

## БЫСТРЫЕ РЕАКТОРЫ И ПРОБЛЕМА ЯДЕРНОГО НЕРАСПРОСТРАНЕНИЯ

**Е.Н. Аврорин \***, **А.Н. Чебесков \*\***

\* *РФЯЦ-ВНИИТФ им. Е.И. Забабахина, г. Снежинск*

\*\* *ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ» им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск*



Рост числа стран, желающих использовать ядерную энергию, и расширение географии размещения АЭС может привести к увеличению риска распространения в связи с тем, что лидеры некоторых стран захотят приобрести или разработать чувствительные ядерные технологии. Определенный риск распространения через технологии и материалы ядерной энергетики нельзя исключить полностью. В ядерном топливном цикле находится огромное количество ядерных материалов, в том числе делящихся – многие сотни и тысячи тонн. Проблема ОЯТ с плутонием в нем, особенно для новичков и стран с небольшой программой ядерной энергетики, также ведет к увеличению риска распространения, включая возрастающий риск возможных акций со стороны субнациональных и террористических организаций из-за распространения ядерных технологий и материалов при их ненадлежащей защите в этих странах.

Для тепловых реакторов обогащение урана является обязательным элементом для производства топлива. При длительном хранении ОЯТ тепловых реакторов в открытом топливном цикле, который реализуется сегодня, возрастает риск распространения из-за ослабления радиационного барьера со временем и возможным несанкционированным изъятием этого топлива государством-пролифератором, и его хищением криминальными и террористическими элементами.

Для быстрых реакторов, запускаемых и работающих на плутониевом топливе, не требуется технологии обогащения урана. В замкнутом топливном цикле не предусматривается длительное хранение ОЯТ. Постепенное замещение тепловых реакторов быстрыми в связи с дефицитом природного урана создает предпосылки для постепенного отказа от обогащения урана. Хотя страны, имеющие небольшую программу развития ядерной энергетики и, следовательно, небольшое количество блоков, будут продолжать длительное время эксплуатировать тепловые реакторы, для которых необходима технология обогащения урана.

Создание на основе гражданского плутония ядерного оружия с более простой конструкцией «пушечного типа» практически невозможно из-за высокого нейтронного фона такого плутония. Однако это не исключает попыток изготовления примитивного ЯВУ группой террористов.

При запуске быстрых реакторов на урановом топливе с последующим переходом на плутониевое топливо будут использоваться обе чувствительные технологии: обогащение урана и переработка ОЯТ (с выделением плутония). В этом случае плутоний с небольшим содержанием высших изотопов будет образовываться не только в бланкете, но и в активной зоне реактора в значительно больших количествах.

Рассматриваются различные технологические и институциональные подходы к решению проблемы бланкетов быстрых реакторов с точки зрения обеспечения надежного режима ядерного нераспространения.

**Ключевые слова:** ядерный топливный цикл, нераспространение ядерного оружия, делящиеся материалы, быстрые реакторы, тепловые реакторы, плутоний, обогащенный уран.

## **ВВЕДЕНИЕ**

За более чем 50 лет своего существования мировая ядерная энергетика прошла большой путь в своем развитии и получила широкое географическое распространение. И все же основные ядерные технологии, хотя и претерпели за это время определенные изменения в сторону их усовершенствования, остаются наследием военной деятельности и требуют пристального внимания по обеспечению режима нераспространения.

Развитие системы атомной энергетике и ее инфраструктуры с наличием в системе большого количества делящихся материалов создает мотивы или предпосылки, при которых мирный материал ядерного топливного цикла (ЯТЦ) может быть переключен на создание ядерного оружия (ЯО) либо похищен с целью создания ядерных взрывных устройств (ЯВУ).

Решение администрации Президента США Картера от 1978 г. по отказу от переработки ОЯТ и свертыванию работ по быстрым реакторам-бридерам под предлогом риска ядерного распространения при использовании плутония в быстрых реакторах нанесло большой вред развитию этой технологии в США, равно как и в некоторых других странах. Кроме того (в основном, благодаря США), в мире сформировалось негативное мнение о быстрых реакторах и их ЯТЦ как наиболее опасных с точки зрения ядерного нераспространения. Вместе с тем в этом решении администрации Картера ничего не говорилось об опасности распространения за счет технологии обогащения урана. По-видимому, это произошло оттого, что в то время в США были неудачи с разработкой центрифужной технологии обогащения, да и сами центрифуги американской конструкции представляли собой довольно громоздкие сооружения высотой до 12 м. А продемонстрированная в то время газо-диффузионная технология была реализована на предприятиях, представляющих собой огромные сооружения, потребляющие большое количество электроэнергии и воды. Например, завод в Падьюке в штате Кентукки производительностью ~7 млн. ЕРР/г., пущенный в 1954 г., потреблял 22 млрд. кВт·ч в год, а расход охлаждающей воды для этого завода превышал в несколько раз расход воды водопроводной сети Нью-Йорка [1].

Естественно было тогда вообразить, что такой объект невозможно «спрятать» для тайного производства обогащенного урана. Успехи центрифужной технологии, особенно в СССР, небольшие размеры центрифуг – до одного метра высотой, снижение в несколько раз потребления электроэнергии и воды выявили определенный риск возможности организации скрытого производства высокообогащенного урана.

## **ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ**

### **Существующие определения ядерного нераспространения**

Одно из первых определений понятия «распространение» появилось в публикации американских ученых П. Сильвеннойнена и Дж. Вира в 1986 г.: «The development of the material and technical resources required for the production of nuclear explosives in countries that now do not have such a capability» – «Разработка материалов и технических ресурсов, требующихся для производства ядерных взрывных устройств в странах, которые не имеют сейчас такой способности» [2].

Позже понятие «нераспространение» было конкретизировано применительно к ядерным энергетическим системам. Так в международном проекте ИНПРО дается

следующее определение «нераспространению» или «защищенности от распространения» ядерной энергетической системы: «Защищенность от распространения (устойчивость к распространению) определяется как характеристика ядерной энергосистемы, которая затрудняет (препятствует) переключение или незаявленное производство ядерного материала, или незаявленное использование технологии государствами, направленные на обладание ядерным оружием или другими ядерными взрывными устройствами» [3].

В Международном Форуме «Поколение – IV» принято практически точно такое же определение «защищенности от распространения», как и в ИНПРО: «Спротивляемость распространению есть такая характеристика ядерно-энергетической системы, которая затрудняет (препятствует) переключение или незаявленное производство ядерного материала или незаявленное использование технологии государством-владельцем для того, чтобы обладать ядерным оружием или другими ядерными взрывными устройствами». Это определение в Международном Форуме «Поколение – IV» используется совместно с понятием «физическая защита»: «Физическая защита есть такая характеристика ядерно-энергетической системы, которая затрудняет (препятствует) хищение материалов, пригодных для ядерных взрывных или радиационных рассеивающих устройств, а также акты саботажа установок и транспорта субнациональными организациями и другими не принадлежащими к государству-владельцу противниками» [4].

Как видно из сравнения приведенных определений «нераспространения», в обоих международных проектах речь идет о распространении на государственном уровне. При этом в Международном Форуме «Поколение – IV» специальное внимание обращается также и на физическую защиту по предотвращению актов ядерного терроризма, которые могут быть совершены субнациональными организациями и группировками, не принадлежащими к государству-владельцу.

#### **Возможные пути распространения через ЯТЦ**

Ядерная энергетика – не единственный путь к созданию ядерного оружия; в то же время под прикрытием ядерной энергетики пороговым государствам возможно проще осуществить скрытое создание ядерного оружия.

Исходные делящиеся материалы ЯТЦ могут быть переработаны в подходящие для использования в оружии на государственном уровне или похищены субнациональными или криминальными группами.

На государственном уровне возможны следующие шаги в направлении создания ядерного оружия:

- использование ядерных технологий, установок и материалов ядерной энергетике для скрытой военной программы;
- использование знаний и опыта специалистов ядерной энергетике для параллельной скрытой военной программы;
- выход из ДНЯО и прямое использование технологий, установок и материалов ЯТЦ для военных целей.

На субнациональном (террористическом) уровне – хищение ядерных материалов с предприятий ЯТЦ для создания примитивного ЯВУ или «грязной бомбы».

#### **Возможное увеличение риска распространения в современных условиях**

До аварии в Японии в марте 2011 г. на АЭС Фукусима-Даиичи примерно 40 стран заявляли о своем желании использовать ядерную энергию в мирных целях. Несмотря на аварию в Японии число таких стран остается значительным, и по прогнозным оценкам примерно 15–20 стран будут иметь первые ядерные энергетические блоки на своей территории к 2030 г. [5].

Рост числа стран, желающих использовать ядерную энергию, и расширение гео-

графии размещения АЭС может привести к увеличению риска распространения в связи с тем, что лидеры некоторых стран могут захотеть приобрести или разработать чувствительные ядерные технологии.

В последнее время в связи с интенсивной деятельностью Ирана в направлении обогащения урана у некоторых стран возникают подозрения, что Иран стремится к разработке ядерного оружия. Не останавливаясь на обоснованности этих подозрений следует отметить, что некоторые страны, соседствующие с Ираном, также озабочены этим вопросом. В частности, британская газета The Guardian сообщает 30 июня 2011 г., что Саудовская Аравия предупредила НАТО, что будет добиваться получения ядерного оружия, если его создаст Иран [6]. В этой связи можно предположить, что создание ядерного оружия Ираном может вызвать «цепную реакцию» в странах-соседах по приобретению (созданию) такого оружия и, как результат, появление целого ряда пороговых стран.

Де-факто появление ядерного оружия у Индии и Пакистана, испытания ядерных устройств в Северной Корее и бессилие мирового сообщества предотвратить эти действия служит примером для других неустойчивых режимов по обладанию ядерным оружием. По-видимому, Договор о нераспространении ядерного оружия (ДНЯО) нуждается в значительной модернизации, чтобы странам было невыгодно и политически, и экономически приобретать или разрабатывать ядерное оружие. Необходимо также разработать международный механизм компенсаций за отказ от разработки или овладения ядерным оружием.

Для стран-новичков, вступающих на путь использования ядерной энергии, важной дилеммой будет выбор: либо создавать собственную инфраструктуру ядерной энергетике, в частности, по обращению с ОЯТ, либо пользоваться услугами других стран, которые имеют такую развитую инфраструктуру. Проблема с ОЯТ и плутонием в нем, особенно для новичков и стран с небольшой программой ядерной энергетике, также ведет к увеличению риска распространения, включая возрастающий риск возможных акций со стороны субнациональных и террористических организаций из-за распространения ядерных технологий и материалов при их ненадлежащей защите в этих странах.

### **ДЕЛЯЩИЕСЯ МАТЕРИАЛЫ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

Определенный риск распространения через технологии и материалы ядерной энергетике нельзя исключить полностью. В ядерном топливном цикле находится огромное количество ядерных материалов, в том числе делящихся – многие сотни и тысячи тонн. Для изготовления одной ядерной бомбы достаточно десятков килограммов и менее.

Хотя уран и плутоний могут быть использованы для производства ядерной взрывчатки, между ними существует принципиальное различие с точки зрения снижения риска распространения. Оно заключается в том, что высокообогащенный уран может быть «механически» разбавлен низкообогащенным или природным ураном с потерей его способности к цепной реакции деления. Восстановить эту способность у разбавленного урана можно только используя технологию и оборудование для его обогащения, доступ к которым весьма ограничен. Возможность же отделения плутония от других элементов, с которыми он может быть смешан, гораздо проще, т.к. для этого потребуется только химическая очистка.

С другой стороны, если сравнить ядерно-физические свойства урана и плутония, то оказывается, что плутоний в отличие от урана обладает определенными свойствами самозащищенности, которые могут затруднить создание ЯВУ. К таким свойствам относятся собственный нейтронный фон, тепловыделение, ра-

диоактивность. Конечно, проявление этих свойств зависит от содержания определенных изотопов в плутонии. Обогащенный уран также обладает подобными свойствами, но они на порядки слабее, чем у плутония, поэтому не могут оказывать сколько-нибудь заметного влияния на создание ЯВУ.

Представляется также очевидным, что в отличие от намерений террористических групп государство-пролифератор заинтересовано в создании «хорошего» ядерного оружия, т.е. оружия значительной разрушительной силы. Для создания такого оружия из урана требуется технология его обогащения (либо наработка урана-233 из тория) и относительно простая конструкция ЯВУ «пушечного типа». В связи с этим проблема нераспространения ядерного оружия с использованием технологии обогащения урана приобретает особую остроту.

При использовании плутония для этой цели годится плутоний определенного качества и довольно сложный дизайн взрывного устройства по типу имплозии. При этом, однако, нельзя заведомо отрицать, что гражданский плутоний также не является целью государства-пролифератора.

### **ОСОБЕННОСТИ БЫСТРЫХ И ТЕПЛОВЫХ РЕАКТОРОВ В ОБЛАСТИ НЕРАСПРОСТРАНЕНИЯ**

Две технологии, разработанные в период создания первых образцов ядерного оружия, – обогащение урана и переработка облученного топлива с выделением плутония – являются в настоящее время наиболее чувствительными технологиями ядерной энергетики, которыми обладают ограниченное число стран. Разумно предположить, что увеличение числа стран, обладающих этими технологиями, ведет к увеличению риска распространения ядерного оружия.

Для тепловых реакторов технология обогащения урана является необходимой в производстве топлива. При длительном хранении отработавшего топлива тепловых реакторов в открытом топливном цикле, который реализуется сегодня, возрастает риск распространения из-за ослабления радиационного барьера со временем, возможного несанкционированного изъятия этого топлива государством-пролифератором и его хищения террористической группой.

Для быстрых реакторов, запускаемых и работающих на смешанном уран-плутониевом топливе, не требуется применения технологии обогащения урана. В замкнутом топливном цикле не предусматривается длительное хранение отработавшего топлива. С учетом сравнительно небольшой технологической выдержки после выгрузки из реактора это топливо будет направляться на переработку. Постепенное замещение тепловых реакторов быстрыми в связи с дефицитом природного урана создает предпосылки для постепенного отказа от обогащения урана. Хотя страны, имеющие небольшую программу развития ядерной энергетики и, следовательно, небольшое количество блоков, будут продолжительное время эксплуатировать тепловые реакторы, для которых необходима технология обогащения урана.

Создание на основе гражданского плутония ядерного оружия с более простой конструкцией «пушечного типа» практически невозможно из-за высокого нейтронного фона такого плутония. Однако это не исключает попыток изготовления примитивного ЯВУ группой террористов.

Для конструкции «имплозийного типа» требуется высокоразвитая технология, тестовые испытания отдельных компонентов ЯВУ (например, взрывчатых линз) и работоспособности самого устройства. Представляется, что это может осуществить только государство-пролифератор и то при условии достаточно развитой технологической и промышленной инфраструктуры в стране.

### Запуск и работа быстрых реакторов на плутонии

Еще на заре атомной энергетике Э. Ферми выдвинул идею, что первые быстрые реакторы будут запускаться на плутонии, который будет нарабатываться в тепловых реакторах мирной ядерной энергетике (гражданский плутоний). В гражданском плутонии наблюдается высокое содержание его четных изотопов, дающих значительный нейтронный фон. Высокое содержание плутония-238 приводит к достаточно большому тепловыделению, а распад плутония-241 – к проблемам радиационного характера.

Облученное в быстром реакторе топливо, изготовленное на основе гражданского плутония, будет содержать плутоний, изотопный состав которого принципиально не отличается от изотопного состава исходного плутония в свежем топливе.

Вообще говоря, изотопный состав плутония, выгружаемого из реакторов различных типов и поступающего во внешний топливный цикл системы ядерной энергетике, будет изменяться во времени, достигая в пределе некоторого равновесного состава. Равновесный состав плутония в системе будет определяться исходя из количественного соотношения быстрых и тепловых реакторов в системе, а также из условий смешивания нарабатываемого плутония.

Расчеты, проведенные на примере модели быстрого реактора типа БН-800, дали результаты, представленные в табл. 1.

Таблица 1

#### Изменение изотопного состава плутония в быстром реакторе

Изотопный состав плутония, % Pu-239/Pu-240/Pu-241/Pu-242		Равновесный состав плутония, % Pu-239/Pu-240/Pu-241/Pu-242
Загружаемый в реактор	Выгружаемый из реактора	
100/0/0/0	89,2/10,5/0,3/0,02	59,3/31,4/5,7/3,6
60/25/10,9/4,1	58,7/28,4/8,1/4,8	49,1/35,9/7,9/7,1
55/20,8/17,8/5,9	57,5/24,3/11,1/7,1	53,2/33,0/7,3/6,5
43,2/38,8/10,3/7,7	43,8/38,8/9,2/8,2	45,5/37,9/7,9/8,7
41/40/8/11	41/40/8/11	41/40/8/11

Таким образом, при запуске и работе быстрых реакторов на плутониевом топливе в активной зоне образуется плутоний довольно плохого качества с точки зрения использования его в ядерном оружии.

Совсем другое дело обстоит с быстрыми реакторами, которые имеют внешние зоны воспроизводства – бланкеты. Известно, что в бланкетах быстрых реакторов накапливается плутоний, по изотопному составу близкий к оружейному [7]. Это представляет определенный риск распространения, т.к. такой плутоний, имеющий небольшое содержание высших изотопов и плутония-238, может фактически без дополнительной переработки использоваться в ядерном оружии.

Наряду с институциональными мерами возможны следующие технологические решения этой проблемы:

- совместное обращение и переработка отработавших ТВС активной зоны и облученных сборок бланкета;
- невыделение чистого плутония при переработке ОЯТ и сборок бланкета, например, выделяется смесь состоящая из 50% урана и 50% плутония;
- отказ от бланкета в проектах быстрых реакторах, которые проектируются в экспортном исполнении для поставки в страны, не имеющие ядерного оружия;
- организация международных центров по оказанию услуг в области ЯТЦ.

При экспортных поставках АЭС с быстрыми реакторами необходим полный и безусловный возврат в страну поставщика отработавших ТВС активной зоны, равно как и облученных сборок blankets. Для этого потребуются детальный мониторинг их облучения в реакторе, постоянный контроль нахождения в бассейне выдержки, контроль возврата в страну поставщика или в международный центр по оказанию услуг ядерного топливного цикла.

Отказ от blankets в быстром реакторе, с одной стороны, устраняет возможность наработки плутония по изотопному составу, близкому к оружейному, с другой – приводит к снижению коэффициента воспроизводства быстрого реактора и в результате – к потере того дополнительного плутония, который мог бы использоваться для дальнейшего наращивания мощностей как быстрых, так и тепловых реакторов.

### Запуск быстрых реакторов на обогащенном уране

Ранее уже отмечалось, что в открытом топливном цикле наибольший риск представляют распространение технологии обогащения урана и долговременное хранение отработавшего ядерного топлива. В замкнутом ядерном топливном цикле наибольший риск распространения имеет место на стадии временного хранения выделенного плутония, изготовления свежего плутониевого топлива и транспортировки свежих ТВС на АЭС. При использовании технологии невыделения чистого плутония при переработке ОЯТ этот риск значительно снижается. Ограниченное время промежуточного хранения отработавших ТВС и нахождения плутоний-содержащих материалов на всех этапах переработки представляет собой минимальный риск. При этом, как уже отмечалось, своевременная переработка ОЯТ в ЗЯТЦ исключает риск долгосрочного хранения ОЯТ.

В настоящее время в России исследуется вариант запуска быстрых реакторов на обогащенном уране с постепенным переходом на смешанное уран-плутониевое топливо с использованием собственного плутония. Такой вариант позволяет быстрым реакторам быть независимыми от наличия плутония тепловых реакторов и не испытывать возможных проблем ввода, связанных с ограничениями по топливу на основе плутония.

При запуске быстрых реакторов на урановом топливе с последующим переходом на смешанное уран-плутониевое будут использоваться обе чувствительные технологии: обогащение урана и переработка отработавшего топлива. В этом случае плутоний с небольшим содержанием высших изотопов будет образовываться не только в blankets, но и в активной зоне реактора в значительно больших количествах.

В таблице 2 приведены изотопные составы плутония, который нарабатывается в урановом топливе активной зоны быстрых реакторов БН и БРЕСТ, полученные на основе оценок из предварительных расчетов [8,9].

Таблица 2

### Изотопный состав плутония в отработавшем урановом топливе быстрых реакторов

Тип реактора	Выгорание топлива	Изотопный состав плутония, %				
		Pu-238	Pu-239	Pu-240	Pu-241	Pu-242
Оружейный Pu [6]	–	0.012	93.8	5.8	0.35	0.022
БН-1200 с UO <sub>2</sub>	Кампания 5 лет	0.4	91.8	7.7	0.3	0.02
БРЕСТ-1200 с UN	Кампания 5 лет	0.1	95.5	4.3	0.1	0.003

Как видно из таблицы, содержание плутония-239 и высших изотопов весьма близко к таковому для оружейного плутония за исключением плутония-238, содер-

жание которого примерно в 10 раз выше для реактора БРЕСТ и примерно в 40 раз выше для реактора БН по сравнению с оружейным плутонием.

Плутоний-238 является основным источником тепловыделения в плутонии. Детальный анализ температур для различных моделей ядерных взрывных устройств с использованием гражданского плутония провел известный немецкий ученый Г. Кесслер. Результаты его последних исследований вошли в монографию, опубликованную в 2011 г. [10].

Профессор Кесслер разработал, пользуясь только открытыми источниками информации, подробную схему ядерного взрывного устройства и проанализировал механизм передачи тепла от плутония, содержащегося в ядерном заряде к взрывным линзам для четырех вариантов использования гражданского плутония с различным содержанием плутония-238 (табл. 3).

Таблица 3

**Варианты с различным содержанием плутония-238, проанализированные Кесслером**

	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Содержание Pu-238 в гражданском плутонии, %	1.8	3.6	7	6.2
Тепловыделение в ядерном заряде, кВт	0.12	0.24	0.46	0.40

В первом варианте рассматривается использование во взрывных линзах химической взрывчатки баратол или «состав В», которые применялись в первых образцах ядерного оружия. Эти типы взрывчатки имеют сравнительно невысокую температуру плавления – не выше ~80 °С, при достижении которой разрушается конструкция взрывных линз.

Во втором варианте рассматривается использование современной химической взрывчатки с более высокими теплопроводностью и точкой плавления, способной выдержать высокие температуры без потери своих свойств. Такие взрывчатки, как DATB, HMX, PBX 9011, PBX 9404, PBX 9407, PBX, сохраняют работоспособность до ~190 °С, а некоторые из них до ~250 °С и даже выше.

По результатам проведенных исследований с использованием современных прецизионных расчетных кодов делается вывод о том, что для охлаждения таких устройств (варианты 1 и 2) не требуется применения специальных мер; охлаждение будет происходить естественным способом за счет излучения тепла и конвекции воздуха. Используемая в этих устройствах химическая взрывчатка сохраняет свои свойства.

В третьем варианте рассматривается возможность сохранения работоспособности изделия за счет принудительного охлаждения ядерного заряда жидким гелием.

В четвертом варианте также можно сохранить работоспособность изделия за счет помещения во взрывчатые линзы стержней, изготовленных из материала с высокой теплопроводностью [7].

Основной вывод, который делает профессор Кесслер по результатам проведенных исследований, заключается в том, что плутоний, в котором содержание плутония-238 превышает приведенные выше величины, может рассматриваться как самозащищенный с точки зрения распространения. Таким образом, при использовании в ЯВУ устаревших образцов химической взрывчатки можно допустить содержание плутония-238 в плутониевом заряде до 1.8% без каких-либо ухищрений по принудительному охлаждению. При использовании современных взрывчатых веществ содержание плутония-238 в плутониевом заряде может достигать 3.6% также без применения каких-либо мер по принудительному охлаждению. Следует

отметить, что примерно такие концентрации плутония-238 достигаются в урановом ОЯТ легководных реакторов при глубинах выгорания 33 и 60 Гвт-сут/т.

Таким образом, повышенное содержание плутония-238 в отработавшем топливе быстрых реакторов, запускаемых на уране, не может рассматриваться в качестве технологического барьера при использовании такого плутония в ядерном оружии.

### ОБОГАЩЕНИЕ УРАНА И ПРОБЛЕМА ЯДЕРНОГО НЕРАСПРОСТРАНЕНИЯ

В связи с разработкой варианта старта быстрых реакторов на урановом топливе были проведены исследования по проблеме ядерного нераспространения, которые позволили сделать основной вывод: государство-пролифератор, получивший технологию обогащения тем или иным путем, будет стремиться осуществить свои замыслы по обладанию ядерным оружием за счет наработки урана с достаточно высоким обогащением, так как требуется

- сравнительно небольшое количество делящегося материала, что ведет к более «быстрому» устройству, и, как правило, к большему выходу энергии при взрыве;
- меньшее количество исходного материала – природного урана;
- меньшее количество работы разделения (ЕРР);
- меньше времени.

Для оценки пригодности делящегося материала для изготовления ЯО или примитивного ЯВУ вводится понятие или фактор *привлекательности материала*. Это понятие является важной составной частью существующих методологий, которые используются для оценки сопротивляемости ЯТЦ коммерческих АЭС переключению или хищению ядерных материалов [11]. Функция привлекательности обогащенного урана имеет вид

$$A(x) = \text{mod}[1.8 \cdot (2x - 1) \cdot \ln[x/(1-x)] - 0.90].$$

Подставляя значения обогащения урана  $x$ , получим соответствующие значения привлекательности. На рисунке 1 представлен график функции  $A(x)$ .

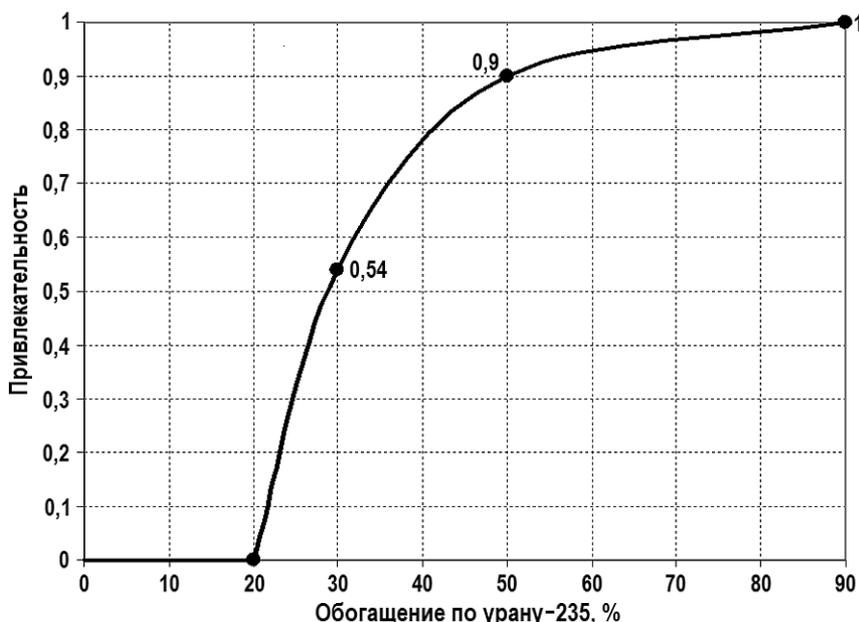


Рис. 1. Функция привлекательности обогащенного урана

Если же вместо природного урана в качестве исходного материала используется топливо ядерных реакторов, то наработка ВОУ будет осуществляться при меньших количествах исходного материала, ЕРР и за меньшее время.

В таблице 4 представлены некоторые сравнительные оценки для наработки 25 кг урана 90%-го обогащения, если при этом в качестве исходного сырья используется свежее топливо тепловых реакторов (ТР) и быстрых реакторов (БР) на основе урана. В этих оценках принято 0.2% урана-235 в отвалах обогатительного производства.

Таблица 4

#### Количество исходного материала и ЕРР для наработки ВОУ

	Исходный материал для получения ВОУ			
	Природный уран	Урановое топливо ТР	Урановое топливо БР	
	0.711% уран-235	4% уран-235	15% уран-235	20% уран-235
Масса исходного материала	4.4 т	590 кг	150 кг	110 кг
Количество ЕРР	$5.7 \cdot 10^3$	$1.8 \cdot 10^3$	750	500

Видно, что использование топлива ядерных реакторов в качестве исходного сырья для получения ВОУ значительно уменьшает требуемое количество исходного материала и количество ЕРР, что выражается в существенном сокращении времени наработки. При использовании топлива ядерных энергетических реакторов по существу будет достаточно одной – двух ТВС, чтобы иметь исходный материал для наработки ВОУ одного значимого количества (приблизительное количество ядерного материала, для которого нельзя исключить возможность изготовления ядерного взрывного устройства; при обогащении урана-235 более или равно 20% это составляет 25 кг урана-235 [12]).

Поскольку потенциальный пролифератор, как представляется, не будет сильно экономить на затратах по производству ВОУ, он может допустить значительно большее содержание урана-235 в хвостах обогатительного производства, что ведет к уменьшению количества необходимых ЕРР, а следовательно, сокращает время наработки ВОУ, но, с другой стороны, это ведет к увеличению количества исходного материала.

Таким образом, можно предположить, что при поставках обогащенного уранового ядерного топлива в другие страны существует потенциальный риск, что это топливо может быть использовано в качестве исходного материала для получения высокообогащенного урана.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для быстрых реакторов, запускаемых и работающих на смешанном уран-плутониевом топливе, не требуется применения технологии обогащения урана. В замкнутом топливном цикле не предусматривается длительное хранение отработавшего топлива.

Настало время снять с быстрых реакторов незаслуженно навешенный им ранее ярлык как наиболее опасных установок с точки зрения проблемы нераспространения. До сих пор весь оружейный плутоний в мире был произведен в тепловых реакторах, и нет достоверной информации, что сколько-нибудь значительное его количество было произведено в быстрых реакторах.

### **Литература**

1. *Синев Н.М., Батуров Б.Б.* Экономика атомной энергетики. Основы технологии и экономики ядерного топлива. – М.: Атомиздат, 1980.
2. *Silvennoinen P., Vira J.* Quantifying Relative Proliferation Risk from Nuclear Fuel Cycles. Prog. In Nucl. En. 17(3), p. 231, 1986.
3. Methodology for the Assessment of Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles. Report of Phase 1B (first part) of the International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO). IAEA-TECDOC-1434, December 2004, p. 133.
4. Generation-IV International Forum «A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems», GIF-002-00, USDOE, December 2002.
5. *Avrorin E.N., Chebeskov A.N.* «Fast reactors and nuclear nonproliferation». International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles (FR13), Paris, France, 4-7 March 2013.
6. Интернет-ресурс: <http://www.newsru.com>, 30 июня 2011 г.
7. *Mark J. Carson.* Explosive Properties of Reactor-Grade Plutonium. Science and Global Security 4, pp. 111–128, 1993.
8. *Смирнов В.С., Уманский А.А.* Старт быстрых реакторов на обогащенном уране. // Бюллетень по атомной энергии. – №8, – 2008. – С. 26 – 31.
9. *Андреева К.А., Маленкин Д.Н., Малышева И.В.* Разработка и выбор моделей для анализа топливного цикла БН при использовании для стартовой загрузки обогащенного урана с последующим переходом в бридерный режим. / XXII Межведомственный семинар «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики – Нейтроника-2011», Россия, Обнинск, 25–28 октября 2011 г.
10. *Kessler G.* Proliferation-Proof Uranium/Plutonium Fuel Cycles. Safeguards and Non-Proliferation. KIT Scientific Publishing, ISBN 978-3-86644-614-4, p. 372, 2011.
11. *Krakowski R.A.* Review of Approaches for Quantitative Assessment of the Risks and Resistance to Nuclear Proliferation from the Civilian Nuclear Fuel Cycle. LA-UR-01-0169, January 2001.
12. IAEA Safeguards Glossary. International Nuclear Verification Series No. 3. 2001 Edition.

Поступила в редакцию 06.12.2013 г.

### **Авторы**

Аврорин Евгений Николаевич, почетный руководитель РФЯЦ-ВНИИТФ им. Е.И. Забабахина, академик РАН.  
E-mail: eavrorin@gmail.com

Чебесков Александр Николаевич, главный научный сотрудник ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ», доктор техн. наук.  
E-mail: chebes@ippe.ru

УДК 621.039.5

## FAST REACTORS AND PROBLEM OF NUCLEAR NON-PROLIFERATION

Avrorin E.N.<sup>a</sup>, Chebeskov A. N.<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Russian Federal Nuclear Center – Research Institute of Technical Physics named after academician E.L. Zababakhin, Snezhinsk, Chelyabinsk reg., Russia

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

### ABSTRACT

The growing number of countries wishing to use nuclear energy, and expansion of the NPPs geography may increase the risk of nuclear weapons proliferation, given that the leaders of some countries may be willing to purchase or develop sensitive nuclear technologies. A certain risk of proliferation by means of nuclear power technologies and materials cannot be excluded completely. In the nuclear fuel cycle there is a large amount of nuclear materials, including fissile ones – many hundreds of thousands of tons. The problem of spent nuclear fuel and plutonium in it, especially for nuclear power newcomers and countries with small nuclear power program also increases the risk of proliferation, including increasing risk of possible actions by the sub-national and terrorist organizations because of spread of nuclear technologies and materials at insufficient measures on their protection in these countries.

For thermal reactors, uranium enrichment is an indispensable element needed to produce the fuel. For long-term storage of spent nuclear fuel in thermal reactors open fuel cycle, which is being implemented today, the risk of proliferation due to the weakening of the radiation barrier over time is increasing as well as possible unauthorized removal of the fuel by proliferator state and its theft by criminal and terrorist elements. For start-up of fast reactors with plutonium fuel, uranium enrichment is not required. Long-term storage of spent nuclear fuel is not envisaged in a fast reactor closed fuel cycle. Gradual replacement of thermal reactors by fast reactors, due to the shortage of natural uranium, creates prerequisites for phasing out uranium enrichment. However, countries with small nuclear power program and, therefore having a limited number of nuclear power units will exploit thermal reactors for a long time, which requires uranium enrichment.

Making nuclear weapons from civil plutonium using a simple “gun-type” design is almost impossible because of high neutron background of this kind of plutonium. However, this does not preclude a group of terrorists from attempting to manufacture a primitive nuclear explosive device. In case of start-up of fast reactors using uranium fuel with subsequent transition to plutonium fuel both sensitive technologies, i.e. uranium enrichment and spent fuel reprocessing (with plutonium separation) will be needed and used. In this case, plutonium with little content of higher isotopes will be bred not only in the blanket, but also in the reactor core in much larger quantities.

The paper deals with various technological and institutional approaches to solve the problem of fast reactor blankets as far as provision of reliable nuclear non-proliferation regime.

**Key words:** nuclear fuel cycle, non-proliferation of nuclear weapons, fissile materials, plutonium, enriched uranium, fast reactors, and thermal reactors.

### REFERENCES

1. Sinev N.M., Baturov B.B. *Ekonomika atomnoj energetiki. Osnovy tehnologii i ekonomiki yadernogo topliva* [Economics of Nuclear Power. Fundamentals of technology and

- economics of nuclear fuel]. Moscow, Atomizdat Publ. 1980.
2. Silvennoinen P., Vira J. Quantifying Relative Proliferation Risk from Nuclear Fuel Cycles. *Prog. In Nucl. En.* 1986, vol. 17, no. 3, p. 231.
  3. Methodology for the Assessment of Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles. Report of Phase 1B (first part) of the International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO). IAEA-TECDOC-1434, December 2004, p. 133.
  4. Generation-IV International Forum «A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems», GIF-002-00, USDOE, December 2002.
  5. Avrorin E.N., Chebeskov A.N. «Fast reactors and nuclear nonproliferation». International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles (FR13), Paris, France, 4-7 March 2013.
  6. Available at: <http://www.newsru.com> (Jun. 30, 2011.)
  7. Mark J. Carson. Explosive Properties of Reactor-Grade Plutonium. *Science and Global Security* 4, pp. 111–128, 1993.
  8. Smirnov V.S., Umanskij A.A. Start bystryh reaktorov na obogashchennom urane. [Start fast reactor with enriched uranium.]. *Byulleten' po atomnoj energii.* 2008, no. 8, pp. 26–31.
  9. Andreeva K.A., Malenkin D.N., Malysheva I.V. Razrabotka i vybor modelej dlya analiza toplivnogo cikla BN pri ispol'zovanii dlya startovoj zagruzki obogashchennogo urana s posleduyushchim perehodom v bridernyj rezhim. XXII Mezhhvedomstvennyj seminar «Nejtronno-fizicheskie problemy atomnoj energetiki – Nejtronika-2011» [Development and selection of models for the analysis of fuel cycle using the BN for the starting load of enriched uranium with a subsequent transition to the breeder mode. XXII Interagency Seminar «Neutron-physical problems of nuclear energy – Neutronika-2011»]. Russia, Obninsk, Oct. 25–28 2011. (in Russian)
  10. Kessler G. Proliferation-Proof Uranium/Plutonium Fuel Cycles. Safeguards and Non-Proliferation. KIT Scientific Publishing, ISBN 978-3-86644-614-4, p. 372, 2011.
  11. Krakowski R.A. Review of Approaches for Quantitative Assessment of the Risks and Resistance to Nuclear Proliferation from the Civilian Nuclear Fuel Cycle. LA-UR-01-0169, January 2001.
  12. IAEA Safeguards Glossary. International Nuclear Verification Series no. 3. 2001 Edition.

## Authors

Avrorin Evgenij Nikolaevich, Honorable Research Supervisor, RFNC-RITP, Academician of Russian Academy of Science.  
E-mail: [eavrorin@gmail.com](mailto:eavrorin@gmail.com).

Chebeskov Aleksandr Nikolaevich, Principal Researcher, FSUE «SSC RF-IPPE», Dr. Sci. (Engineering),  
E-mail: [chebes@ippe.ru](mailto:chebes@ippe.ru).