февраля 2012 г. в Ереване министр энергетики и природных ресурсов Армении Армен Мовсисян сообщил журналистам, что «новый энергоблок АЭС в Армении планируется ввести в эксплуатацию в 2019 – 2020 гг.» [11]. В сценариях заложен ввод в 2017 г. нового улучшенного блока ВВЭР (УВВЭР) в эксплуатацию.

Республика Беларусь является примером страны-новичка, которая намерена развивать АЭ. В Республике Беларусь планируется построить двухблочную АЭС российского дизайна (АЭС-2006) с вводом в эксплуатацию первого энергоблока в 2016 г. и второго – в 2018 г.

Предполагается, что Россия будет поставлять топливо для Белорусской АЭС в течение всего времени ее эксплуатации и забирать отработавшее ядерное топливо на переработку.

Для расчетного моделирования использовались программа MESSAGE[12] и код CYCLE[13].

Для анализа преимуществ, получаемых Россией и странами-участницами от создания РМЯТЦ, с помощью ПК CYCLE были рассчитаны характеристики двух сценариев развития атомной энергетики России, Украины, республик Армения и Беларусь – независимого развития этих стран и совместного.

В первом сценарии рассматривался вариант, когда ОЯТ, нарабатываемое в реакторах типа ВВЭР-1000 указанных стран за исключением России, направляется в хранилища, т. е. в этих странах реализуется открытый ТЦ. При этом предполагается, что обогащение урана осуществляется на российских разделительных мощностях. Изготовление топлива также осуществляется в России за исключением АЭС Украины, топливо для которых в дальнейшем будет изготавливаться по российской технологии на местном заводе после его пуска.

В соответствии с рассматриваемым сценарием в России осуществляется переработка ОЯТ реакторов типа ВВЭР, использование выделенного плутония для запуска и подпитки БР, постепенная замена тепловых реакторов на быстрые и замыкание ТЦ с помощью быстрых реакторов.

Во втором сценарии рассматривался вариант совместного развития АЭ указанных стран с использованием РМЯТЦ. В этом варианте ОЯТ реакторов типа ВВЭР-1000 Украины, Армении и Беларуси перерабатывается в рамках РМЯТЦ с выделением плутония и МА. Это позволяет сильно снизить требуемые объемы хранилищ ОЯТ и, используя выделенный плутоний, ввести дополнительное количество БР по сравнению с количеством БР, вводимых в результате переработки только российского ОЯТ.

При этом в обоих сценариях во всех странах, кроме России, обеспечение уровня мощности АЭ стран-участниц в соответствии с предполагаемыми национальными стратегиями развития АЭ до 2100 г. осуществляется тепловыми реакторами типа ВВЭР-1000. В России ввод тепловых реакторов прекращается в 2050 г.

В обоих сценариях предполагается, что ОЯТ реакторов типа ВВЭР-440 перерабатывается на заводе РТ-1. Исключение составляет ОЯТ армянских реакторов ВВЭР-440, которое предполагается хранить в «сухом» хранилище. Также в обоих сценариях не предполагается переработка ОЯТ российских и украинских реакторов РБМК, которое предполагается разместить в проектируемых «сухих» хранилищах России и Украины.

#### **Сценарий развития АЭ России**

Предполагалось, что в дополнение к существующему парку реакторов ВВЭР-440, ВВЭР-1000 и РБМК вводятся реакторы ВВЭР-1000 нового поколения со сроком службы 60 лет. Кроме того с 2018 г. начинается ввод РУ БН-1200 [14, 15] мощностью 1200 МВт(э) по следующему графику:

- 2018 – 2035 гг. – малая серия блоков БН-1200, состоящая из девяти блоков, причем первый блок вводится в 2018 г., затем, начиная с 2021 г., вводится еще восемь блоков (по одному блоку в два года);

- с 2035 по 2040 гг. – коммерческие БН-1200 вводятся ежегодно;

- с 2041 по 2050 гг. – коммерческие БН-1200 вводятся по два блока в год.

Всего с 2018 по 2050 гг. вводится 34 РУ с реакторами БН-1200.

Количество новых РУ с реакторами ВВЭР-1000 нового поколения определялось из условия, чтобы темп роста установленной мощности АЭС с реакторами всех типов (работающих в настоящее время и постепенно выводимых из действия ВВЭР-440, ВВЭР-1000, РБМК, ВВЭР-1000 нового поколения и реакторов БН-1200) соответствовал утвержденной энергетической стратегии развития до 2030 г. [16], а в период с 2030 по 2050 гг. суммарная мощность АЭС увеличивалась с таким же темпом, как в период с 2008 по 2030 гг. При этом количество введенных реакторов ВВЭР-1000 нового поколения составит 41 в 2030 г. и 58 – в 2050 г.

Суммарная мощность АЭ России в рассматриваемом сценарии достигает 56,6 ГВт к 2030 г., 100 ГВт к 2050 г. и 184 ГВт к 2100 г. При этом вклад БР к 2050 г. достигает 40%. Доля мощности АЭС с быстрыми реакторами в общей мощности АЭС составит в 2050 г. 40%.

После 2050 г. ввод новых реакторов на тепловых нейтронах прекращается, а ввод быстрых реакторов производится с максимально возможным темпом, при котором переработка ОЯТ работающих тепловых и быстрых реакторов производится «с колес», т.е. без задержки, а практически весь выделяемый плутоний идет на подпитку работающих БР и запуск новых.

Предполагалось, что ОЯТ реакторов ВВЭР-440 перерабатывается на заводе РТ-1. Максимальная производительность завода РТ-1 по плутонию: до 2020 г. – 1 т/г.; с 2021 г. – 4 т/г. (как результат предполагаемой реконструкции).

Предполагается, что начиная с 2016 г. и до закрытия завода в 2033 г., избыточная мощность завода РТ-1 используется для переработки ОЯТ реакторов ВВЭР-1000.

Переработка топлива реакторов РБМК не предполагается.

Пуск завода по переработке ОЯТ быстрых реакторов производится в 2035 г. Производительность завода составит

- с 2035 по 2044 гг. – 29 т Рц/г.;
- с 2045 по 2054 гг. – 85 т Рц/г.

Далее предполагалось, что начиная с 2055 г. производительность завода увеличивается так, чтобы он мог перерабатывать ОЯТ БР, поступающее из бассейнов выдержки без задержки. Требуемая при этом производительность завода по плутонию со временем увеличивается и достигает 300 т Рц/г. в 2110 г.

*Потребление природного урана.* В базовом сценарии потребление природного урана заканчивается в 2110 г. и составляет к этому времени 840 тыс. т. Запасы урана с учетом их дальнейшей разведки оцениваются примерно в 1,64 млн. т [17], что в два раза превышает количество урана, требующееся для работы российских АЭС. Таким образом, при реализации базового сценария остается значительное количество урана для изготовления топлива для поставляемых на экспорт тепловых реакторов российского дизайна.

*Потребность в разделительном производстве.* Для обеспечения функционирования атомной энергетики России в соответствии с предполагаемым сценарием требуется

- к 2020 г. 5 млн. ЕРР/г.;
- в 2030 г. 8,3 млн. ЕРР/г.;
- в 2050 г. 10 млн. ЕРР/г.

Действующие мощности обогатительных комбинатов составляют в 20 – 25 млн. ЕРР. Таким образом, в России имеет место наличие значительных мощностей, избыточных для внутреннего потребления, что требует максимальной поддержки экспорта ЕРР.

*Наработка отвального урана.* Накопление обедненного урана за весь срок производства топлива для введенных до 2050 г. реакторов отечественных АЭС составит около 720 тыс. т.

*Накопление облученного ядерного топлива (ОЯТ). Заполнение действующих и проектируемых хранилищ ОЯТ.* Сравнение объемов наработки ОЯТ и объемов хранилищ показывает, что имеющийся и планируемый объем хранилищ ОЯТ реакторов ВВЭР-1000 намного превосходит потребности размещения ОЯТ российских реакторов. Однако следует иметь в виду, что существующее хранилище на ГХК уже содержит некоторую часть топлива зарубежных реакторов ВВЭР-1000. Кроме того, следует принять во внимание, что к 2050 г. будет дополнительно накоплено 23 тыс. т ОЯТ на зарубежных АЭС российского дизайна с учетом только действующих АЭС и АЭС, на строительство которых уже заключены контракты. Возврат этого ОЯТ обязателен в страну происхождения этого топлива. Проблема долговременного хранения ОЯТ реакторов РБМК решается за счет

ввода сухого хранилища на ГХК.

*Накопление плутония и МА.* Накопления плутония на складе не происходит, т. к. он расходуется на изготовление топлива для вновь вводимых и работающих быстрых реакторов. В отличие от плутония младшие актиниды (Np, Am и Cm) после их выделения при переработке ОЯТ в рассматриваемом сценарии не используются для изготовления топлива БР, поэтому они накапливаются на складах.

#### **Основные характеристики развития АЭ стран-участниц РМЯТЦ**

Для анализа сценариев развития АЭ рассмотрим основные характеристики ядерных топливных циклов России, Украины, Армении и Белоруссии.

*Суммарная мощность энергоблоков АЭС стран-участниц РМЯТЦ.* Суммарная мощность АЭС потенциальных стран-участниц РМЯТЦ в соответствии с рассмотренным сценарием развития АЭ составит 87 ГВт(э) к 2030 г., 137 ГВт(э) к 2050 г., 240 ГВт(э) к 2100 г. В 2100 г. большую часть суммарной мощности (78%) будут обеспечивать АЭС с российскими быстрыми реакторами.

*Потребление природного урана реакторами стран-участниц РМЯТЦ.* Полное потребление природного урана тепловыми реакторами стран-участниц РМЯТЦ при развитии их АЭ по отдельному сценарию, при условии, что до 2100 г. БР вводит только Россия, составит 1,70 млн. т. Эта цифра на 140 тыс. т меньше суммарного прогнозируемого запаса урана в России и Украине (1,84 млн. т). При развитии АЭ Украины по низкому сценарию, при котором мощность ее АЭС с 2030 г. не будет увеличиваться и сохранится до 2100 г. на уровне 20 ГВт(э), потребление урана в Украине будет меньше на 400 тыс. т, и суммарное потребление природного урана АЭС рассматриваемых стран-участниц РМЯТЦ составит 1,30 млн.т.

*Потребность в разделительном производстве стран-участниц РМЯТЦ.* Требуемая мощность разделительных производств достигает максимального значения в районе 2070 г. и составляет около 18 млн. ЕРР/г., что не превосходит уже действующие мощности обогатительных комбинатов России (20 – 25 млн. ЕРР/г.).

*Наработка отвального урана стран-участниц РМЯТЦ.* Суммарная наработка отвального урана при производстве топлива для реакторов стран-участниц РМЯТЦ от начала производства до 2100 г. составит 1,32 млн. т. С учетом обеспечения топливом тепловых реакторов до конца их срока службы эта цифра увеличится до 1,61 млн. т.

*Накопление ОЯТ реакторов стран-участниц РМЯТЦ.* Суммарное накопление ОЯТ реакторов стран-участниц РМЯТЦ к 2100 г. в случае отдельного развития их АЭ составит 97,7 тыс. т. ОЯТ российских реакторов ВВЭР-440, ВВЭР-1000 и БН-1200 в эту величину не входят, так как они перерабатываются на заводах РТ-1, ОДЦ, РТ-2 и ПЗ для реакторов БН. Считается, что ОЯТ украинских реакторов ВВЭР-440 тоже перерабатывается на заводе РТ-1 и также не входит в эту величину. Из реакторов ВВЭР-440 в нее входит только ОЯТ армянских реакторов такого типа, составляющее около 0,5 тыс. т, которое длительное время будут храниться в «сухом» хранилище на территории республики Армения.

Суммарное количество ОЯТ российских и украинских реакторов РБМК составит 19,3 тыс. т и будет размещено в «сухих» хранилищах России и Украины. Оставшиеся 77,9 тыс. т составляют ОЯТ реакторов ВВЭР-1000. Из этого количества 3,7 тыс. т предполагается хранить в «сухом» хранилище Запорожской АЭС. Как сказано ранее, условно также будем считать, что около 2 тыс. т ОЯТ украинских ВВЭР-1000 уже перевезено в хранилище на ГХК. Таким образом, неразмещенными к 2100 г. остаются около 72,2 тыс. т ОЯТ украинских, армянского и белорусских реакторов типа ВВЭР-1000.

После 2100 г. и до конца срока службы реакторов будет наработано ОЯТ еще 46,5 тыс. т украинскими, 3,6 тыс. т белорусскими и 1,5 тыс. т армянским реакторами.

Даже при развитии АЭ Украины по низкому сценарию, когда суммарная мощность АЭ составит в 2030 г. 20 ГВт(э) и останется на этом уровне до 2100 г., накопление ОЯТ в указанных трех странах составит около 70 тыс. т.

#### Расчетные исследования по коду MESSAGE

MESSAGE использовался для построения оптимальной стратегии использования реакторных технологий с учетом заданных пользователем ограничений [18]. В рассматриваемой модели такими ограничениями являются заданный сценарий развития АЭ, ресурсы урана и стоимость их извлечения, доступные мощности предприятий ЯТЦ, в том числе и перерабатывающих заводов, стоимости технологий реакторов и их ЯТЦ, наличие плутония для пуска быстрых реакторов.

#### Расчетные исследования по коду CYCLE.

##### Сценарий совместного развития АЭ стран-участниц РМЯТЦ

Основное отличие сценария совместного развития заключается в том, что ОЯТ стран-участниц не накапливается в хранилищах, а идет на перерабатывающие заводы РМЯТЦ, что позволяет кардинально сократить требующиеся объемы хранилищ. Кроме того выделенный при этом плутоний используется для ввода БР, что позволяет сократить его количество и получить дополнительные мощности на АЭС.

*Суммарная мощность энергоблоков АЭС стран-участниц РМЯТЦ.* В модели совместного развития возможно дополнительное введение быстрых реакторов (см. на рис. 2 «добавочная мощность»), которое начинается в 2036 г. Электрическая мощность АЭС с этими реакторами составит 32 ГВт к 2050 г. и 146 ГВт – к 2100 г., что позволит увеличить мощность АЭС к 2100 г. на 60 %. При этом дополнительная выработка электроэнергии составит 2,4 тыс. ТВт·ч к 2050 г. и 34 тыс. ТВт·ч к 2100 г. (рис. 2).

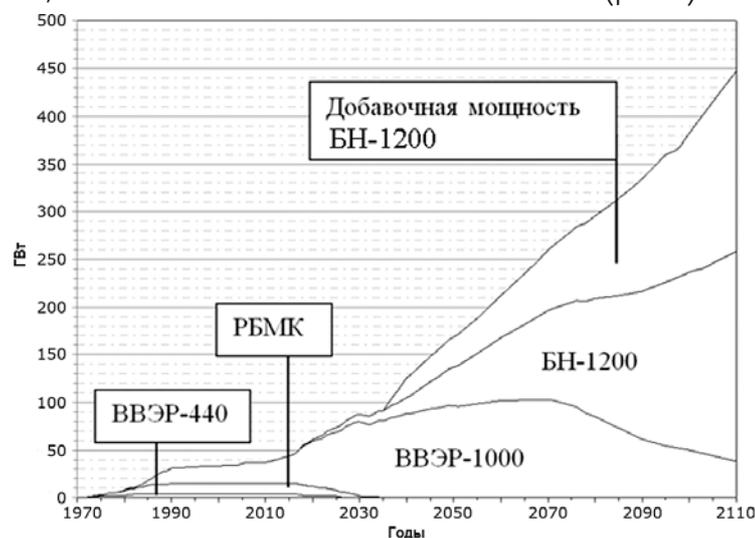


Рис. 2. Мощность реакторов АЭС стран-участниц

Следует отметить, что эти быстрые реакторы или часть их могут быть использованы для оптимизации реакторного парка стран-участниц РМЯТЦ путем постепенной замены тепловых реакторов на быстрые, что в свою очередь позволит решить проблему экономии природного урана. Кроме того, часть БР может быть использована для поставки в другие страны или, в случае необходимости, для увеличения производства электроэнергии в странах-участницах РМЯТЦ по сравнению с теми количествами, которые определены сценариями развития АЭ, описанными выше.

*Потребление природного урана, работа разделения, наработка отвалного урана.* Поскольку в рассматриваемой модели совместного развития АЭ стран-участниц

РМЯТЦ предполагалось, что сроки ввода, количества и типы тепловых реакторов стран-участниц остаются такими же, как в модели раздельного развития, то данные характеристики, просуммированные по странам-участницам, остаются прежними.

*Накопление ОЯТ.* Максимальное значение накопления ОЯТ в сценарии совместного развития достигается в 2023 г. перед пуском завода РТ-2 и составляет около 28 тыс. т. При этом вклад в ОЯТ реакторов ВВЭР-1000 составляет примерно 12 тыс. т. Остальное составляет ОЯТ российских и украинских реакторов РБМК и армянских реакторов ВВЭР-440, размещаемое в «сухих» хранилищах.

Как показано на рис. 3, после 2030 г. ОЯТ ВВЭР-1000 перерабатывается практически без задержки, быстрые реакторы дают небольшой вклад, который после 2040 г. практически исчезает. В результате остается только ОЯТ реакторов РБМК и армянских реакторов ВВЭР-440, которые составляют в сумме около 19,8 тыс. т и размещаются в «сухих» хранилищах.

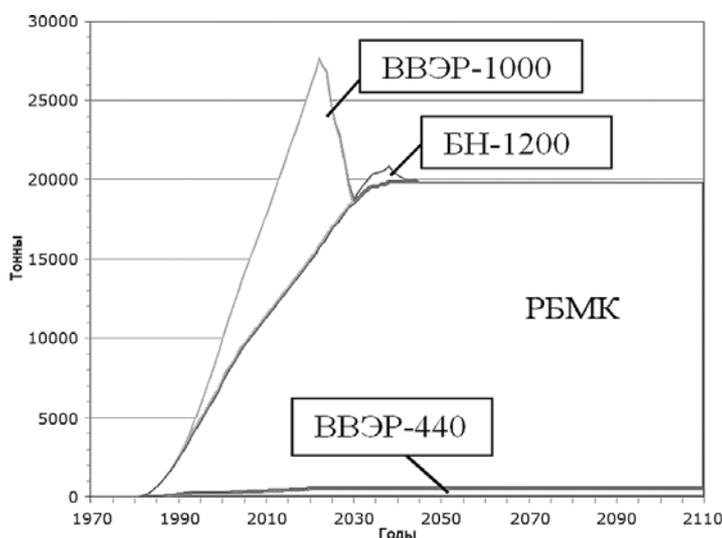


Рис. 3. Накопление ОЯТ в хранилищах в сценарии совместного развития АЭ

*Накопление плутония и МА на складах.* Максимальное количество плутония на складе (около 150 т) достигается в 2035 г., т.е. перед началом ввода коммерческих БР. До этого года ввод БР ограничен опытной серией. Вскоре после этого количество плутония на складе достигает величины, близкой к минимальному запасу (около 50 т) и поддерживается примерно на этом уровне далее. К 2110 г. на складах накапливается 106 т Np, 337 т Am и 14 т Cm.

### АНАЛИЗ ПРЕИМУЩЕСТВ УЧАСТИЯ В РМЯТЦ

Приведенные данные позволяют сделать следующие выводы о преимуществах совместного сценария развития РМЯТЦ.

– С учетом работы тепловых реакторов после 2100 г. до выработки ими срока службы полное потребление природного урана составит 1,7 млн. т, что на 140 тыс. т меньше суммарного прогнозируемого запаса урана в России и Украине. Следовательно, с учетом других международных обязательств России по обеспечению топливом реакторов российского дизайна возникает необходимость экономии природного урана.

– Запуск БР с использованием плутония, полученного при переработке топлива реакторов типа ВВЭР-1000, позволяет использовать их для оптимизации парка реакторов путем постепенной замены части тепловых реакторов на быстрые и, следовательно, экономить природный уран.

– Для переработки ОЯТ реакторов типа ВВЭР-1000 в сценарии совместного развития АЭ

стран-участниц РМЯТЦ, в котором кроме ОЯТ российских реакторов этого типа перерабатывается также облученное топливо украинских, белорусских и армянского реакторов, требуется увеличение производительности перерабатывающего завода примерно на 1000 т/год. При этом максимальные величины производительности составят примерно 2500 т/г. для вариантов с переработкой ОЯТ реакторов ВВЭР всех стран-участниц РМЯТЦ.

– Количество перерабатываемого ОЯТ БР увеличивается со временем после пуска перерабатывающего завода в 2035 г. по закону, не сильно отличающемуся от линейного, и достигает к 2100 г. 2,5 и 4,5 тыс. т/г. соответственно для сценариев с использованием плутония в БР из ОЯТ только российских реакторов ВВЭР и из ОЯТ реакторов ВВЭР всех стран-участниц РМЯТЦ.

– Совместное развитие АЭ стран-участниц РМЯТЦ позволяет перерабатывать все нарабатываемое облученное топливо, объем которого составит около 124 тыс. т. Это даст возможность избежать строительства хранилища, равного по вместимости 14-ти хранилищам на ГХК или 1,8 хранилища Юкка-Маунтин (рис. 4).

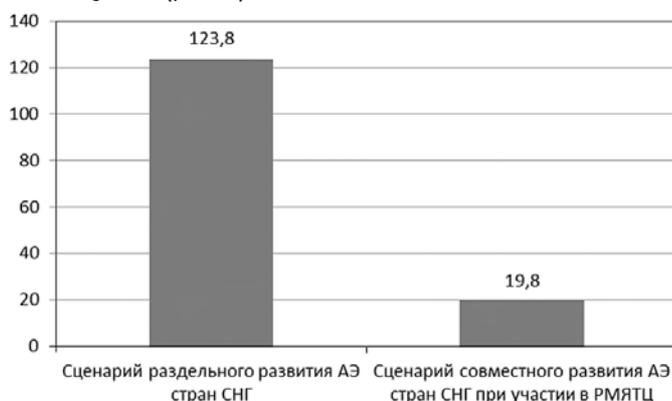


Рис. 4. Накопление ОЯТ в зависимости от сценария развития АЭ стран СНГ

Еще одним немаловажным преимуществом участия в РМЯТЦ является то, что переработка ОЯТ реакторов типа ВВЭР-1000 Украины, Белоруссии и Армении и использование выделенного плутония для изготовления топлива для быстрых реакторов позволит ввести дополнительное, по сравнению со сценарием раздельного развития АЭ, количество быстрых реакторов. Это позволяет увеличить мощность АЭС стран-участниц РМЯТЦ к 2100 г. на 60%. Такой усиленный ввод быстрых реакторов позволит дополнительно выработать 2,4 тыс. ТВт·ч электроэнергии к 2050 г. и 34 тыс. ТВт·ч электроэнергии к 2100 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования по моделированию вариантов функционирования РМЯТЦ показали на качественном и количественном уровне преимущества, которые могут получить Россия, Украина, Армения и Республика Беларусь при организации сотрудничества на региональном уровне в рамках учреждения РМЯТЦ.

Полученные результаты являются первыми в оценке количественных характеристик материальных потоков (свежее ядерное топливо, накопление ОЯТ, баланс плутония) и инфраструктуры, экономические показатели которой тесно связаны с определением необходимых мощностей реакторов, предприятий ЯТЦ и их графиком ввода в эксплуатацию. Возникающий при этом вопрос стоимости создания РМЯТЦ определяет дальнейшее направление исследований.

## Литература

- Интернет-ресурс: <http://2012.atomexpo.ru/mediafiles/u/files/Present2012/Behar.pdf> (Nuclear Energy in France after Fukushima).
- Интернет-ресурс: [http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2012/10/UB\\_world\\_energy\\_perspective\\_nuclear\\_energy\\_one\\_year\\_after\\_fukushima\\_2012\\_WEC.pdf](http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2012/10/UB_world_energy_perspective_nuclear_energy_one_year_after_fukushima_2012_WEC.pdf) (World Energy Perspective: Nuclear Energy One Year After Fukushima.)

3. *Адамов Е.О., Большов Л.А., Лопаткин А.В. и др.* Концептуальные положения стратегии развития ядерной энергетики России в перспективе до 2100 г. // Атомная энергия. – 2012. – Т. 112. – № 6. – С. 319-330.
4. *Рачков В.И.* Атомная энергетика как важнейший фактор устойчивого развития России в XXI веке. // Энергосбережение и водоподготовка. – 2006. – №6, – С. 2 – 4.
5. *Хлопков А.* Ангарский проект: Обогащение vs. Распространение. // Индекс безопасности. – 2008. – №2 (85).
6. Интернет-ресурс: Юдин Ю. Многосторонние подходы к ядерному топливному циклу. Анализ существующих предложений. Электронный документ. // ЮНИДИР. <http://www.unidir.org/pdf/ouvrages/pdf-2-978-92-9045-195-2-en.pdf>
7. Request by the Russian Federation regarding its Initiative to Establish a Reserve of Low Enriched Uranium (LEU) for the Supply of LEU to the IAEA for its Member States // GOV/2009/81. 27 November 2009.
8. <http://www.nuclear.ru/rus/press/oyatrao/2131663/> (В Миссисипи обсуждается возможность создания центра по обращению с ОЯТ).
9. Интернет-ресурс: Лебедев А.Е. Международный центр по обогащению урана – цели, задачи, успехи, перспективы. / Доклад на Международном форуме АТОМЭКСПО 2011. 6–8 июня 2011 г. [http://2011.atomexpo.ru/mediafiles/u/files/Present2011/Lebedev\\_A.E.\\_rus.pdf](http://2011.atomexpo.ru/mediafiles/u/files/Present2011/Lebedev_A.E._rus.pdf)
10. Интернет-ресурс: <http://www.nuclear.ru/rus/press/oyatrao/2123252/> (Верховная Рада приняла законопроект о сооружении централизованного хранилища ОЯТ).
11. Интернет-ресурс: <http://www.nuclear.ru/rus/press/nuclearenergy/2125066/> (Сроки ввода в эксплуатацию новой АЭС в Армении перенесены на 2019 – 2020 гг.).
12. Интернет-ресурс: [http://www.iiasa.ac.at/\(IIASA, MESSAGE – Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact\)](http://www.iiasa.ac.at/(IIASA, MESSAGE – Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact)).
13. *Декусар В.М., Каграманян В.С., Калашников А.Г. и др.* Разработка математической модели топливного цикла атомной энергетики, состоящей из тепловых и быстрых реакторов. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2010. – №4. – С. 119–132.
14. *Рачков В.И., Поплавский В.М., Цибуля А.М., Багдасаров Ю.Е. и др.* Концепция перспективного энергоблока с быстрым натриевым реактором БН-1200. // Атомная энергия. – 2010. – Т. 108. – № 4. – С. 201-205.
15. *Кузнецов И.А., Поплавский В.М.* Безопасность АЭС с реакторами на быстрых нейтронах. – М.: ИздАт, 2012. – 632 с.
16. Энергетическая стратегия России на период до 2030 г. Приложение № 4. Утверждена распоряжением Правительством РФ от 13.11.2009 г. №1715-р.
17. Uranium 2009: Resources, Production and Demand. OECD Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency, OECD 2008 NEA N 6345.
18. *Егоров А.Ф., Коробейников В.В., Поплавская Е.В., Фесенко Г.А.* Оценка чувствительности модели развития ядерной энергетики России к возможным изменениям ключевых экономических параметров. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2012. – №3. – С. 53-61

Поступила в редакцию 15.11.2013 г.

## Авторы

Декусар Виктор Михайлович, ведущий научный сотрудник, ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ», кандидат техн. наук.

Егоров Александр Федорович, младший научный сотрудник, ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ».

Калашников Александр Григорьевич, ведущий научный сотрудник, ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ», кандидат техн. наук.

Коробейников Валерий Васильевич, главный научный сотрудник отдела, ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ», доктор физ.-мат. наук, профессор.

E-mail: korob@ipre.ru

Коробицын Вадим Евгеньевич, старший научный сотрудник отдела, ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ».

Мосеев Андрей Леонидович, старший научный сотрудник отдела, ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ».

Мосеев Павел Андреевич, аспирант второго года обучения, ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ».

УДК 621.039.543.6

## **MODELING SERVICES OF INTERNATIONAL NUCLEAR FUEL CYCLE FACILITY FOR COMMONWEALTH OF INDEPENDENT STATES**

Dekusar V.M., Egorov A.F., Kalashnikov A.G., Korobeynikov V.V., Korobicin V.E., Moseev A.L., Moseev P.A.

State Scientific Center of the Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering named after A.I. Leypunsky, Obninsk, Kaluga reg., Russia

### ABSTRACT

The country starting its own nuclear program faces the the problem of obtaining information about the issues that accompany all stages of the nuclear fuel cycle. A clearly-scheduled long-term national program of nuclear power engineering will allow to determine the requirements for nuclear fuel cycle (NFC) and, accordingly, to identify the most necessary components of the nuclear energy system. Lacking experience in nuclear materials management, countries starting development of nuclear power are forced to rely heavily on the technology supplier. Using the experience of advanced nuclear energy countries by newcomers allows not only to reduce the existing technological gap between them, but also to reduce the uncertainty of start-up costs estimates for developing a NPP of one's own. Much more difficult is the problem of spent nuclear fuel (SNF), the volume of which during the operation of nuclear power plants is likely to be accumulated in great amount. Solving this problem will have a major impact on both the environmental assessment of the nation's nuclear fuel cycle and its economy.

In this paper a simulation of an international nuclear fuel cycle center (NFCC) has been done. Russia, Ukraine, Armenia and Belarus (CIS countries) were selected as the NFCC potential participants. The energy system planning code MESSAGE (developed by IAEA) and the software tool NFC CYCLE (developed by IPPE) were chosen for implementing the simulation. To analyze the benefits which Russia and countries participating in the creation of NFCC are going to get two scenarios of nuclear power development in Russia, Ukraine, Armenia and Belarus were calculated: the case of their independent development and the case of their cooperation.

The research results for the selected scenarios showed that:

- starting-up a FR using plutonium obtained by reprocessing SNF of VVER-1000-type reactors allows to optimize currently operated reactors by gradual replacement of thermal reactors by fast ones, thus saving natural uranium;
- joint development of nuclear power plants by NFCC participant-countries allows to reprocess all SNF, which will amount to about 124,000 tons. This will raise the possibility to avoid construction of storage capacity equal to two storages of Yucca Mountain type.

**Key words:** nuclear fuel cycle modelling, light water reactors, heavy water reactors, fast breeder reactors, synergy, natural uranium, optimization, Global Nuclear Energy, fuel balance.

### REFERENCES

1. Available at: <http://2012.atomexpo.ru/mediafiles/u/files/Present2012/Behar.pdf> (Nuclear Energy in France after Fukushima).
2. Available at: [http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2012/10/PUB\\_world\\_energy\\_perspective\\_nuclear\\_energy\\_one\\_year\\_after\\_fukushima\\_2012\\_WEC.pdf](http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2012/10/PUB_world_energy_perspective_nuclear_energy_one_year_after_fukushima_2012_WEC.pdf) (World Energy Perspective: Nuclear Energy One Year After Fukushima)

3. Adamov E.O., Bol'shov L.A., Lopatkin A.V. e.a. Konceptual'nye polozheniya strategii razvitiya yadernoj energetiki Rossii v perspektive do 2100 g. [Conceptual Development Strategy of Russian nuclear power in the run up to 2100.]. *Atomnaya energiya*. 2012, vol. 112, no. 6, pp. 319–330.
4. Rachkov V.I. Atomnaya energetika kak vazhnejshij faktor ustojchivogo razvitiya Rossii v XXI v. [Nuclear energy as an important factor for sustainable development of Russia in XXI century]. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*. 2006, no. 6, pp. 2–4.
5. Hlopkov A. Angarskij proekt: Obogashchenie vs. Rasprostranenie. [Angarsk project: Enriching vs. Proliferation]. *Indeks bezopasnosti*. 2008, no.2 (85).
6. Yudin Yu. Mnogostoronnie podhody k yadernomu toplivnomu ciklu. Analiz sushchestvuyushchih predlozhenij. YuNIDIR. [Multilateral approaches to the nuclear fuel cycle. Analysis of the existing proposals. UNIDIR]. Available at: <http://www.unidir.org/pdf/ouvrages/pdf-2-978-92-9045-195-2-en.pdf>
7. Request by the Russian Federation regarding its Initiative to Establish a Reserve of Low Enriched Uranium (LEU) for the Supply of LEU to the IAEA for its Member States. GOV/2009/81. 27 November 2009.
8. Available at: <http://www.nuclear.ru/rus/press/oyatrao/2131663/> (V Missisipi obsuzhdaetsya vozmozhnost' sozdaniya centra po obrashcheniyu s OYaT) [In Mississippi discussed the possibility of establishing a center for SNF management].
9. Lebedev A.E. Mezhdunarodnyj centr po obogashcheniyu urana – celi, zadachi, uspehi, perspektivy. Doklad na Mezhdunarodnom forume ATOMEKSP0 2011. 6–8 iyunya 2011 g. [International Uranium Enrichment Center - goals, objectives, results and perspectives. Report of the International Forum ATOMEXPO 2011. 6-8 June 2011]. Available at: [http://2011.atomehpo.ru/mediafiles/u/files/Pre-sent2011/Lebedev\\_A.E.\\_rus.pdf](http://2011.atomehpo.ru/mediafiles/u/files/Pre-sent2011/Lebedev_A.E._rus.pdf)
10. Available at: <http://www.nuclear.ru/rus/press/oyatrao/2123252/> (Verhovnaya Rada prinyala zakonoproekt o sooruzhenii centralizovannogo hranilishcha OYaT) [Ukrainian Parliament adopted a bill on the construction of a centralized repository of spent nuclear fuel]
11. Available at: <http://www.nuclear.ru/rus/press/nuclearenergy/2125066/> (Sroki vvoda v ekspluatatsiyu novoj AES v Armenii pereneseny na 2019 – 2020 gg.) [The commissioning of a new NPP in Armenia postponed to 2019 – 2020 years.]
12. Available at: [www.iiasa.ac.at/](http://www.iiasa.ac.at/) (IIASA, MESSAGE – Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact).
13. Dekusar V.M., Kagramanyan V.S., Kalashnikov A.G. e.a. Razrabotka matematicheskoy modeli toplivnogo cikla atomnoj energetiki, sostoyashchej iz teplovyh i bystryh reaktorov. [Development of mathematical model for nuclear power fuel cycle consisting of thermal and fast reactors.]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2010, no. 4, pp. 119–132
14. Rachkov V.I., Poplavskij V.M., Tsibulya A.M., Bagdasarov Yu.E. e.a. Konceptiya perspektivnogo energobloka s byстрыm natrievym reaktorom BN-1200. [Concept of prospective of power unit with fast neutron reactor BN-1200.]. *Atomnaya energiya*. 2010, vol. 108, no. 4, pp. 201–205.
15. Kuznecov I.A., Poplavskij V.M. Bezopasnost' AES s reaktorami na bystryh nejtronah [Security NPP with fast reactors]. Moscow, IzdAt Publ. 2012, 632 p.
16. Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2030 g. Prilozhenie no. 4. Utverzhdena rasporyazheniem Pravitel'stvom RF ot 13.11.2009 g. no.1715-r. [Russia's Energy Strategy until 2030. Application number 4. Approved by order of the Government of the Russian Federation dated 13.11.2009 no.1715-r.] (in Russian)
17. Uranium 2009: Resources, Production and Demand. OECD Nuclear Energy Agency and

the International Atomic Energy Agency, OECD 2008 NEA N 6345.

18. Egorov A.F., Korobejnikov V.V., Poplavskaya E.V., Fesenko G.A. Ocenka chuvstvitel'nosti modeli razvitiya yadernoj energetiki Rossii k vozmozhnym izmeneniyam klyuchevykh ekonomicheskikh parametrov [Estimation of sensitivity for development model of Russian nuclear power to possible changes in key economic parameters]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2012, no. 3, pp. 53–61.

### Authors

Dekusar Viktor Mihajlovich, Lead Researcher, FSUE «SSC RF-IPPE»,  
Cand. Sci. (Engineering).

Egorov Aleksandr Fyodorovich, Junior Research, FSUE «SSC RF-IPPE».

Kalashnikov Alexandr Grigor'evich, Lead Researcher, FSUE «SSC RF-IPPE»,  
Cand. Sci. (Engineering).

Korobeynikov Valerij Vasil'evich, Principal Scientist of Department, FSUE «SSC RF-IPPE»,  
Dr. Sci. (Engineering), Professor.

E-mail: korob@ippe.ru

Korobicin Vadim Evgen'evich, Senior researcher of Department, FSUE «SSC RF-IPPE».

Moseev Andrej Leonidovich, Senior researcher of Department, FSUE «SSC RF-IPPE».

Moseev Pavel Andreevich, Postgraduate student, FSUE «SSC RF-IPPE».