

- continuous power supplies. — *Ibid.*, 2019, v. 64, № 9, p. 1290—1297.
5. **Liu W., Li M., Gao K. e.a.** Discharge characteristics of a Penning ion source for compact neutron generator. — *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A*, 2014, v. 768, p. 120—123.
6. **Zhou X., En Y., Lu J. e.a.** Contrast experiments of pig positive and negative hydrogen ion sources for neutron tubes. — *Instrum. Exper. Techn.*, 2020, v. 63, № 4, p. 595—599.
7. **Fathi A., Feghhi S., Sadati S. e.a.** Magnetic field design for a Penning ion source for a 200 keV electrostatic accelerator. — *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A*, 2017, v. 850, p. 1—6.
8. **Mamedov N.V., Shchitov N.N., Kan'shin I.A.** An experimental apparatus for Penning ion source research. — *Instrum. Exper. Techn.*, 2016, v. 59, № 6, p. 870—878.
9. **Mamedov N.V., Maslennikov S.P., Solodovnikov A.A. e.a.** Effect of the magnetic field on the characteristics of a pulsed Penning ion source. — *Plasma Phys. Rep.*, 2020, v. 46, № 2, p. 217—229.

Поступила в Редакцию 20.06.21

УДК 621.039.4

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГАРАНТИЙ МАГАТЭ НА АЭС С БЫСТРЫМ РЕАКТОРОМ И ПРИСТАНЦИОННЫМ ТОПЛИВНЫМ ЦИКЛОМ

Невиница В.А., Родионова Е.В. (НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва),

Марова Е.В. (АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород)

e-mail: neviniza_va@nrcki.ru

При анализе возможностей международного бизнеса ядерная энергетика рассматривается с позиций не только технико-экономической эффективности, но и риска двойного использования материалов и ядерных знаний. Поэтому важным аспектом остается соблюдение международного режима нераспространения ядерного оружия, в обеспечение которого как инструмент международного контроля топливного цикла с целью исключить использование материалов и технологий в военных целях применяются гарантии МАГАТЭ. В настоящее время накоплен значительный опыт применения гарантий МАГАТЭ, что позволяет его использовать как некоторую исходную информацию для учета рекомендаций МАГАТЭ в проекте АЭС [1—3].

Наиболее распространенной и отработанной на отечественном и международном рынке ядерной энергетической технологией, в том числе и с точки зрения применения гарантий МАГАТЭ являются легководные корпусные реакторы [4, 5]. Число находящихся под гарантиями МАГАТЭ легководных реакторов во много раз превышает суммарное число находящихся под гарантиями МАГАТЭ реакторов всех остальных типов. Тем не менее для большинства из них процедуры гарантий МАГАТЭ для находящихся под гарантиями или оценка возможности их применения разработаны, в том числе для исследовательских и быстрых реакторов [6—9]. Разработаны подходы к обеспече-

нию гарантий МАГАТЭ на типовых установках топливного цикла [2, 3].

Однако для расширения рынка ядерных технологий важно отработать аспекты, связанные с прогнозируемым развитием быстрых реакторов, в том числе с пристанционным топливным циклом [10—13]. Согласно, например, [10] после выгрузки из активной зоны быстрого реактора ТВС с отработавшим топливом размещаются во внутриреакторном хранилище, где расхолаживаются в течение одной годовой микрокампании и затем направляются на переработку. Время, затрачиваемое на переработку отработавшего топлива и изготовление новых ТВС, также равно длительности микрокампании. Таким образом, уже к началу четвертой микрокампании через 3 года после начала работы реактора и 2 года после первой выгрузки топлива в активную зону загружаются ТВС из собственного регенерированного топлива, которое было выгружено после облучения в течение первой микрокампании. Может быть рассмотрен и более длительный период выдержки, в этом случае первая ТВС из регенерированного топлива вернется не к четвертой микрокампании, а позже. Процедуры гарантий для установок такого типа не разрабатывались, особенно с учетом того, что такая концепция предполагает, что на одной площадке расположены АЭС, для которой твэл является одним из барьеров безопасности, удерживающих продукты деления, и

разрушение которого является недопустимым, и перерабатывающее производство, на котором происходит систематическое разрушение твэлов в силу производственной необходимости. В настоящее время в таком режиме работают лишь исследовательские установки. Поэтому разработка процедур гарантий МАГАТЭ для ядерного энергетического комплекса с размещением на одной площадке АЭС, в частности, с быстрыми реакторами и предприятий топливного цикла является новой задачей, при решении которой потребуются не только технические, но и экономические аспекты.

Постановка задачи и подходы при ее решении. Как было сказано, вовлечение в международный бизнес быстрых реакторов — с централизованным или пристанционным ядерным топливным циклом будет зависеть от совокупности технических, экономических и институциональных факторов, одним из которых является возможность применения гарантий МАГАТЭ. Подходы к их применению для АЭС с пристанционным топливным циклом, как показано, не разработаны, и эта задача по-прежнему является актуальной. В качестве путей решения возможны следующие:

создание виртуальной модели реакторной установки с пристанционным топливным циклом и использование современных средств математического моделирования для анализа возможных сценариев переключения. Под переключением по терминологии МАГАТЭ [14] понимают необъявленное изъятие заявленного ядерного материала из установки, находящейся под гарантиями, или использование установки, находящейся под гарантиями, для получения, производства или обработки незаявленного ядерного материала, например, незаявленное производство плутония в реакторе путем облучения и последующего изъятия незаявленных урановых мишеней;

декомпозиция задачи на две: разработка процедур гарантий МАГАТЭ непосредственно для реакторной части АЭС с пристанционным ядерным топливным циклом, осуществляемая в соответствии с принятым для АЭС подходом, и разработка процедур гарантий в производственной части АЭС с пристанционным ядерным топливным циклом в соответствии с требованиями к установкам топливного цикла.

Первая задача может быть решена. В целом создание математического аппарата и программного обеспечения для поддержки инспекционной деятельности МАГАТЭ не ново. Такого типа задачи применительно к исследовательским реакторам были успешно сформулированы и решены в начале 1990-х гг. [7, 8]. Был создан метод, позволяющий оценивать содержание делящихся элементов при реализации процедур гарантий МАГАТЭ в условиях частичной или полной потери информации о режиме облучения топлива. Кроме того, разработанные методики позволяли выполнять комплексный анализ отработавшего топлива: определять относительное содержание урана и плутония, начальное обогащение, время выдержки и среднюю плотность потока нейтронов, а также контролировать заявленный оператором режим облучения и выдержки топлива.

Решение второй задачи осложняется тем, что, кроме технических, необходимо дополнительно решать еще и экономические вопросы, связанные с затратами на осуществление гарантий МАГАТЭ. Бюджет МАГАТЭ формируется из взносов стран-доноров, поэтому удорожание инспекционной деятельности автоматически приводит к необходимости увеличения бюджета и поиску источников его пополнения, например, за счет дополнительных взносов заинтересованной стороны. В настоящей статье будем использовать доступную из открытых источников часть информации для предварительных оценок. Необходимо отметить, что декомпозиция как подход применима для оценки составляющих, которые в итоге необходимо объединить. Полученный при этом результат не является аддитивным, поскольку некоторые объекты, например, хранилища обслуживают одновременно две технологические цепочки: производственную и энергетическую.

Анализ исходных предпосылок. Остановимся на технических аспектах. Ключевым требованием к рассматриваемой энергетической технологии, по мнению ее создателей, является неразделение урана и плутония при переработке отработавшего топлива и изготовлении свежего. Отметим, что из международных документов, формирующих технический и юридический базис режима нераспространения, это требование не вытекает и явным образом не сформулировано ни в одном документе МАГАТЭ.

Оставляя в стороне радиационные аспекты, такие, как изменение изотопного состава плутония и загрязнение урана изотопом ^{232}U , как следствие невозможность его очистить из-за необходимости соблюдать требование неразделения, отметим, что это требование само по себе осложняет физические инвентаризации МАГАТЭ. Плутоний относится к материалам первой категории, к которым применяются самые строгие проверочные меры [1]. Поскольку уран-плутониевая смесь — результат переработки отработавшего топлива, т.е. целостность отработавших ТВС нарушена, эта смесь также будет являться материалом первой категории. Объем смеси будет существенно больше объема плутония, который из нее можно было бы выделить. Соответственно при осуществлении мероприятий системы учета и контроля ядерных материалов потребуется подвергать физической инвентаризации большее количество ядерного материала первой категории с максимальной частотой физических инвентаризаций, сопряженных с дополнительным облучением персонала. То же самое можно сказать и в отношении проверок фактически наличного количества ядерного материала, осуществляемых при проведении инспекций в рамках гарантий МАГАТЭ. Разница будет состоять только в том, что в рамках системы учета и контроля ядерных материалов частота физических инвентаризаций будет определяться требованиями национального регулятора, в случае проверок фактически наличного их частота будет определяться, исходя из технических целей гарантий МАГАТЭ на конкретной установке и требований своевременности. Дополнительные усилия потребуются для компенсации снижения точности измерений, которая также возникает из-за необходимости выполнять требование неразделения урана и плутония. Данная задача является решаемой, однако такая процедура должна быть разработана и верифицирована на международном уровне.

Но логичность и необходимость установленного в современных проектах требования неразделения урана и плутония с точки зрения нераспространения ядерного оружия не очевидны. Так, в отличие от урана именно плутоний обладает свойствами самозащищенности, которые затрудняют по сравнению с ураном создание ядерного взрывного устройства [13]. К та-

ким свойствам относятся собственный нейтронный фон, тепловыделение, радиоактивность. Создание, например, ядерного оружия с наиболее простой конструкцией «пушечного типа» на основе гражданского плутония практически невозможно из-за высокого нейтронного фона такого плутония. Обогащенный уран также обладает подобными свойствами, но они во много раз слабее, чем у плутония, поэтому не могут оказывать сколько-нибудь заметного влияния на создание ядерного взрывного устройства [13].

Остановимся на экономических аспектах режима нераспространения. Необходимо разделить подготовительную и эксплуатационную стадии. Первая стадия характеризуется капитальными затратами на подготовку к осуществлению гарантий, что обуславливает удорожание проекта энергоблока и предприятий топливного цикла и может снизить его привлекательность для заказчика. Согласно [3] увеличение стоимости строительства АЭС, вызванное необходимостью применения гарантий МАГАТЭ, составляет 0,1—0,2% проектной. Увеличение стоимости завода по переработке отработавшего топлива и изготовлению свежего существенно больше и составляет уже 1—2% проектной [3]. Эти затраты напрямую необходимо учитывать в проекте поставляемой за рубеж АЭС с пристанционным ядерным топливным циклом. Следует также уточнить, что в отличие от затрат на непосредственное осуществление гарантий затраты на подготовку к ним несет организация-оператор объекта.

Затраты на осуществление гарантий МАГАТЭ оценивать сложно. Применительно к АЭС практика их определения опирается на расчет рабочего времени инспекторов МАГАТЭ [4]. Оценка затрат на предприятиях ядерного топливного цикла носит более сложный характер в силу малой доступности исходных данных. В работах [14, 15] такая оценка выполнена на основе масштаба инспекционной деятельности. В качестве единицы измерения использовалось значимое количество ядерного материала, в отношении которого осуществляются меры гарантий МАГАТЭ, в качестве меры затрат — данные МАГАТЭ об удельной стоимости применения гарантий МАГАТЭ на одно значимое количество ядерного материала. В соответствии с [16] значимое количество определяется как примерное количество ядерного материала, из которого

не исключена возможность создания ядерного взрывного устройства или его части.

Рассмотрим модельную задачу постановки под гарантии МАГАТЭ двух АЭС с быстрым реактором одинаковой мощности: без пристанционного топливного цикла и с его наличием. Для определенности в качестве исходных прием параметры реактора БР-1200 [17]. С учетом того, что в обоих случаях быстрые реакторы одинаковы, различие в реализации процедур гарантий МАГАТЭ будет определяться организацией их топливного цикла. В одном случае выгруженное из активной зоны топливо после выдержки загружается в транспортно-упаковочный комплект и перевозится на централизованную переработку, в другом переработка осуществляется непосредственно на площадке АЭС.

Особенностью обеих АЭС при применении процедур гарантий МАГАТЭ является наличие труднодоступной зоны, где ТВС находится под слоем жидкометаллического теплоносителя и отработанные для легководных реакторов проверочные мероприятия невозможны. Пока реактор работает на мощности, инспектор имеет доступ только в хранилища свежего и отработавшего топлива, а также может проверить целостность устройств индикации вмешательства. Проверка потока ядерного материала через труднодоступную зону может осуществляться только во время перегрузки реактора на входе и выходе с одновременным применением средств сохранения и наблюдения. Условно все сценарии переключения ядерного материала можно разделить на две группы [9]: единовременное переключение, при котором на незаявленные цели сразу переключается значимое количество ядерного материала, и постепенное, при котором переключаемое значимое количество ядерного материала накапливается в течение некоторого времени. Подходы к применению гарантий МАГАТЭ в отношении быстрого реактора без пристанционного топливного цикла с точки зрения реализации обоих сценариев переключения хорошо проработаны [9]. Следует отметить, что сценарий постепенного переключения на такой АЭС, например, с БН-1200, БН-600, -800 практически нереализуем: неразборная конструкция шестигранной ТВС с тесной решеткой, проволочным дистанционированием и стальным чехлом при отсутствии на АЭС оборудования

для ее разделки делает такой сценарий практически невозможным. В случае бесчехловой ТВС необходим отдельный анализ.

Облученные ТВС на АЭС без пристанционного топливного цикла перед отправкой проверяются методами визуального контроля и неразрушающего анализа на основе рассчитанного объема выборки, помещаются в транспортный контейнер и пломбируются. Согласно [9] такая процедура может занимать до четырех недель, при этом она может совмещаться с проверками свежего топлива, которые осуществляются чаще. В случае пристанционного топливного цикла реализация процедур гарантий МАГАТЭ неизбежно будет отличаться от описанной [9].

Хранилища свежего и отработавшего топлива обслуживают не только реактор, но и заводскую технологическую цепочку, которая с точки зрения инспектора МАГАТЭ позволяет реализовать сценарии с постепенным переключением ядерного материала. Для этого имеется все необходимое: оборудование для вскрытия ТВС, цех переработки, где ядерный материал находится в балк-форме, т.е. в виде газа, жидкости, порошка или большого количества твердых предметов, не имеющих индивидуальных номеров или других идентификаторов, а не в форме учетных единиц, поступающий извне ядерный материал — обедненный уран, который используется в технологическом процессе и может быть применен для создания незаявленных зон воспроизводства или подмены плутония в твэлах, конструкционные материалы и др. Кроме того, при работе с коэффициентом воспроизводства чуть более 1 теоретически существует возможность производить немного больше плутония, чем необходимо для изготовления комплекта ТВС на перегрузку. Так, в рассмотренном примере реактора БР-1200 [17] при работе в равновесном режиме перегрузок в выгружаемых и направляемых на переработку ТВС содержится на 91 кг плутония больше, чем в загружаемых ТВС, что соответствует значимым количествам плутония чуть более 11 по терминологии МАГАТЭ. Значимое количество плутония соответствует 8 кг. Подтверждение заявленного использования избыточного плутония для производства топлива является сложной задачей. Длительность периода, на котором реактор с пристанционным топливным циклом переходит в установившийся режим перегрузок, не всегда

может быть предсказана точно, кроме того, она зависит от стартовой загрузки: по данным [17] она составила 9 лет, [18] для того же реактора — 38 лет, т.е. две трети срока службы реактора. Избыточный плутоний должен каким-то образом быть израсходован на перегрузках и это должно получить подтверждение во время инспекций. Все это существенным образом скажется на их длительности. Если для АЭС без пристанционного топливного цикла длительность инспекций может составлять 90—120 сут в год — примерно в 2—3 раза больше, чем на АЭС с легководным реактором, то завод на площадке АЭС с пристанционным топливным циклом будет подвергаться непрерывным проверкам [1].

Для оценки в таблице приведены полученные с интернет-сайта МАГАТЭ некоторые данные, содержащие информацию о денежных затратах на осуществление гарантий МАГАТЭ. Их прямое использование в экономическом анализе затруднительно, поскольку при расчете удельных затрат на осуществление гарантий МАГАТЭ в отношении одного значимого количества ядерного материала не выделены затраты как по категориям ядерных материалов, поставленных под гарантии, так и по типам установок. Основная масса поставленных под гарантии объектов — легководные реакторы и связанные с ними хранилища свежего и отработавшего топлива. Число заводов, поставленных под гарантии, незначительно, для оценки их вклада в удельные затраты на осуществление гарантий информации недостаточно. Однако при экспорте установок с пристанционным топливным циклом следует ожидать роста этого показателя и более быстрого повышения затрат на гарантии

в целом, а также требуемых взносов со стороны стран-доноров по сравнению с размещением перерабатывающего завода на территории России. Необходимо также понимать, что недостаток средств на осуществление гарантий, т.е. выполнение основной функции МАГАТЭ может сначала привести к сокращению остальных научных, образовательных и гуманитарных программ, финансируемых агентством, впоследствии к неспособности полностью выполнять свои функции, что вряд ли окажет положительное влияние на развитие ядерной энергетики.

Кроме того, следует отметить следующее. В бюджете МАГАТЭ [19] видно, что затраты, связанные с осуществлением гарантий, повышаются в ценах соответствующего года. В частности, бюджет 2019 и 2020 гг., связанный непосредственно с гарантиями, увеличивается со 141,9 (в ценах 2019 г.) до более чем 151 млн евро (в ценах 2021 г.). Отметим, что доля бюджета агентства, которая относится к осуществлению гарантий, за это же время почти не изменяется — 37% в 2019 г. и 38% в 2021 г. Расчеты выполнены в ценах соответствующего года. Такое слабое изменение можно отнести к инфляционному росту, в постоянных ценах бюджет остается неизменным.

В заключение необходимо отметить, что оценка экономических затрат на осуществление гарантий МАГАТЭ вследствие экспорта АЭС с быстрым реактором, в том числе с установками пристанционного топливного цикла является актуальной и требующей всестороннего анализа, однако ее выполнение невозможно без предварительной разработки процедур гарантий МАГАТЭ на АЭС с быстрыми реакторами и пристанционным ядерным топливным циклом.

Затраты на осуществление гарантий МАГАТЭ в 2014—2019 гг.

Объем осуществления гарантий	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.
Значимое количество ядерного материала	193 500	200 110	204 073	208 889	212 814	216 448
Число ядерных установок и мест нахождения вне установок	1300	709	1290	1298	1314	1324
Регулярный бюджет, млн евро	131	132,5	135	139,3	138,6	142,9
Внебюджетные взносы, млн евро	31,8	—	40,5	23,1	18,9	20,2
Затраты на гарантии на одно значимое количество ядерного материала, евро	841	662	860	777	740	754

Авторы выражают признательность Ю.Н. Волкову, сделавшему ряд ценных замечаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Толченков Д.Л. Технические основы гарантий МАГАТЭ. — Атомная энергия, 1985, т. 58, вып. 6, с. 396—401.
2. Пелло Б. Гарантии: общая картина. — Бюл. МАГАТЭ, 1996, т. 38, № 4, с. 2—6.
3. Кларк Дж. Международные гарантии: точка зрения промышленности. — Там же, с. 25—28.
4. Ермаков С.В., Пыхтин Ю.Д., Бумблис И.И. и др. Возможные процедуры гарантий МАГАТЭ для АЭС с реактором ВВЭР-1000. Технические рекомендации: Препринт ЦНИИАтоминформ М-1-87, 1987. 68 с.
5. Хармс Н., Родригес П. Гарантии на легководных реакторах: сложившаяся практика и тенденции на будущее. — Бюл. МАГАТЭ, 1996, т. 38, № 4, с. 16—19.
6. Цукарро-Лаберарте Дж., Фагерхольм Р. Гарантии на исследовательских реакторах: сложившаяся практика и тенденции на будущее. — Там же, с. 20—24.
7. Хромов В.В., Глебов В.Б., Комлев О.Г. и др. Обработка результатов неразрушающего контроля облученного топлива посредством решения экстремальных задач. — Атомная энергия, 1992, т. 73, вып. 6, с. 459—462.
8. Хромов В.В., Савандер В.И., Глебов В.Б. и др. Контроль содержания делящихся элементов в отработавшем топливе исследовательских реакторов. — Там же, 1990, т. 69, вып. 6, с. 400—402.
9. Ермаков С.В., Нерсисян А.Н., Цыпленков В.С. Анализ применения гарантий МАГАТЭ на реакторах на быстрых нейтронах: Препринт ЦНИИАтоминформ М-1, 1985. 52 с.
10. Глазов А.Г., Леонов В.Н., Орлов В.В. и др. Реактор БРЕСТ с пристанционным ЯТЦ. — Атомная энергия, 2007, т. 103, вып. 1, с. 15—20.
11. Гулевич А.В., Декусар В.М., Чебесков А.Н. и др. Возможность экспорта быстрых реакторов в условиях международного режима ядерного нераспространения. — Там же, 2019, т. 127, вып. 3, с. 171—175.
12. Аврорин Е.Н., Чуриков Ю.И. Режим нераспространения и экспортный контроль. — Там же, 2018, т. 124, вып. 1, с. 42—46.
13. Аврорин Е.Н., Чебесков А.Н. Быстрые реакторы и проблема ядерного нераспространения. — Изв. вузов. Ядерная энергетика, 2014, № 1, с. 64—76.
14. Невиница В.А., Пшакин Г.М., Пупко Л.П. и др. Об оценке эксплуатационной составляющей на применение гарантий МАГАТЭ в сценариях утилизации плутония в ядерном топливном цикле: Препринт ФЭИ-2758, 1999. 12 с.
15. Пшакин Г.М., Андрианов А.А., Коровин Ю.А. Анализ влияния возможных сценариев развития ядерной энергетики на масштабы инспекционной деятельности по обеспечению режима нераспространения. — Изв. вузов. Ядерная энергетика, 2007, № 3, с. 10—19.
16. IAEA Safeguards Glossary. International Nuclear Verification Ser., 2001, № 3 Ed., IAEA.
17. Львова Е.М., Чебесков А.Н. Анализ привлекательности ядерных материалов применительно к пристанционному топливному циклу реактора естественной безопасности БР-1200. — Изв. вузов. Ядерная энергетика, 2007, № 2, с. 106—117.
18. Волков И.А., Симоненко В.А., Макеева И.Р. и др. Использование обогащенного урана в быстром реакторе со свинцовым теплоносителем. — Атомная энергия, 2016, т. 121, вып. 1, с. 20—24.
19. The Agency's Programme and budget 2020—2021, GC(63)/2 July 2019. www.iaea.org (дата обращения 28.11.2020).

Поступила в Редакцию 13.12.20

Р е ф е р а т ы

УДК 621.039.53:621.039.526

Фадеев И.Д., Дмитриева И.В., Пахолов В.В., Рогожкин С.А., Шепелев С.Ф. Уточнение параметров реакторной установки и теплогидравлических характеристик основного оборудования по результатам ввода энергоблока с БН-800 в эксплуатацию. — Атомная энергия, 2021, т. 131, вып. 2, с. 63—68.

В работе описаны программы, используемые для обоснования теплогидравлических характеристик оборудования и параметров быстрых натриевых реакторов в режимах нормальной эксплуатации. Приведена фактическая эффективность теплопередачи в ПТО БН-800, выполнен сравнительный анализ с расчетными данными, полученными в одно- и двумерном приближении. Предложен запас по поверхности теплообмена, который может быть принят при

проектировании аналогичного рассмотренному в статье ПТО.

Проанализированы фактические гидравлические характеристики первого, второго контуров БН-800, определена рабочая частота вращения ГЦН-1, -2. Показано, что рабочая частота вращения ГЦН-1, -2 ниже проектной на 5 и 8% соответственно.

Сравнение эксплуатационных и расчетных теплогидравлических параметров БН-800 в режимах нормальной эксплуатации показало удовлетворительное совпадение. Подтверждена правильность заложенных в проекте БН-800 алгоритмов режимов пуска и планового останова. Рис. 4, список лит. 4 назв.

Продолжение см. на с. 116