

**Научно-техническая конференция
«Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики»
(Нейтроника-2019)
Обнинск, ГНЦ РФ-ФЭИ
27—29 ноября 2019 г.**

**К ВОПРОСУ ОБ ЭКСПОРТЕ БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ В
УСЛОВИЯХ МЕЖДУНАРОДНОГО РЕЖИМА ЯДЕРНОГО
НЕРАСПРОСТРАНЕНИЯ**

Гулевич А.В., Декусар В.М., Чебесков А.Н. (АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», г. Обнинск Калужской обл.)

*Кучинов В.П. (НИЯУ-МИФИ, Москва), Волошин Н.П. (РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика
Е.И.Забабихина, Снежинск Челябинской обл.)*

1. Успехи России в области тепловых реакторов ВВЭР

- **Россия признанный мировой лидер** по количеству ядерных энергоблоков, сооружаемых за рубежом.
- В перспективе планируется существенное расширение масштабов международного бизнеса, что отражено в целевых показателях Госкорпорации «Росатом» и ее организаций.
- Портфель зарубежных заказов Госкорпорации «Росатом» **на 2019 г. включает 36 ядерно-энергетических блоков.**
- Ключевым конкурентным преимуществом Госкорпорации «Росатом» на мировом рынке атомной энергии является интегрированное предложение по оказанию комплекса услуг:
 - сооружение АЭС, обеспечение топливом, обслуживание ОЯТ
 - эксплуатацию и обслуживание АЭС за рубежом
 - Госкорпорация «Росатом» активно содействует развитию атомной энергетики в других странах: создание ядерных центров, обучение студентов и персонала
 - при строгом соблюдении международных норм и соглашений в области нераспространения ядерного оружия.
- ВВЭР-440 → ВВЭР-1000 → ВВЭР-1200 → ВВЭР-ТОИ → ВВЭР-МОХ → ВВЭР-С →

Новые пуски в России

Ново-воронежская АЭС-2:

блок 1 – 27.02.2017

блок 2 – 31.10.2019

Ростовская АЭС:

блок 4 -28.09.2018

Ленинградская АЭС-2:

блок 1 – 29.10.2018

**Окончательно
остановлены:**

Билибинская АЭС:

блок 1 – март 2018

Ленинградская АЭС:

блок 1 – октябрь 2018

Новые сооружения

В настоящее время 3 блока сооружаются внутри страны и порядка 10 за рубежом

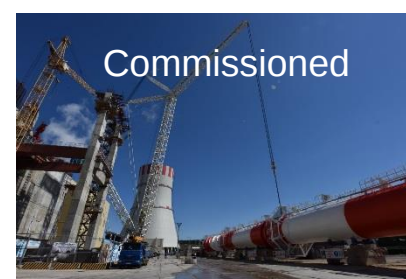
Kurskaya NPP-2



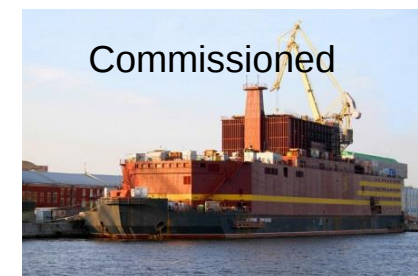
Leningrad NPP-2



Novovoronezh NPP-2



Floating NPP



Ostrovets NPP



Kudankulam NPP



Busherrh NPP



**Tianwan NPP
Xudabao (Suydapu)**



Paks NPP



Rooppur NPP



Hanhikivi NPP



El Dabaa NPP

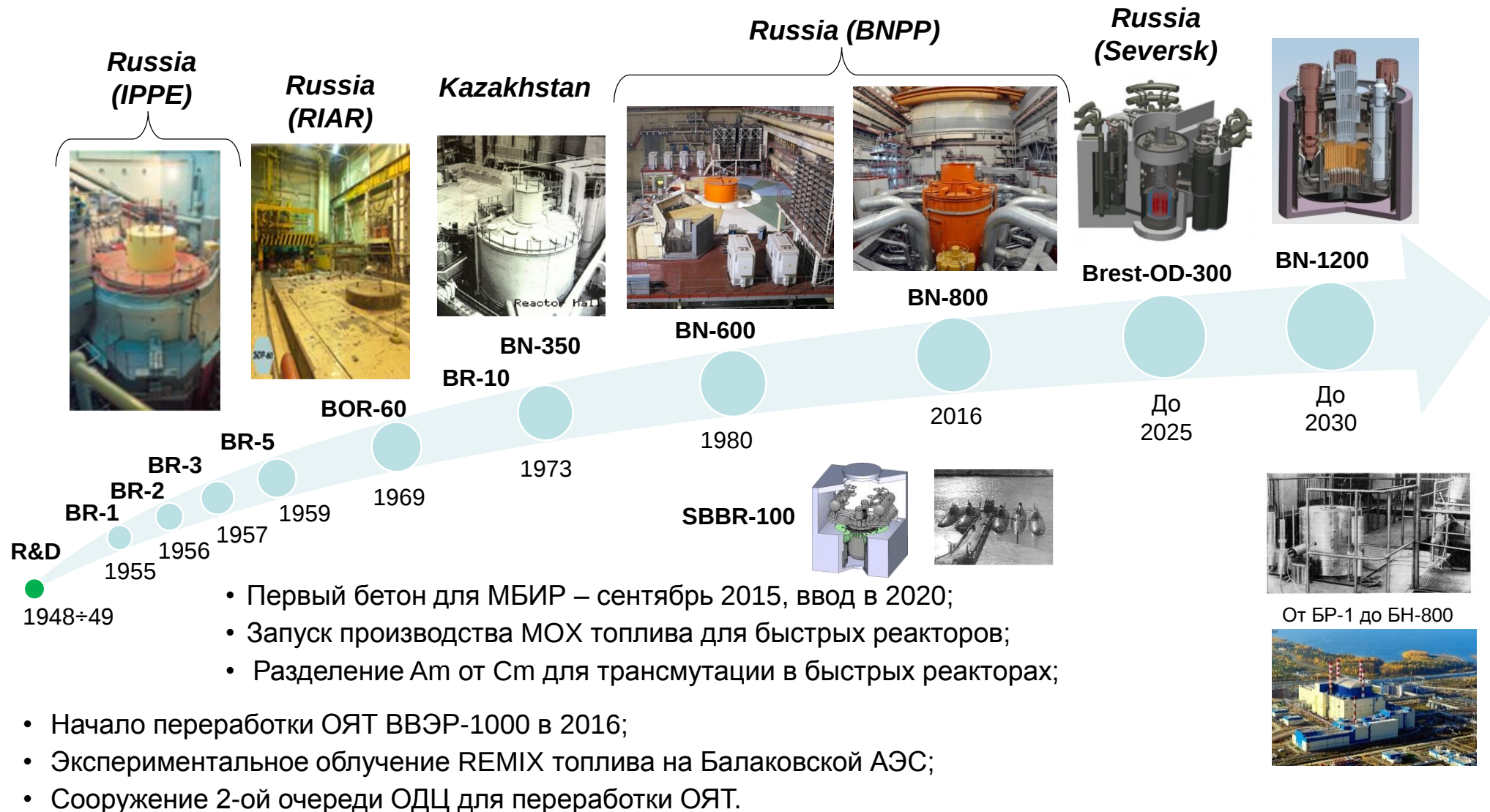


Akkuyu NPP



- Технология реакторов ВВЭР достигла **коммерческой зрелости** на международном рынке.
- При этом решена проблема топливообеспечения этих реакторов.
- На ближайшую перспективу, и возможно на более длительный период технология ВВЭР **останется коммерчески привлекательной** как внутри страны, так и на мировом рынке.
- Основные проблемы топливного цикла этих реакторов: неэффективное использование природного урана и накопление ОЯТ останутся нерешенными, если не будет изменён существующий технологический уклад атомной энергетики.
- **Рост потребности в энергии, особенно в развивающихся странах**
- **Неизбежное наращиванию атомных мощностей парка тепловых реакторов**
- Как следствие, обострение проблем, связанных с ограниченностью запасов относительно дешевого природного урана и возрастающих темпов накопления ОЯТ
- **Конкурентоспособность АЭ будет все больше зависеть от эффективности использования природного урана и решения проблемы ОЯТ.**

2. Достижения России в развитии технологий быстрых реакторов и замкнутого ядерного топливного цикла



3. Современное состояние с разработкой быстрых реакторов в России

- На современном этапе развития в мире сложился **фактически консенсус о главенствующей роли быстрых реакторов** в будущей широкомасштабной атомной энергетике:
 - в условиях дефицита ресурсов природного урана, как это рассматривалось в прошлом,
 - роль быстрых реакторов по обращению со все возрастающими объемами ОЯТ.
- Международные проекты ИНПРО и МФП Поколение-IV.
- Два основных направления разработки быстрых реакторов в России:
 - БН с натриевым теплоносителем и с централизованным размещением замкнутого ЯТЦ,
 - БРЕСТ со свинцовым теплоносителем и с пристанционным размещением инфраструктуры ЯТЦ.
 - А также - разработка модульного реактора СВБР для малой энергетики.
- К настоящему времени **продемонстрирована на промышленном уровне зрелость технологии** быстрых натриевых реакторов, включая многолетний опыт эксплуатации установок с БН
- Можно считать, что в настоящее время **технология реакторов БН вступила в этап коммерциализации.**
- Доработка БН-1200 → сооружение головного блока.

- В проекте «Прорыв» продолжается разработка быстрых реакторов БРЕСТ
- Пристанционное размещение инфраструктуры замкнутого ЯТЦ
- К настоящему времени эта технология **не была продемонстрирована ни на одной установке**, поэтому нельзя говорить о ее зрелости, как в случае технологии БН.
- Для демонстрации → сооружение до 2025 г. энергоблока с опытно-демонстрационным реактором **БРЕСТ- ОД –300 на Северной АЭС** в Сибирском химическом комбинате.
- На этой же площадке → сооружение опытно-демонстрационного энергетического комплекса (ОДЭК) со всей инфраструктурой (ПЯТЦ).

Замыкание ЯТЦ:

БН и ВВЭР в едином замкнутом ЯТЦ **2-х компонентной ЯЭС, компоненты тесно связаны единым циклом и синергично используют преимущества каждой компоненты** → решение проблем топливообеспечения и ОЯТ ВВЭР, в том числе для зарубежных АЭС

БРЕСТ замыкание ЯТЦ только для парка реакторов БРЕСТ, оставляя в стороне систему энергетики тепловых реакторов ВВЭР с ее проблемами, также **2-х компонентная ЯЭС с независимыми друг от друга компонентами**

Экспортный потенциал технологий реакторов на быстрых нейтронах

С.В. Кириенко:



- **«Россия к 2025 году будет обладать коммерческими технологиями реакторов на быстрых нейтронах, необходимыми для развития атомной энергетики будущего»** (Международный Форум «Атомэкспо-2015»)
- **«Технология быстрых реакторов может быть представлена мировому рынку в течение 10 лет».** С. Кириенко на (Международный экономический форум, июнь 2016 г., С.-Петербург)
- **«Коммерческое использование реакторов на быстрых нейтронах...начнется примерно в 2030-х годах...произойдет "симбиоз" тепловых и быстрых реакторов, они будут работать в так называемой двухкомпонентной системе, дополняя друг друга.»** (Международный Форум «Атомэкспо-2016»)

А.Е. Лихачев:

- **«Мы убеждены, что будущее мировой атомной энергетики неразрывно связано с замыканием ЯТЦ, неотъемлемой частью которого являются «быстрые» реакторные технологии. И что важно, это уже не технология отдаленной перспективы: с учетом имеющегося научного и технологического уровня развития есть все основания полагать, что комплексный продукт в этой сфере будет предложен рынку в течение ближайших 10-15 лет. По меркам атомной отрасли – это технологии завтрашнего дня»** (Министерская конференции МАГАТЭ, Абу-Даби 30.11.2017)

-
- ❖ В мае 2018 г. Росатом создал Рабочую Группу для проработки условий экспорта энергоблоков с быстрыми реакторами и комплексов пристанционного замкнутого ЯТЦ (ПЯТЦ)

4. Экспорт технологий

Общие требования к технологиям, предназначенным для экспорта:

- зрелость и техническая готовность технологий
- коммерческая привлекательность
- наличие действующего образца или референтной установки
- возможные рынки сбыта
- наличие конкурирующих технологий.

Особенности экспорта ядерно-энергетических технологий:

- страна- заказчик (политический фактор)
- ядерная безопасность
- режим нераспространения ЯО
- международные договоры и соглашения
- экспортное законодательством Российской Федерации
- гарантии МАГАТЭ
- физическая защита ЯМ и установок

ЯО → АЭ, риск обратного процесса АЭ → ЯО

- Использование технологий, установок и материалов АЭ для скрытой военной программы;
- Использование знаний, компетенций и опыта специалистов, работающих в области АЭ, для параллельной скрытой военной программы;
- Выход из ДНЯО и прямое использование **приобретенных установок и материалов** для военных целей.

- Гарантии МАГАТЭ - совокупность технических средств по проверке обязательств государств в области нераспространения ЯО в соответствии с уставом МАГАТЭ и ДНЯО.
- Цель гарантий заключается в том, чтобы своевременно обнаруживать переключение значимых количеств ЯМ с мирной деятельности на изготовление ЯО и ЯВУ.
- Гарантии применяются ко всему исходному или специальному расщепляющемуся ЯМ во всей мирной ядерной деятельности в пределах государства.
- Ядерные материалы включают:
 - Исходные материалы (Source materials): природный и обедненный уран, торий – их металлы, сплавы, хим. соединения.
 - Специальные расщепляющиеся материалы (Special fissionable materials): Pu-239, U-233, обогащенный уран по U-235 и U-233. Не включают «исходные материалы».

Международный форум «Поколение IV» (GIF): “Safeguards by Design” (SbD) - новый подход к проектированию и строительству ядерных объектов, в которых положения и функции по гарантиям разрабатываются с самого начала процесса проектирования.

Это систематический и структурированный подход для полной интеграции международных и национальных гарантий, физической защиты и других барьеров в процесс проектирования и строительства ядерных объектов, а также интеграции с безопасностью.

Особенности быстрых реакторов по сравнению с тепловыми для применения гарантий МАГАТЭ:

- **Концентрация** делящихся изотопов в топливе до 3-5 раз ↑
- Жидкометаллический **непрозрачный теплоноситель** затрудняет контроль загрузки А.З., blankets, ВРХ
- Наличие **blankets и внутренних зон воспроизводства** (аксиальная прослойка)
- Коэффициент воспроизводства (плутония) > 1
- **Замкнутый ЯТЦ**: переработка ОЯТ, рефабрикация ядерного топлива, обращение с ВАО

Центральное место во всей инфраструктуре замкнутого ЯТЦ занимает **радиохимический завод (РХЗ)** по переработке ОЯТ:

- РХЗ представляет один из самых чувствительных и ответственных участков ЯТЦ по контролю за нераспространением ядерного оружия, что связано, в первую очередь, с **повышенной концентрацией плутония** по сравнению с тепловыми реакторами
- Плутоний, находящийся в разных фазовых состояниях и химических соединениях, циркулирует на разных участках РХЗ в так называемой «**балк**» **форме**, что затрудняет инвентаризацию его массового количества
- Поэтому при экспорте радиохимический завод по переработке ОЯТ потребует повышенного внимания с точки зрения **применения технических и организационных** возможностей для функционирования гарантий МАГАТЭ.

Некоторые рекомендации по применению гарантий МАГАТЭ к быстрым реакторам

Конструкции установок должны быть максимально адаптированы к применению гарантий.

Потребуется разработка новых методов неразрушающего контроля (NDA), чтобы точно измерять содержание плутония (Pu) и актинидов в свежих и отработавших TRU-TBC (это осложняется наличием других МА и высокими нейтронными и гамма полями ОЯТ).

NDA системы необходимо спроектировать «in-line» для измерений передачи свежего топлива в хранилище и в активную зону и передачу ОЯТ из реактора в бассейн выдержки и в хранилище.

Дистанционный постоянный мониторинг и передача данных, в том числе в отсутствие персонала.

Создать активный диалог с МАГАТЭ.

Тесное сотрудничество с оператором установки и национальными органами власти, чтобы разработать требования по гарантиям и оборудованию на самых ранних этапах концептуального проектирования объекта.

Использование рандомизированных (случайно назначенных) инспекций с коротким временем уведомления, по проверке ядерного материала в быстром реакторе, а не запланированную систематическую проверку всех основных передач материалов, содержащих плутоний.

Места хранения и пути передачи TRU-топлива

Тесная и бесконфликтная координация между тремя S – Safety, Security, Safeguards

6. Возможные варианты зарубежных поставок:

- за рубеж поставляются только АЭС с быстрыми реакторами:
 - вся инфраструктура замкнутого ЯТЦ будет на территории России
 - зарубежная АЭС обеспечивается «свежим» топливом
 - весь ОЯТ и облученные сборки blankets передаются в страну поставщика
 - переработка ОЯТ, рефабрикация топлива и обращение с ядерными отходами будет производится на установках, имеющихся в России или на вновь созданных для этой цели
 - гарантии МАГАТЭ будут распространяться только на эксплуатацию ядерного реактора и на «свежее» и отработавшее ядерное топливо при транспортировке, при загрузке в реактор, при выгрузке из реактора и при нахождении в бассейне выдержки
 - методика контроля и учета ядерных материалов –ТВС, приборная оснащенность – все хорошо отработано на практике для тепловых реакторов инспекторами МАГАТЭ и может быть вполне применима к быстрым реакторам
- поставки АЭС с быстрыми реакторами вместе со всей инфраструктуры замкнутого ЯТЦ:
 - с пристанционным размещением, т.е. на той же площадке, на которой размещены АЭС

Пристанционный или централизованный варианты ЯТЦ

➤ При пристанционном размещении:

- почти **абсолютный контроль над ЯМ**, отсутствует **внешний транспорт ЯМ** (вне охраняемой площадки),
- сводится практически **к нулю риск террористических или криминальных атак на транспорт ЯМ**,
- отсутствует **риск заражения жилой местности при возможных дорожных авариях с выходом радиоактивности во время транспортировки ЯМ**,
- **затраты на транспортировку ЯМ** и время транспортировки будут существенно меньше по сравнению с централизованным вариантом,
- существенно **меньше расходы на охрану и сопровождение** транспортируемых ЯМ

➤ С другой стороны:

- в случае аварии на АЭС могут пострадать и установки ЯТЦ и наоборот
- **возрастает риск скрытого использования по заданию государственных органов установок ЯТЦ для незаявленной деятельности**, включая наработку и выделение незаявленных материалов, поскольку все необходимые установки будут сосредоточены на одной площадке.
- **удельные затраты на сооружение и обслуживание всей инфраструктуры ЯТЦ** для ограниченного числа энергоблоков будут выше по сравнению с централизованным вариантом, который может обслуживать значительно большее число энергоблоков.

7. Страны, которые могут заказать поставки АЭС с быстрыми реакторами

- Коммерциализация российских технологий быстрых реакторов и ЗЯТЦ является необходимым условием для выхода на международные рынки.
- **Выход на международные рынки по существу вопрос политический**, коммерческая привлекательность подобных продуктов может иметь для некоторых государств-заказчиков этих технологий второстепенное значение:
 - На первом плане для подобных стран будет стоять возможность получить материалы для разработки ЯО.
- В существующих в настоящее время политических реалиях в мире в качестве потенциальных заказчиков этих технологий **можно рассматривать ядерно-оружейные страны и страны имеющие многолетний опыт** эксплуатации ядерно-энергетических установок.
- Наиболее вероятные из них это – **Китай** (CEFR, 2 BN-800?, CFR-600, CCFR-1000-1200) и **Индия** (FBTR 40 МВт(т), PFBR-500 + серия).
- Представляется, что поставки в Китай таких российских продуктов могут быть осуществлены в соответствии с имеющимися международными нормами без каких-либо ограничений. Возможность таких поставок **в Индию потребует дополнительного** рассмотрения (не является членом ДНЯО).
- Для подготовки к экспорту необходимо **тесное взаимодействие с МАГАТЭ** по разработке концепции гарантий и их практического применения на конкретных установках (**Safeguard by₁₅ Design**)

Выводы

На современном этапе развития в мире сложился фактически консенсус о главенствующей роли быстрых реакторов в будущей широкомасштабной атомной энергетике.

Помимо основной роли быстрых реакторов по обеспечению топливом в условиях дефицита природного урана в настоящее время на одно из первых мест выдвигается роль быстрых реакторов по обращению со все возрастающими объемами ОЯТ тепловых реакторов.

Россия является признанным мировым лидером в разработке технологий быстрых реакторов и замкнутого ядерного топливного цикла.

Технология быстрых натриевых реакторов успешно продемонстрирована и вступила в этап коммерциализации.

По мнению руководства Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» российские технология быстрых реакторов и замкнутого ЯТЦ могут выйти на международные рынки уже в ближнесрочной перспективе в качестве главного экспортного продукта российской ядерно-энергетической отрасли.

Для подготовки к будущему экспорту этих технологий российским специалистам предстоит проделать громадную работу.

Перспективным направлением работ в этом является разработка гарантий МАГАТЭ на стадии проектирования (Safeguard by Design), подход предложенный в проекте Международного Форума Поколение-IV.

В этом подходе разработчики технологий работают в тесной кооперации с соответствующими специалистами, включая сотрудничество с МАГАТЭ, для выработки практических рекомендаций по применению гарантий МАГАТЭ на АЭС с быстрыми реакторами и на установках ЯТЦ.

Однако следует иметь в виду, что вопрос выхода на международные рынки является по существу политическим и что коммерциализация, т.е. экономическая привлекательность и конкурентоспособность подобных продуктов может иметь для некоторых государств-заказчиков этих технологий второстепенное значение.

Поэтому в существующих в настоящее время политических реалиях в мире в качестве потенциальных заказчиков рассматриваемых технологий можно рассматривать ядерно-оружейные страны и страны имеющие многолетний опыт эксплуатации ядерно-энергетических установок.