

## ВСЕОБЩИЙ ПОДХОД К УСТРАНЕНИЮ ВЫСОКООБОГАЩЕННОГО УРАНА ИЗ ТОПЛИВНЫХ ЦИКЛОВ ВСЕХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

*Фрэнк фон Хиппель*

«Я буду готов внести в Конгресс США с полной уверенностью в одобрении план, который ...поощрит исследования по всему миру для наиболее эффективных в мирное время применений делящихся материалов...с уверенностью в том, что исследователи получат все материалы, необходимые для проведения любых экспериментов, которые окажутся подходящими».

Выступление президента США Дуайта Эйзенхауэра в ООН 8 декабря 1953 г.

За период около десяти лет после речи президента Эйзенхауэра «Атомы для мира» США и СССР экспортировали исследовательские реакторы примерно в 40 стран. К середине 1970-х гг большинство из этих реакторов использовали в качестве топлива высокообогащенный уран (ВОУ), который мог применяться для ядерного оружия, и большая часть таких реакторов использовала уран оружейного качества. В 1978 г. в связи с растущим беспокойством относительно ядерного распространения США и СССР начали программы по разработке топлива-заменителя на низкообогащенном уране (НОУ) с содержанием менее 20% урана-235 для находящихся в других странах исследовательских реакторов, которые питались ВОУ-топливом.

К моменту распада СССР большая часть поставленных им за пределы страны исследовательских реакторов была переведена на уран с обогащением 36%, но затем программа застряла из-за недостатка финансирования. К концу 2003 г. американская программа конвертировала (иными словами, перевела на НОУ) 31 реактор, причем 11 из них находились на территории США. Разработка НОУ-топлива с очень высокой плотностью продвигается успешно и похоже, что конверсия фактически всех оставшихся исследовательских реакторов с тепловой мощностью выше 1 МВт может быть завершена примерно к 2012 г. Нет технических трудностей для конверсии топлива тех реакторов, которые применяются в производстве продукта деления молибден-99 - продуктом его распада оказывается технеций-99, широко используемый для медицинских целей. Впрочем, имеются политические преграды для завершения применения ВОУ в исследовательских реакторах и в реакторах для производства изотопов, применяемых в медицине. Крупные производители молибдена-99 препятствуют конверсии, а Россия еще не решила конвертировать свои собственные исследовательские реакторы. Более того, широкий класс реакторов на ВОУ-топливе (сюда входят критические сборки, импульсные реакторы, двигательные реакторы для ледоколов и реакторы для подводок) еще не стал целью для конверсии.

Впрочем, большинство реакторов на ВОУ-топливе не нуждаются в конверсии. Около сотни таких реакторов уже исчерпали программы своих исследований и их следует просто заглушить.. Их и еще около сотни уже заглушенных реакторов на ВОУ-топливе следует просто снять с эксплуатации (ликвидировать). Свежее и отработанное ВОУ-топливо на площадках таких реакторов, а также реакторов, подлежащих конверсии, должно быть сохранено и разбавлено до уровня НОУ. В 1996 г. США возобновили возврат отработанного американского ВОУ-топлива от реакторов, находящихся в других странах. В 2002 г. Россия при помощи США начала возврат свежего ВОУ-топлива от реакторов, расположенных в других странах, но получавших топливо от бывшего СССР. Но возврат в Россию отработанного ВОУ-топлива российского и советского происхождения идет медленно.

Все эти медленно продвигающиеся программы следует объединить и расширить в единую всеобщую высокоприоритетную попытку устранить ВОУ из всех ядерных циклов, включая реакторы для ледоколов, подводок и для производства трития. Недавно появились указания на возрастание внутри США политической поддержки еще более широких усилий по устранению ВОУ из гражданских ядерных топливных циклов по всему миру. Данная статья представляет предварительную карту территории, которая должна быть охвачена подобной программой.

Статья получена 12 января 2004 г. и принята к публикации 23 февраля 2004 г.

Автор работает по Программе «Наука и всеобщая безопасность», Принстонский университет, Принстон, Нью-Джерси, США.

Адрес: Princeton University, 221 Nassau St, 2<sup>nd</sup> Floor, Princeton, NJ 08542-4601. E-mail: [fvhippel@princeton.edu](mailto:fvhippel@princeton.edu)

## ВВЕДЕНИЕ

Менее чем через 10 лет после речи президента Эйзенхауера «Атомы для мира» страны, владеющие ядерным оружием (в основном, США и СССР) экспортировали исследовательские реакторы примерно в 40 стран. Хотя топливом для первых вывезенных реакторов был низкообогащенный уран, не имеющий оружейного применения (менее 20% урана-235), желание иметь более высокие потоки нейтронов, более высокую длительность работы реактора без перегрузки в сочетании со слабыми экспортными ограничениями привело к переходу на топливо из ВОУ с содержанием урана-235 более 20%. Обычно стал поставляться уран оружейного качества, где содержание урана-235 составляло 90% или более<sup>1</sup>.

США и СССР построили даже больше исследовательских реакторов на ВОУ-топливе в своих странах, чем они экспортировали. Министерство энергетики (МЭ) США определило 161 действующих исследовательских реакторов, запроектированных на применение ВОУ-топлива<sup>2</sup>. Реакторы в Китае и Англии, а также некоторые реакторы во Франции используют ВОУ, произведенный в этих странах. Каждая из этих стран предоставляет небольшое количество ВОУ в качестве топлива для исследовательских реакторов, которые они экспортируют. Впрочем, основными поставщиками остаются Россия и США. В пяти первых странах, владеющих ядерным оружием (США, Россия, Англия, Франция и Китай) существуют также другие типы реакторов с топливом из ВОУ: например, для двигательных установок подводок и российских ледоколов, для производства трития, а также использованные в прошлом (и потенциально в будущем) реакторы космического базирования. Многие из этих реакторов по мощности превосходят почти все исследовательские реакторы и поэтому нуждаются в более крупных поставках ВОУ-топлива. Кроме того, ВОУ является исходным материалом для производства продукта деления – молибдена-99, чей продукт радиоактивного распада – технеций-99, широко применяется в медицине.

### ВОУ И ОПАСНОСТЬ ЯДЕРНОГО ТЕРРОРИЗМА

ВОУ (в отличие от плутония) может быть использован для создания простого ядерного взрывного устройства подобно тому, который США применили в Хиросиме. Это оружие содержало около 50 кг урана-235 со средним обогащением ВОУ около 80%<sup>3</sup>. Скорость образования нейтронов в 60 кг металлического урана оружейного качества (93% урана-235) в результате спонтанного распада и ( $\alpha, n$ )-реакции на кислороде составляет около сотни за секунду. Эта относительно низкая скорость делает возможным изготовить простую, но относительно медленную (от начальной критичности до полной сверхкритичности проходит около 10 мс) сборку ствольного типа для оружия с ВОУ, которая применялась в хиросимской бомбе и имела низкую вероятность досрочного возбуждения цепной нейтронной реакции. Напротив, скорость излучения нейтронов в 6 кг плутония

---

<sup>1</sup> DOE needs to take actions to further reduce the use of weapon-usable uranium in civilian research reactors, U.S. Government Accountability Office, GAO-04-807, July 2004, p.10. На Рис.1 этого доклада приведена карта мира, показывающая страны, включенные в программу RERTR и количество намеченных целей – реакторов на ВОУ-топливе, которые поначалу находились в каждой стране (39 из 105 уже полностью или частично конвертированы). Многие реакторы на ВОУ-топливе еще не охвачены программой. Китай и Индия, имеющие такие реакторы, не участвуют в программе.

<sup>2</sup> Там же, стр.7. Список большей части исследовательских реакторов в странах мира можно найти в докладе МАГАТЭ Nuclear Research Reactors in the World (IAEA, 2000). В Табл.9 приведены 135 реакторов на ВОУ-топливе. Неясность в том, что приводятся минимальные и максимальные степени обогащения. Ответственный сотрудник МАГАТЭ полагает, что операторы реакторов обычно интерпретируют «минимальное обогащение» как «минимальное обогащение свежего топлива, которое они когда либо применяли в реакторе» (Иайн Ритчи, частное сообщение, 9 июня 2004 г.). Удаление реакторов с минимальным обогащением 20% или ниже уменьшит количество реакторов на ВОУ-топливе примерно до 117. Дополнительные сведения по начальным обогащениям исследовательских реакторов, которые участвуют в соглашении по возврату американского отработанного топлива, можно найти в справке "Foreign Research Reactors in the EIS: Aluminum-based and Triga spent nuclear fuel containing enriched uranium of United States origin" by James Matos, June 3., 1996, (<http://www.td.anl.gov/Programs/RERTR/FRRSNF/EISREACT.html>.)

<sup>3</sup> Robert Serber, *The Los Alamos primer: The first lectures on how to build an atomic bomb* (University of California Press, 1992), pp. xv,22.

сверхвысокого качества (всего 2% плутония-240) составляет около ста тысяч в секунду<sup>4</sup>, что приводит к необходимости иметь более быструю (10 мкс) сборку импловзивного типа для плутониевой бомбы, которая прошла испытания в Тринити, а затем была сброшена на Нагасаки<sup>5</sup>.

Хотя имеются доводы относительно того, что террористическая группа сможет получить возможность создания импловзивной конструкции, мало сомнений в том, что гораздо легче сконструировать и изготовить оружие ствольного типа, от которого можно ожидать результата без испытания. Как сказал Ганс Бете, «теория бомбы на делении ствольного типа была хорошо проработана Сербером (в то время он был американским профессором физики) и двумя молодыми людьми» во время летнего семинара в Беркли в 1942 г. еще до того, как группа для конструирования бомбы была собрана в 1943 г. в Лос Аламосе<sup>6</sup>.

Южная Африка спроектировала и создала оружие ствольного типа на основе урана оружейного качества в течение нескольких лет в период 1970-х гг, а более надежная и безопасная конструкция появилась в 1980-х гг. В начале этого периода в программе было занято «около ста человек, из которых только сорок были непосредственно включены в оружейную программу и только двадцать действительно создавали необходимые устройства»<sup>7</sup>.

Запасы ВОУ-топлива на реакторах и в реакторных топливных циклах представляет особую тревогу в качестве потенциальных мишеней для воров, поскольку они часто оказываются не столь хорошо защищенными по сравнению с делящимися материалами на предприятиях оружейного комплекса. В ноябре 2001 г. после атаки террористов на Международный торговый центр в Нью-Йорке и на Пентагон МАГАТЭ предупредило о возможности ядерного терроризма и сообщило, что оно собрало информацию о 18 случаях, когда были похищены небольшие количества ВОУ или плутония, начиная с 1993 г.<sup>8</sup> МАГАТЭ считало детали конфиденциальными, но в прессе появились сообщения о нескольких кражах с топливных циклов ВОУ-реакторов в России за период после распада СССР и до того, как правительство снова ввело режим секретности. Например, в 1992 г. сотрудник научно-производственного объединения «Луч» (предприятия по производству ядерного топлива в Подольске, неподалеку от Москвы) выносил в течение нескольких месяцев с предприятия небольшие количества урана оружейного качества, каждое из которых было меньше ошибки измерения системы учета и контроля материалов в десятки раз. К моменту, когда его задержали по случайности в 1993 г., он накопил 1.5 кг<sup>9</sup>. В ноябре 1993 г. среди ночи было похищено ядерное топливо для подлодки, содержащее 4.5 кг ВОУ, со склада топлива на верфи в Североморске вблизи Мурманска<sup>10</sup>.

Как сообщили «российские спецслужбы», группа из 50 хорошо вооруженных чеченских террористов, захвативших 700 заложников в московском театре в октябре 2002 г., рассматривала возможность захвата исследовательского реактора в Институте атомной энергии имени Курчатова, чтобы иметь возможность взорвать его и отравить Москву радиоактивностью<sup>11</sup>. Они могли с тем же успехом похитить ВОУ-топливо с одного из этих реакторов.

Устранение риска от террористов, вытекающего от применения ВОУ в качестве топлива для ядерного реактора, имеет три основных аспекта:

1. Сбор и удаление как неиспользованного свежего ВОУ, так и отработанного ВОУ-топлива и используемых для облучения образцов ВОУ из реакторов.
2. Перевод действующих реакторов с ВОУ-топливом на неприменяемый в оружии НОУ.
3. Закрытие и разборка огромного количества реакторов на ВОУ-топливе, которые больше не

<sup>4</sup> *Reversing the Arms Race: How to Achieve and Verify Deep Reductions in the Nuclear Arsenals*, Frank von Hippel and Roald Z. Sagdeev, eds., (Gordon and Breach Science Publishers, 1990), Table 11.2. Предполагалось, что металлические уран и плутоний содержат 0.2% кислорода по весу.

<sup>5</sup> Дж. Карсон Марк, «Взрывные свойства плутония реакторного качества», *Наука и всеобщая безопасность*, т.4 вып.1 (1994 г.).

<sup>6</sup> Richard Rhodes, *The making of the atomic bomb* (Simon & Schuster Touchstone, 1986), p.417.

<sup>7</sup> David Albright, "South Africa and the Affordable Bomb", *Bulletin of the Atomic Scientists*, July/August (1994), p.37.

<sup>8</sup> "Calculating the new global terrorism threat", IAEA Press Release, Nov.1, 2001.

<sup>9</sup> Matthew Bunn and Anthony Wier, *Securing the bomb: An agenda for action* (Harvard University, Managing the Atom Project, 2004), pp. 13, 16.

<sup>10</sup> Обогащение этого топлива находится в нижнем конце диапазона 21-45% для действующих сейчас российских подлодок. Oleg Bukharin and William Potter, "Potatoes were guarded better", *Bulletin of the Atomic Scientists*, May/June (1995), p.46.

<sup>11</sup> Владимир Богданов, «Террорист имел пропуск, дающий доступ к боеголовкам», *Российская Газета*, 01 ноября 2002 г.

нужны.

Конечно, столь же важно быть уверенным, что ВОУ станет настолько безопасным, насколько это возможно, в течение того времени, пока он продолжает присутствовать.

Ниже мы разберем подробнее каждый из этих аспектов.

## СБОР И УДАЛЕНИЕ ИЗБЫТОЧНОГО СВЕЖЕГО ВОУ-ТОПЛИВА И ОТРАБОТАННОГО ВОУ-ТОПЛИВА

Немного исследовательских реакторов содержат в своих активных зонах 50 кг урана-235 в виде ВОУ, что требуется для создания оружия ствольного типа, или даже 15-25 кг для создания имплозивного оружия первого поколения<sup>12</sup>. Как указано в документе МАГАТЭ «Ядерные исследовательские реакторы в мире» (издан в сентябре 2000 г.), только девять стран (включая три государства, не обладающие ядерным оружием) имеют исследовательские реакторы на ВОУ-топливе, содержащие в активных зонах более 10 кг урана-235. К исследовательским реакторам на ВОУ-топливе с большим запасом ВОУ в активной зоне относятся главным образом реакторы-размножители на быстрых нейтронах, критические модели активной зоны реакторов-размножителей или импульсные реакторы, применяемые в оружейных программах (они обсуждаются в дальнейшем)<sup>13</sup>.

Тем не менее, даже исследовательские реакторы на ВОУ-топливе с относительно небольшим содержанием ВОУ в активной зоне могут иметь значительные запасы ВОУ на площадке в виде свежего и отработанного топлива. МЭ США указало на 128 «исследовательских реакторов и связанных с ними установок, имеющих на площадках по 20 кг ВОУ или более»<sup>14</sup>. На площадке могут храниться несколько активных зон со свежим топливом – особенно в том случае, когда реакторы нуждаются в частых перезагрузках. Реактор с мощностью 10 МВт, работающий со скважностью 80% и при 35%-ном «выгорании» урана-235 (с учетом как захватов нейтронов с делением, так и захватов без деления) до замены топлива потребует 10 кг запасного топлива в виде урана-235 в год<sup>15</sup>. Поскольку активные зоны таких реакторов обычно содержат 1-10 кг урана-235, они перезагружаются относительно часто. Новый немецкий реактор FRM-2 с мощностью 20 МВт, например, содержит всего 8 кг оружейного урана в своей активной зоне и подлежит перезагрузке пять раз в год<sup>16</sup>. Существуют 20 исследовательских реакторов в 11 странах с топливом на ВОУ, тепловые мощности которых превышают 10 МВт<sup>17</sup>.

**СВЕЖИЙ ВОУ.** Россия обладает особенно большим количеством избыточного свежего ВОУ на площадках ее ядерных реакторов и в ее топливных циклах. Поэтому в 1999 г. МЭ США в рамках программы защиты, контроля и учета материалов объявило об инициативе по объединению и конверсии материалов (ОКМ) с целью очистки от ВОУ как можно большего количества российских

<sup>12</sup> Активная зона имплозивного оружия должна быть подкритической перед сжатием. При отражателе из бериллия или из карбида вольфрама толщиной 5.1 см масса критической сферы урана с обогащением 93.5% составляет около 20 кг урана-235. *Критические размеры систем, содержащих уран-235, плутоний-239 и уран-233*, (Лос-Аламосская национальная лаборатория, 1986), таблица 28.

<sup>13</sup> Странами с такими установками являются Китай, Франция, Индия, Россия, Англия и США, а также Италия (источник быстрых нейтронов, применяемый для медицинских целей), Япония (макеты активных зон для реакторов на быстрых нейтронах) и Румыния (реактор Трига большой мощности, который переводится на НОУ-топливо). См. [2].

<sup>14</sup> См. [1].

<sup>15</sup> При делении одного грамма урана-235 выделяется примерно 1 Мвт-день. За год при скважности реактора 0.8 надо разделить примерно 290 г урана-235. Около 20% захваченных в уране-235 нейтронов не приводят к делению и поэтому всего на поддержание мощности 1 МВт будет затрачиваться 350 г урана-235 в год.

<sup>16</sup> Александр Глезер, «Конверсия исследовательских реакторов на НОУ-топливо в случае FRM-2», *Наука и всеобщая безопасность*, том 10, вып.1 (2002 г.). Скорость перезагрузки – 2 кг урана оружейного качества на МВт-год, вдвое превосходит величину, характерную для реакторов, работающих на американском ВОУ-топливе. См. *Plutonium and Highly Enriched Uranium 1996*, by David Albright, Frans Berkhout and William Walker (Oxford University Press, 1997), Appendix D.

<sup>17</sup> US: ATR (250), HEIR (85), NBSR (20), MURR (10), MITR-2 (5-10); Russia: MIR-M1 (100), SM-3 (100), WWR-M (18), IVV-2M (15), RBT-10/2 (10); France: HFR (58), ORPHEE (14); Germany: FRM-2 (20), FRJ-2 (23); Australia: HIFAR (10); Belgium: BR-2 (100); China: HFETR (125); Kazakhstan: EWG-1 (60); Netherlands: HFR (45); South Africa SAFARI (20). Все значения приведены в МВт. См. [2].

установок и сооружений. Возвращенный ВОУ разводится до уровня обогащения 19% на производственном объединении «Луч» в Подольске и в Исследовательском институте атомных реакторов (Димитровград). Предприятия для разведения получают оплату за каждый кг разведенного ВОУ и сохраняют право собственности на образовавшийся уран со степенью обогащения 19%. Если предприятия отказываются от ВОУ, они участвуют в американских выплатах. По состоянию на середину 2004 г. было разведено 5 тонн реакторного ВОУ, а темпы разведения ВОУ составляли около 2 тонн/год<sup>18</sup>.

МЭ заинтересовано в финансировании в рамках программы ОКМ увеличения темпов разведения ВОУ до пяти тонн/год. Эти темпы частично ограничены трудными переговорами, связанными с тем, чтобы найти предприятие, которое согласно на очистку своей территории от своего ВОУ, присутствие которого обеспечивает более высокую заработную плату, более продолжительные отпуска и более ранний выход на пенсию. Программе мешает также отсутствие прикрытия в виде межправительственного соглашения, которое позволило бы Российскому федеральному агентству по атомной энергии (бывшему Минатому) обеспечить американскую сторону официальной информацией относительно того, откуда поступает ВОУ<sup>19</sup>.

США, Россия и МАГАТЭ инициировали также общую программу по возвращению в Россию как свежего, так и отработанного ВОУ из 16 стран, куда СССР и Россия поставляли ВОУ-топливо<sup>20</sup>. По состоянию на июнь 2004 г. свежее ВОУ-топливо, содержащее всего около 70 кг 80%-ного и 25 кг 36%-ного ВОУ, было возвращено из четырех стран – Сербии (август 2002 г.), Румынии (сентябрь 2003 г.), Болгарии (декабрь 2003 г.) и Ливии (март 2004 г.)<sup>21</sup>. Немногом ранее (1998 г.) США переправили по воздуху в Англию 3.5 кг свежего 90%-ного ВОУ-топлива и 0.8 кг отработанного топлива от заглушенного исследовательского реактора в Грузии<sup>22</sup>.

<sup>18</sup> Эту программу не следует путать с американско-российской программой «Мегатонны в мегаватты», по которой Обоганительная компания США в настоящее время закупает ежегодно по 30 тонн урана оружейного качества, взятого из избыточного советского оружия и разбавленного до обогащения 4-5%. Этот НОУ продается на американские и другие предприятия для использования в качестве топлива энергетических реакторов. (<http://www.usec.com/v2001.02/HTML/mtgatons.asp>).

<sup>19</sup> Частное сообщение, Том Уэндер – менеджер программы МСС, 10 июня 2004 г.

<sup>20</sup> Белоруссия, Болгария, Китай, Чехия. Египет, Германия, Венгрия, Казахстан, Латвия, Ливия, Польша, Румыния, Сербия, Украина, Узбекистан и Вьетнам. Т. Дедик, И. Болшинский и А. Красс, «Программа возврата отработанного топлива с российских исследовательских реакторов начала отправку топлива в Россию», выступление на Международной конференции (после 2003 г. – Международные встречи) по программе RERTR. Все доклады, представленные на таких встречах после 2005 г. представлены в Интернете: (<http://www.td.anl.gov/Programs/RERTR/RERTR.html>).

<sup>21</sup> В августе 2002 г. еще до формального введения в действие трехсторонней инициативы при помощи на уничтожение в размере 5 миллионов долларов от частной организации «Инициатива против ядерной угрозы» с исследовательского реактора «Винча» вблизи Белграда было направлено в Димитровград для разбавления 48 кг урана, обогащенного до 80%. Этот реактор был заглушен с 1984 г. Перевозку ВОУ в аэропорт Белграда охраняли 1200 югославских солдат, как указывает Joby Warrick in "Risky Stash of Uranium Secured, U.S., Russia Remove Weapons-Grade Nuclear Materials from Yugoslavia", *Washington Post*, August 23, 2002, p.A01. В сентябре 2003 г. 14 кг свежего ВОУ (приблизительно одна треть обогащена до 80%, а остальное – до 36%) были уалены из Института ядерных исследований в Питешти (Румыния) и отправлены в Новосибирск для разбавления. См. "IAEA, Russia, U.S. assist Romania to remove fresh reactor fuel", IAEA, *World Atom*, Sept.22, 2003 (информацию о степени обогащения топлива предоставило МАГАТЭ). В декабре 2003 г. 17 кг урана с обогащением 36% было удалено из заглушенного исследовательского реактора в Софии (Болгария), "U.S.-Russian Team Removes Uranium from Bulgarian Reactor", *New York Times*, December 25, p.A-6; "Removal of High-Enriched Uranium: IAEA, USA, Russia Assist Bulgaria in Removal of HEU Fuel", IAEA Staff Report, 24 December 2003. В марте 2004 г. 16 кг 80%-ного ВОУ в виде свежего топлива было отправлено с работающего ливийского исследовательского реактора в Димитровград, "Libya sends Tajura HEU to Russia, prepares to convert reactor to LEU Nuclear Fuel", *Nuclear Fuel*, March 15, 2004, p.4.

<sup>22</sup> Реактор с мощностью 8 МВт был заглушен в 1986 г. после аварии в Чернобыле. Перед распадом СССР в конце 1991 г. часть оставшегося свежего топлива была отправлена на реактор того же типа в Узбекистане, а основная часть отработанного топлива была перевезена в Россию. Michael R. Gordon, "U.S. and Britain relocate a cache of nuclear fuel", *New York Times*, April 20, 1998, A1. T.A. Shelton, J.M. Viebrock, A.W. Riedy, S.D. Moses, and H.M. Bird, "US-led efforts to remove HEU/LEU fresh and spent fuel from the Republic of Georgia to Dounreay, Scotland", 1998 International RERTR Meeting.

**ОТРАБОТАННОЕ ВОУ-ТОПЛИВО.** Как правило, отработанное ВОУ-топливо все еще содержит более 50% начального количества ВОУ. Оно может накапливаться десятилетиями в охлаждающих бассейнах исследовательских реакторов. Риск распространения растет со временем, поскольку радиоактивность продуктов деления затухает и становится легче обращаться с отработанным топливом.

С 1957 г. по 1992 г. США экспортировали 29 тонн ВОУ в качестве топлива для исследовательских реакторов – главными получателями являются Евроатом, Канада и Япония. Впрочем, по состоянию на январь 1993 г. по оценкам Ядерной регулятивной комиссии 17.5 тонн ВОУ американского происхождения оставались за границей в 51 стране<sup>23</sup>. В 1996 г. США согласились принять некоторые типы отработанного топлива, выгруженного из расположенных за рубежом исследовательских реакторов, которые использовали американский ВОУ – эти действия проходили как часть политики, направленной на поощрение перевода таких реакторов на НОУ. Около 5.2 тонн ВОУ, вывезенного из США в 53 страны, попадают под эти действия. По состоянию на октябрь 2003 г. возвращено отработанное топливо, содержавшее поначалу около 1.1 тонны ВОУ. В феврале 2004 г. генеральный инспектор МЭ США оценил, что только около половины из 5.2 тонн, которые попадают под упомянутое выше предложение, будет возвращено к 2009 г.<sup>24</sup>. Впрочем, похоже, что большая часть оставшегося топлива подлежит переработке и разведению во Франции или же будет отправлено в подземные хранилища в Канаде<sup>25</sup>. Из 12.3 тонн ВОУ, не попавших в программу возврата, примерно 9.5 тонн были первоначально направлены в Германию и Францию, но несколько тонн перемещалась между разными странами<sup>26</sup>.

Как следует из российского доклада, опубликованного в 2002 г., при 24 российских исследовательских реакторах было заложено на хранение 28500 сборок отработанного топлива<sup>27</sup>. Если допустить, что это отработанное топливо большей частью содержит ВОУ, то на хранении окажутся тонны урана оружейного качества<sup>28</sup>. Кроме того, еще 13000 сборок отработанного ВОУ-топлива российского происхождения были заложены на хранение на восточно- и западноевропейских исследовательских реакторах<sup>29</sup>.

Если не считать отработанное ВОУ-топливо российского происхождения для исследовательского реактора, вывезенное из Ирака после войны в Персидском заливе в 1991 г., с 1988 г. в Россию не было возвращено отработанное ВОУ-топливо ни с одного из 20 исследовательских реакторов советской конструкции, находящихся за пределами России<sup>30</sup>. Целью нового трехстороннего соглашения между США, Россией и МАГАТЭ является возврат в Россию как отработанного, так и

<sup>23</sup> *U.S. Nuclear Regulatory Commission's Report to Congress on the Disposition of HEU Previously Exported from the United States* (USNRC, 1993); см. также [16] и "Foreign Research Reactors on the EIS".

<sup>24</sup> *Recovery of HEU provided to foreign countries*, U.S. Department of Energy, Office of Inspector General, Office of Audit Services, DOT/IG-0638, February 2004, p.2.

<sup>25</sup> Бельгия и Франция выбрали вариант отправки отработанного ВОУ-топлива, содержавшего в начале около 2 тонн ВОУ, на площадку во Франции для переработки. Это даст в результате возвращенный уран, разбавленный до НОУ. ВОУ, возвращенный из примерно 600 кг ВОУ, который применялся в качестве облучаемой мишени для производства молибдена-99, помещен на хранение в Чок Ривер (Канада). Сейчас планируется отправить этот материал в будущее подземное хранилище.

<sup>26</sup> См. [23],[24]. В 1993 г. 4,4 тонны американского ВОУ, отправленного в страны Евроатома, были переправлены в другие страны в рамках Евроатома (о таких изменениях не принято информировать США), а 1.7 тонн были переправлены в страны, не входящие в Евроатом, которые передали 0.55 тонны своего ВОУ американского происхождения в страны Евроатома.

<sup>27</sup> Ю. Козлов, Ю. Косарев, Н.С. Тихонов и С.Д. Хромеев, "Management of research reactor spent fuel and economic aspects of its shipment", *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Radiation Safety: Spent Nuclear Fuel and Radioactive Waste Management, Spt. 24-27, 2002, pp.142-152; End points for spent nuclear fuel and high-level radioactive waste in Russia and the U.S.* (National Academy of Sciences, 2003) p.37.

<sup>28</sup> Пять типов сборок ВОУ-топлива советской конструкции, применяемых в исследовательских реакторах вне России, содержат уран -235 в следующих количествах (г): 37-44 (WWR-M2), 147-171 (IRT-2M), 300-342 (IRT-3M), 430 (MR-6) и 83-109 (WWR-TS). James Matos, "Accelerating the design and testing of LEO fuel assemblies for conversion of Russian-designed research reactors outside Russia", 2003 International RERTR Meeting.

<sup>29</sup> Pablo Adelfang and Iain G. Ritchie, "Overview of the status of research reactors worldwide", 2003 International RERTR Meeting.

<sup>30</sup> Иайн Ритчи, МАГАТЭ, частное сообщение, 24 сентября 2003 г.

свежего ВОУ-топлива. Впрочем, возврат отработанного ВОУ-топлива в Россию задерживается проблемами получения необходимых одобрений России с точки зрения безопасности окружающей среды.

Россия также хранит огромные количества отработанного ВОУ-топлива от ядерных подлодок. США, Норвегия, Германия и Япония сотрудничают с Россией по вопросам выемки топлива и демонтажа ее избыточных ядерных подлодок, а также повышения российских возможностей перевозки отработанного ВОУ-топлива с Северного и Тихоокеанского флотов и с арктических ядерных ледоколов на перерабатывающий завод «Маяк», находящийся на Урале<sup>31</sup>. Там топливо перерабатывается, а ВОУ либо возвращается в виде нового топлива для кораблей, либо разводится в НОУ для использования в энергетических ядерных реакторах<sup>32</sup>. По состоянию на 2000 г. считалось, что 32000 сборок с отработанным топливом на подлодках ждут демонтажа, а еще 32000 сборок хранятся на кораблях и в складах на Кольском полуострове<sup>33</sup>. В этом отработанном топливе содержатся десятки тонн урана-235<sup>34</sup>.

## ПЕРЕВОД ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РЕАКТОРОВ НА НОУ-ТОПЛИВО

### Исследовательские реакторы или реакторы для производства изотопов, требующие регулярных поставок ВОУ из США

Использование Индией плутония, выделенного из отработанного топлива исследовательского реактора, который поставили Канада и США, для производства «мирного» ядерного взрыва в 1974 г. высветило уязвимость программы «Атомы для мира» к распространению ядерного оружия. Этот факт способствовал появлению в США программы исследовательского и испытательного реактора с пониженным обогащением топлива (RERTR) в 1978 г. Программой руководит Аргоннская национальная лаборатория МЭ США, расположенная вблизи Чикаго. Начальной задачей программы была разработка НОУ-топлива и НОУ-мишеней для облучения, которые послужат заменой в расположенных за рубежом реакторах, для которых США поставляли ВОУ. Сейчас эта программа носит международный характер. Например, кроме США сейчас Аргентина, Канада, Китай, Франция и Индонезия производят НОУ-топливо для экспорта и собственного пользования, а Бразилия, Чили и Южная Корея разрабатывают экспортный потенциал. Аргентина и Китай поставляют НОУ-топливо для конверсии реакторов с ВОУ-топливом в Иран и Пакистан, соответственно.

В 1992 г. после значительного прогресса, достигнутого в разработке НОУ-топлива, появилась «поправка Шумера» (по имени члена палаты представителей США, предложившего ее), требующая, чтобы иностранные реакторы, работающие на ВОУ-топливе, которое поставляют США, обязались перейти на НОУ как можно скорее:

«Ядерная регулятивная комиссия может выдать лицензию на экспорт ВОУ для применения в качестве топлива или мишени в ядерном исследовательском или испытательном реакторе только в том случае, если кроме любых других требований этого закона ЯРК установит следующее: (1) не существует альтернативного топлива (или мишени) для ядерного реактора с меньшей степенью обогащения ураном-235, чем предлагаемый для экспорта материал, могущий быть использованным в реакторе; (2) предлагаемый получатель этого урана обязуется, что в том случае, когда имеется альтернатива ядерному топливу или мишени для применения

<sup>31</sup> «Россия получила еще один специальный поезд для перевозки отработанного ядерного топлива» – сообщение Беллуны, 21 ноября 2003 г.; « Японские официальные лица подтвердили намерения Токио начать разборку сорока одной подлодки (тактического типа и общего назначения) Тихоокеанского флота, которые в течение нескольких лет оставались на плаву с реакторами, еще загруженными ядерным топливом. Так заявили представители японского правительства в среду». Сообщение Беллуны, 7 января 2003 г. (<http://www.bellona.no>).

<sup>32</sup> Олег Бухарин, «Обеспечение безопасности запасов ВОУ в России», *Наука и всеобщая безопасность*, т.7, вып.3 (1999 г.).

<sup>33</sup> «Хранилище отработанного топлива переносится с «Маяка» на Колу. Минатом и промышленная группа отменили намечавшееся хранение отработанного топлива с подлодок на «Маяке». Вместо этого будут построены региональные площадки для хранения на Кольском полуострове», Том Нильсен, Беллуна, 20 марта 2000 г.

<sup>34</sup> С 1989 г. Россия списала примерно 150 ядерных подлодок, каждая из которых стандартно имеет два реактора, содержащих в среднем по 100 кг урана-235. Chunyan Ma and Frank von Hippel, "Ending the production of highly enriched uranium for naval reactors," *Nonproliferation Review* 8 (2001), p.86.

в этом реакторе, он использует альтернативу, а не ВОУ; (3) правительство США активно разрабатывает альтернативные топливо и мишени для ядерных реакторов, которые можно применять в данном реакторе»<sup>35</sup>.

Впрочем, Россия, которая еще не приняла указанные в поправке Шумера условия в отношении своего экспорта ВОУ, недавно стала альтернативным источником ВОУ для нескольких последних западноевропейских реакторов, работающих на ВОУ-топливе<sup>36</sup>. Кроме того, хотя уже существуют НОУ-мишени для производства молибдена-99 и три небольших производителя уже перешли на НОУ-мишени, крупный канадский производитель изотопов для медицины «Нордион» вместе с американской компанией, производящей молибден-99 в Нидерландах предпринял в 2003 г. успешную попытку получить временные налоговые льготы для ВОУ-мишеней, применяемых в зарубежных реакторах для производства медицинских изотопов<sup>37</sup>. Продукт деления молибден-99 с периодом полураспада 2.7 дня переходит в технеций-99 с периодом полураспада 6 часов, испускающий гамма-кванты с энергией 0.14 МэВ, которые позволяют получать изображения отдельных органов.

В 1986 г. Ядерная регулятивная комиссия (ЯРК) США опубликовала требование, чтобы получающие в США лицензию ЯРК реакторы (то есть за исключением реакторов, принадлежащих МЭ и Министерству обороны) переходили на НОУ-топливо, если расходы будут оплачены американским правительством<sup>38</sup>. Одиннадцать реакторов в американских университетах были конвертированы по этой программе при затратах, лежащих в диапазоне 0.4-1.6 миллионов долларов за реактор. Восемь других реакторов (шесть университетских, один принадлежащий частной компании и один принадлежащий МЭ), для которых уже имеется топливо для замены, еще не прошли конверсию, поскольку у МЭ не было финансирования на эти цели. Мощность каждого из этих реакторов не превосходит 1 МВт и поэтому сроки работы активных зон достаточно велики<sup>39</sup>.

Кроме того за границей имеется еще 13 реакторов с ВОУ-топливом американского происхождения. Все они обладают малой мощностью с большой длительностью пригодности активной зоны. Сейчас американская политика заключается в том, чтобы не платить за конверсию иностранных реакторов с американским ВОУ-топливом<sup>40</sup>.

Тот путь, по которому следовала американская программа RERTR, заключался в попытке разработать НОУ-топливо, имеющее такую же геометрию и такие же сроки существования в активной зоне, что и ВОУ-топливо. Для реакторов с топливом из оружейного урана это означает, что в платы для топлива такого же размера надо втиснуть в пять раз больше урана: чуть больше урана-235, чем в ВОУ-топливе, для сохранения критичности плюс четыре грамма урана-238 на

---

<sup>35</sup> H.R. 776, Comprehensive National Energy Policy Act, Sec. 903, Restrictions On Nuclear Export: Amendment to Chapter 11 of the Atomic Energy Act of 1954 (42 U.S.C. 2151 et seq.) *Congressional Record* (October 5, 1992), p. H12103.

<sup>36</sup> В 2001 г. Россия переправила около 400 кг урана оружейного качества во Францию для изготовления десятилетнего запаса активных зон для нового немецкого реактора FRM-2. Были еще две отправки во Францию: 228 кг в 1998 г. и неизвестное количество в 2001 г.. Они обеспечили топливо до конца жизни французскому реактору «Орфи» и на трехлетнюю работу реактору RHF. 400 кг полученного ранее из США, но не применявшегося американского урана оружейного качества, затем было использовано операторами европейских исследовательских реакторов для взаимопомощи до тех пор, пока не удастся договориться о новых поставках. Европейцы воспользовались также соглашением с Россией о поставке 600- кг оружейного урана на один срок работы активной зоны реактора HFR в Петтене (Голландия). "Russia Supplants U.S. in Sales of HEU for European Reactors," *Nucleonics Week* (March 28, 2002), p.4, correction, April 18, 2002.

<sup>37</sup> R. Jeffrey Smith, "Measure Would Alter Nonproliferation Policy, Energy Dill Provision Backrd dy Two Firms Would Easy Conversion on Exports of Bomb-Grade Uranium", *Washington Post* (October 4, 2003), p.A02. Эти меры были части энергетического законопроекта, не прошедшего в Конгрессе из-за других противоречивых разделов. Подробности обсуждения опасений о затратах на конверсию приведены в [1].

<sup>38</sup> "Limitations on the use of HEU in domestic non-power reactors," *Code of Federal Regulations*, part 50.64.

<sup>39</sup> См. [1], pp. 13-16, 31. The GAO reports that "according to DOE officials, conversion for each of these reactors is projected to cost between \$ 5 million and \$ 19 million... but could not provide documentation to support these high estimates."

<sup>40</sup> См. [1], pp. 16-18. Ошибочно указано, что южно-африканский реактор «Сафари» пользуется американским ВОУ. Южная Африка сама производила ВОУ.

грамм урана-235 для сведения обогащения урана до уровня ниже 20%<sup>41</sup>. Это возможно теоретически, так как ВОУ-топливо обычно имеет плотность (по урану) 0.5-1.7 г/см<sup>3</sup><sup>42</sup>, а плотность металлического урана равна почти 19 г/см<sup>3</sup>. Впрочем, металлический уран не применяется в качестве топлива, поскольку он разбухает слишком быстро из-за накопления в нем газовых продуктов деления.

Самое современное топливо для исследовательских реакторов изготавливается путем рассредоточения частиц, содержащих уран, в алюминиевой матрице. Этот композиционный материал образует топливное «мясо», которое затем покрывается алюминиевой оболочкой. До сих пор программа RERTR разрабатывала урановое топливо с более высоким содержанием урана путем последовательного постепенного увеличения плотности урана в таком мелкозернистом материале. Такая последовательность прервалась где-то в 1990 г. как в США, так и в СССР из-за ограничений финансирования. К этому времени программа RERTR разработала несколько типов дисперсионного топлива U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> со средним содержанием урана до 4.8 г/см<sup>3</sup> и оказалось возможным конвертировать большинство исследовательских реакторов в других странах, которые работали на американском ВОУ-топливе, а также исследовательские реакторы в университетах США. К 1995 г. 20 из 38 исследовательских реакторов других стран, работавших на ВОУ-топливе (с мощностью около 1 МВт или немногим выше) и потреблявших 70% ежегодных поставок американского ВОУ за границу (полностью эти поставки содержали 350 кг урана-235), находились на разных этапах конверсии<sup>43</sup>.

В 1996 г. американская программа RERTR получила финансирование от МЭ для возобновления разработки топлива с более высокой плотностью. Наиболее важным результатом до сих пор стало подтверждение факта, что разбухание облученного металлического уранового топлива можно уменьшить, если сплавить уран с 6-10% молибдена, который стабилизирует его в гамма-фазе, устойчивой к облучению<sup>44</sup>.

Такой U-Mo сплав поначалу применялся в традиционной форме, когда мелкие частицы распределялись в алюминии для образования топливной основы, имевшей промежуточную урановую плотность до 8 г/см<sup>3</sup>. До недавнего времени план состоял в том, чтобы использовать такое топливо как для конверсии дополнительной партии реакторов, так и для замены топлива U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>Al, которое применялось для конверсии многих реакторов на НОУ<sup>45</sup>. Перед 2004 г. программа RERTR надеялась иметь дисперсное U-Mo топливо в коммерчески доступном виде где-то в конце 2006 г.<sup>46</sup> Но в начале 2004 г. исследователи из Франции, России и США опубликовали результаты испытаний, продемонстрировавшие внутренние потрескивания и разбухание топлива при выгорании более 30-40% урана-235. Похоже, что проблема не имеет отношения к самим частицам U-Mo, а скорее связана с взаимодействиями в слое, находящемся между частицами и окружающей алюминиевой матрицей. В результате перевод этого топлива на коммерческую основу задержался, по крайней мере, до 2010 г.<sup>47</sup> С учетом такого запаздывания МЭ США перенес конечный срок предложений на американское отработанное топливо, но этот перенос не применяется к отработанно-

---

<sup>41</sup> Загрузка ураном-235 должна быть увеличена на 10-14%, поскольку добавленный уран-238 подавляет реактивность путем поглощения нейтронов в начале топливного цикла. По мере выгорания топлива, впрочем, поглощение нейтронов в уране-238 приводит к образованию делящегося плутония, который частично заменяет уран-235, который уже разделился, что замедляет снижение реактивности.

<sup>42</sup> A. Travelli, "Status and progress of the RERTR program in the year 2003," 2003 International RERTR Meeting.

<sup>43</sup> A. Travelli, "The RERTR program. Status and progress," 1995 International RERTR Meeting.

<sup>44</sup> G. L. Hofman et al., "Recent observations at the post-irradiation examination of low-enriched U-Mo miniplates irradiated to high burnup," 2003 International RERTR Meeting. Пузырьки газовых продуктов деления были небольшими, однородно распределялись и не сливаются. Топливное «мясо» при 80%-ном выгорании увеличило объем на 6-10% при максимальной температуре 130 °С в начале рабочего цикла.

<sup>45</sup> Мотивацией для замены U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>-Al – топлива стал отказ французской компании «Кожема» принять на переработку топлив, содержащее кремний. Кремний образует гель после растворения топлива. Но на американском перерабатывающем заводе в Саванне Ривер было показано, что такой гель можно удалить на центрифуге. «Кожема» недавно пересмотрела свою позицию, "Cogema poised to offer more reprocessing of silicide fuel," *Nuclear Fuel* (March 29, 2004), p. 21.

<sup>46</sup> См. [42].

<sup>47</sup> "High-density test reactor fuel delayed until 2010," *Nuclear Fuel* (March 29, 2004), p. 1.

му топливу, выгруженному после 13 мая 2006 г.<sup>48</sup>

Четыре или пять американских, три западноевропейских реакторов, а также неопределенное еще количество российских реакторов потребуют монолитное уран-молибденовое топливо, где самым топливом является твердый сплав U-Mo с плотностью (по урану) около 15.6 г/см<sup>3</sup>, для перехода на НОУ<sup>49</sup>. Для такого топлива только немецкий реактор FRM-2, который был спроектирован для использования топлива на оружейном уране со средней плотностью, все еще не сможет оказаться конвертированным без изменений в геометрии топлива<sup>50</sup>. Пока успех дисперсного уран-молибденового топлива остается под вопросом, монолитное топливо становится запасным вариантом для реакторов, способных пройти конверсию на основе дисперсного U-Mo топлива с промежуточной плотностью. Текущая задача программы RERTR состоит в переводе на коммерческую основу монолитного топлива примерно к 2012 г.<sup>51</sup> МЭ планирует затратить примерно 26 миллионов долларов на такие попытки разработок топлива в промежутке между 2004 и 2012 финансовыми годами. Еще 26 миллионов подлежит потратить на анализ конверсии активной зоны реакторов, которые в настоящее время заполнены американским ВОУ, а дополнительные 5 миллионов долларов для того, чтобы помочь производителям медицинских изотопов для перехода на НОУ-мишени<sup>52</sup>.

На рис.1 показан спад американского экспорта ВОУ с момента расцвета программы «Атомы за мир». К концу 2003 г. американская программа RERTR привела к конверсии 20 зарубежных и 11 американских исследовательских реакторов. Еще семь исследовательских реакторов за рубежом находились в состоянии перевода. Вместе эти реакторы потребляли тем не менее около 250кг ВОУ ежегодно.

Но основную часть работы еще предстоит выполнить. Оставшиеся исследовательские реакторы во всем мире, потребляющие ВОУ-топливо, требуют еще по оценкам 830 кг ВОУ ежегодно (примерно 250 кг в американских реакторах, 370 в реакторах советской конструкции, а остальные 200 кг в шести мощных западноевропейских реакторах, которые сейчас пользуются в основном российским, а также поступавшим ранее американским ВОУ). Реакторы с ВОУ- мишенями для производства молибдена-99 потребляют по оценкам 85 кг/год<sup>53</sup>.

### **Исследовательские реакторы советской конструкции, работающие на ВОУ-топливе**

К тому времени, когда российская программа RERTR израсходовала все выделенные средства (как раз до распада СССР в 1991 г.), она разработала несколько типов топлива достаточной высокой плотности, способных обеспечить почти все зарубежные исследовательские реакторы, топливо для которых имело уровень обогащения от 80% до 30%. В 1996 г. Аргоннская национальная лаборатория получила грант на 1.5 миллионов долларов от Фонда ГД по нераспространению и разоружению, чтобы поддержать российские ядерные институты в разработке НОУ-топлива для зарубежных реакторов советской конструкции. В 2004 ф.г. МЭ США взяло на себя ответственность за финансирование этой программы и сейчас предполагает потратить 18 миллионов долларов до 2012 ф.г. на конверсию исследовательских реакторов советской конструкции<sup>54</sup>.

<sup>48</sup> "Department Refocuses Threat Reduction Efforts to Return Nuclear Research Reactor Fuel," U.S. Department of Energy press release, April 14, 2004.

<sup>49</sup> В США: Испытательный реактор Национальной лаборатории в Айдахо (ATR, 250 МВт), Национальный институт стандартов и технологии (NBSR, 20 МВт), Окридж (HEIR, 85 МВт), университет Миссури (MURR, 10 МВт) и МТИ (MITR-II, 4.9 МВт); во Франции: (RHF-Гренобль, 58 МВт), (Орфи, 14 МВт); в Бельгии (BR-2, 100 МВт). Частное сообщение Армандо Травелли, программа RERTR, Аргоннская национальная лаборатория, 14 сентября и 17 октября 2003 г.

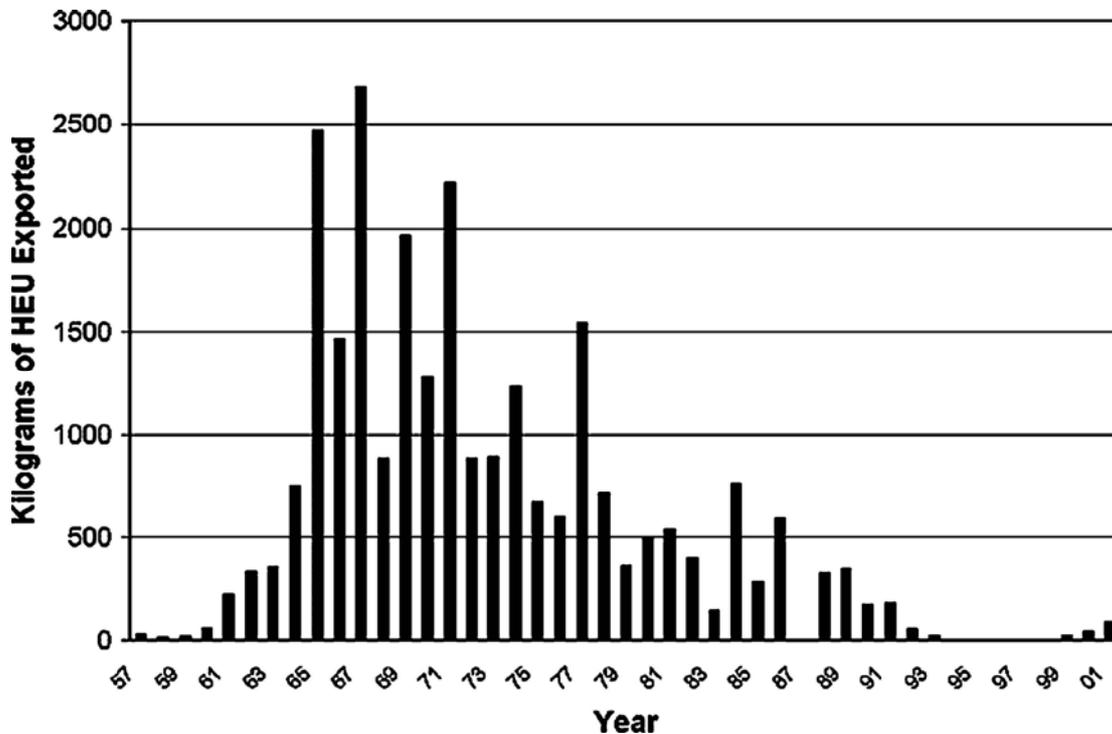
<sup>50</sup> Топливо типа U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> для FRM-2 имеет плотность 3 г/см<sup>3</sup>. Немецкое федеральное министерство по окружающей среде и ядерной безопасности требует, чтобы реактор прошел переход на топливо с обогащением менее 50% к концу 2010 г. "BMU License FRM-2 Start-Up but Requires Fuel Conversion," *Nucltomics Week* (April 24, 2003), p.6.

<sup>51</sup> См. [42].

<sup>52</sup> См. [1], p.37.

<sup>53</sup> Оценки программы RERTR - частное сообщение, 10 июня 2004 г.

<sup>54</sup> См. [1], p.37.



**Рис.1:** Вывоз ВОУ из США в 1957-2000 гг. (“Civilian Highly Enriched Uranium and the Fissile Material Convention” by Alan J. Kuperman, *NuclearPower & the Spread of Nuclear Weapons*, Paul L. Leventhal, ed., Brassey’s Inc., 2002. p.249). Комментарии к графику приведены в ряде материалов ЯРК.

Был разработан процесс замены на НОУ-топливо, который можно применить для конверсии семи зарубежных реакторов советской конструкции в Болгарии, Германии, Ливии (2), Украине и Вьетнаме. Оставшиеся 21 реактора на ВОУ-топливе советской конструкции в Чехии (2), Казахстане (2), Северной Корее, Польше, России (14) и Узбекистане требуют разработки топлива с более высокой плотностью до того, как проводить конверсию<sup>55</sup>. Семь из этих 28 реакторов – это критические сборки нулевой мощности, не потребляющие топлива в активной зоне. Но в этом случае в отличие от зарубежных реакторов того же типа с американским ВОУ, США хотят закупить для замены активные зоны с НОУ, если операторы готовы позволить провести замену активных зон с ВОУ<sup>56</sup>.

Топливные сборки в большинстве исследовательских реакторах советской или российской конструкции изготовлены в виде связки круглых, квадратных или шестигранных трубок с внешним диаметром до 7 см<sup>57</sup>. Вода протекает между трубками, а также внутри центральной трубки и омывает сборку снаружи. Программа RERTR разрабатывает заменяющее НОУ-топливо как в трубчатой, так и в игольчатой геометрии<sup>58</sup>.

Россия еще не приняла политику, похожую на ту, что содержится в поправке Шумера, и требующую, чтобы зарубежные реакторы, работающие на ВОУ-топливе, переходили на НОУ-топливо, как только последнее станет доступным. Но США обусловили свое финансирование российской программы возврата отработанного топлива обязательством конверсии соответствующих реакторов на НОУ-топливо.

<sup>55</sup> См.[1], pp. 19-20, 21, 22. Единственным доступным сейчас российским НОУ-топливом оказывается  $UO_2$  – дисперсное топливо с плотностью около  $2.5 \text{ г/см}^3$  (Армандо Травелли, частное сообщение, 31 июля 2004 г.). Немецкий реактор – это критическая сборка с одноразовой активной зоной.

<sup>56</sup> Недавно США обещали заплатить 4 миллиона долларов Румынии за НОУ-топливо для румынского реактора «Трига» в обмен на возврат в Россию свежего топлива от другого румынского исследовательского реактора. См. [1], p.18.

<sup>57</sup> “Accelerating the design and testing of LEU fuel assemblies for conversion of Russian-designed research reactors outside Russia”.

<sup>58</sup> Дисперсное уран-молибденовое топливо стержневого типа может оказаться более устойчивым к потрескиванию, чем пластинчатое топливо, потому что окружающие напряжения сжимают топливное «мясо». Частное сообщение программы RERTR, 31 июля 2004 г.

Министр энергетики Эбрахем и руководитель Минатома Румянцев пришли в 2002 г. к соглашению «работать по ускорению разработок НОУ-топлива для исследовательских реакторов как советской, так и американской конструкции»<sup>59</sup>. Впрочем, образованное вместо Минатома Федеральное агентство по атомной энергии по состоянию на сентябрь 2004 г. еще не приняло обязательство поддерживать конверсию внутри России.

В известной степени такие колебания отражают озабоченность, что характеристики заменяющего топлива окажутся хуже, чем у ВОУ-топлива<sup>60</sup>. Уран-238 в НОУ поглощает часть нейтронов от деления урана-235. Это снижает поток тепловых нейтронов. Впрочем, эффект обычно оказывается порядка 3-10%<sup>61</sup>. Для большинства экспериментов небольшая потеря потока должна быть терпимой. Убедить в этом операторов российских реакторов должно стать высокоприоритетной задачей.

У России имеются также четыре исследовательских реактора, для которых типы топлива, разрабатываемые в настоящее время, вряд ли окажутся подходящими<sup>62</sup>. Если будет разработано НОУ-топливо для ледокольного реактора КЛТ-40, его можно будет применить для конверсии упомянутых четырех реакторов – или наоборот.

Хотя Китай формально не участвует в международной деятельности RERTR, он спроектировал новый исследовательский реактор с использованием НОУ-топлива на силициде урана, а также проводит исследования по осуществимости перевода на НОУ-топливо реакторов с мощностью 125 МВт и 5 МВт<sup>63</sup>.

### Критические сборки и импульсные реакторы

Если даже программа RERTR выполнит свои задачи (в том виде, как они сейчас определены), она коснется только части многообразия исследовательских реакторов на ВОУ-топливе. Как следует из данных МЭ США, кроме 105 исследовательских реакторов на ВОУ-топливе, которые попадут под действие программы RERTR (включая, по крайней мере, 23 реактора, которые сейчас не планируют конвертировать<sup>64</sup>), остаются еще 56 исследовательских реакторов, которые

«...по ряду причин МЭ исключило из программы конверсии.... Некоторые используются для

<sup>59</sup> Совместное заявление министров Эбрахема и Румянцева, 16 сентября 2002 г.

<sup>60</sup> Когда в ноябре 2003 г. Румянцева спросили в интервью о влиянии конверсии реакторов на науку, которую можно проводить на исследовательских реакторах, он ответил: «Это уменьшит научную ценность экспериментов. Получить что-то новое становится фактически невозможным.» Александр Емельяненко, «Россия и США будут иметь дело с исследовательскими реакторами советского производства», *Российская газета*, 19 ноября 2003 г., стр. 1, 12.

<sup>61</sup> Смотрите, например, расчеты типичного исследовательского реактора мощностью 30 МВт в докладе Alexander Glaser and Frank von Hippel, "On the importance of ending the use of HEU in the nuclear fuel cycle. An updated assessment," 2002 International RERTR Meeting.

<sup>62</sup> Большинство исследовательских реакторов работают при температуре ниже 100 °С, а их активные зоны находятся либо в воде, либо под давлением. Ураново-молибденовый сплав, на котором основано будущее программы RERTR, страдает от увеличения разбухания под действием радиации по мере возрастания температуры и давления захваченных внутри его газовых продуктов деления. Пока что топливо испытывалось только до температуры 180 °С, характерной для первого этапа работы активной зоны при 50%-ном выгорании и до 140 °С при выгорании 80%. В России имеются два исследовательских реактора под давлением, которые спроектированы для работы при температуре воды около 280 °С – это реактор SM-3 на 100 МВт в Димитровграде (НИИ атомных реакторов) и пока еще не работающий реактор PIK на 100 МВт в Санкт-Петербурге (Институт ядерной физики). Реакторы RBT 10/2 и RBT 2/6 на МВт каждый в Димитровграде пользуются топливом, извлеченным из реактора SM-3.

<sup>63</sup> Юан Лю Жен, главный инженер реактора CARR, Китайский институт атомной энергии – частное сообщение, 23 июля 2004 г.

<sup>64</sup> Восемь американских реакторов, обсужденных ранее, для которых НОУ-топливо доступно, но чья конверсия еще не обеспечена финансированием; 13 иностранных реакторов, также обсужденных выше и содержащие американское ВОУ в одноразовых активных зонах; немецкий реактор советской конструкции с одноразовой активной зоной, а также южноафриканский реактор «Сафари», который сейчас содержит ВОУ-топливо, изготовленное по бывшей южноафриканской программе ядерного оружия. Кроме того, в докладе GAO приведены три иностранных реактора с американским ВОУ-топливом, которые не могут быть конвертированы, но либо намечены для остановки (Израиль), либо по ним еще не принято решения (Япония и Португалия). См. [1], p.16.

военных или иных целей, например, для космических двигательных установок, где требуется ВОУ. Другие расположены в странах типа Китая, которые до сих пор не сотрудничают с США по вопросам перевода своих реакторов на НОУ. Наконец, время и расходы, связанные с разработками НОУ-топлива для ряда реакторов, могут оказаться больше, чем ожидаемые сроки работы таких реакторов и польза от них»<sup>65</sup>.

Большей частью речь идет о критических сборках с «нулевой мощностью» и об импульсных реакторах<sup>66</sup>. Оба класса реакторов не нуждаются в перезагрузке активной зоны, поскольку за время их существования не происходит деления значительной части запаса урана-235.

До сих пор программа RERTR игнорировала большинство таких реакторов, так она практически была направлена на прекращение поставок ВОУ-топлива для исследовательских реакторов. США и Россия имеют также наибольшие возможности влияния на конверсию исследовательских реакторов, требующих перезагрузку топлива, так как они могут отказаться от поставок ВОУ-топлива или от возвращения отработанного ВОУ-топлива в отношении тех операторов, которые не согласны на конверсию, когда разработано НОУ-топливо для приемлемой замены.

Впрочем, в активных зонах тех исследовательских реакторов, которые не нуждаются в перезагрузке и в которых не заинтересована программа RERTR, имеется значительное количество ВОУ. Более того, это топливо уязвимо к хищению, поскольку его очень легко перенести и с ним легко обращаться из-за того, что оно содержит мало продуктов деления и поэтому радиоактивность его очень мала.

Критические сборки БФС1 и БФС2 Физико-энергетического института в Обнинске (Россия) являются предельными примерами угрозы безопасности, которые несут критические сборки. Установка БФС, где находятся эти сборки, содержит 8.7 тонн урана, обогащенного до 36%-ного и 90%-ного содержания урана-235, а также 0.8 тонн плутония. Из значительной части материала изготовлено около 90000 дисков диаметром 4.7 см и толщиной в пределах 0.06-0.57 см<sup>67</sup>. Соответствующим примером импульсного реактора служит реактор БИГР Института экспериментальной физики (ВНИИЭФ) в Сарове (Россия). Его активная зона содержит 833 кг урана с обогащением 90%. Перевод таких установок на НОУ потребует приобретение новых типов топлива, которые в ином случае не приобретались бы.

Впрочем, должно быть возможным (и желательным) вообще уничтожить наиболее критичные установки. Большинство определяющих экспериментов по критичности, которые нужны компьютерным программам, применяемым для моделирования поведения системы реактор - активная зона, уже проведены<sup>68</sup>. Например, быстрая критичная установка ZPPR в Аргоннской национальной лаборатории (американский аналог установки БФС) была заглушена в 1997 г.<sup>69</sup>

ВНИИЭФ запросил средства на проведение исследования о возможности перевода БИГР и

---

<sup>65</sup> См. [1], p.10.

<sup>66</sup> Исключением являются исследовательский реактор «Трига» в Сандийской национальной лаборатории с кольцеобразной активной зоной на 4 МВт; два уже упомянутых китайских реактора; реактор на 2 МВт в Чили, который работает так мало, что вряд ли будет перезагружаться; индийский реактор на 0.4 МВт – как сообщают, Индия его конвертировала; два прототип космических реакторов на бывшем советском полигоне в Казахстане и небольшой российский реактор на быстрых нейтронах (BOR-60) – эта информация предоставлена Аргоннской национальной лабораторией. Сюда же входят восемь китайских реакторов -очень маломощных (0.03 МВт) миниатюрных источников нейтронов, каждый из которых содержит примерно по 1 кг ВОУ с обогащением 90% в активной зоне, имеющей большую длительность работы. Китай экспортировал пять таких реакторов в Гану, Иран, Нигерию, Пакистан и Сирию. Канада экспортировала реактор Slowpoke такого же типа в Ямайку. Канада перевела два из своих реакторов Slowpoke на НОУ-топливо. Затрат на конверсию реактора в Ямайке оцениваются в 1.5 миллионов долларов. См. [1], p.17. США тоже экспортировали реакторы Аргоннской лаборатории очень малой мощности, в активных зонах которых содержится до 5 кг урана оружейного качества, во Францию, Японию и Голландию, а вариант на НОУ-топливе – в Австрию, Бразилию и Францию. См. [2].

<sup>67</sup> И.П.Матвиенко, «Запасы ядерных материалов на установке БФС», доклад, представленный на конференцию MPC&A-2000, Обнинск, 22-26 мая 2000 г.

<sup>68</sup> “Applicability of ZPR critical experiment data to criticality safety,” presentation by R. Schaefer, S. Au-meier and H. McFarlane at the Experts’ Meeting on Experimental Needs in Criticality Safety, Albuquerque, New Mexico, September 25-26, 1995. Гарольд Макфарлейн, Аргоннская национальная лаборатория, частное сообщение 10 июня 2004 г.

<sup>69</sup> См. [2].

другого импульсного реактора того же института на НОУ-топливо<sup>70</sup>. Если результаты произведут впечатление, может начаться изучение возможности конвертирования импульсных реакторов для других российских, американских, английских и китайских оружейных лабораторий, где имеются такие установки.

### **Реакторы для производства трития, для ледоколов, плавающих электростанций, подлодок и реакторы космического базирования**

Даже полное многообразие исследовательских реакторов, включая критические сборки и реакторы с импульсной мощностью, которые пока что не являются целью для конверсии, оказываются частью еще более крупного многообразия реакторов с ВОУ-топливом. Действительно, потребление ВОУ реакторами для производства трития, для ледоколов и подлодок значительно превышает потребление исследовательскими реакторами.

**РЕАКТОРЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТРИТИЯ.** Американские реакторы двойного назначения для производства плутония и трития, находившиеся в Саванна Ривер на площадке МЭ, использовали ВОУ-топливо до закрытия в 1989 г.<sup>71</sup> С окончанием холодной войны производство плутония в США было прекращено.

В будущем любое производство трития для замены компонента ядерного оружия будет проводиться на энергетических реакторах с НОУ-топливом.

Судя по сообщениям, на российском предприятии «Маяк» еще действуют два реактора на ВОУ-топливе мощностью 1000 МВт для производства трития и других изотопов. По оценкам эти реакторы потребляют до 1.5 тонн урана оружейного качества в год, что превышает потребление исследовательских реакторов во всем мире<sup>72</sup>. Поэтому их конверсия была бы весьма стоящей.

В России продолжают работать три реактора для производства плутония по той причине, что они обеспечивают снабжение соседнего населения водой и электроэнергией. Основным топливом этих реакторов служит естественный уран, но в них применяется также некоторое количество топлива из урана оружейного качества для выравнивания мощности внутри активной зоны<sup>73</sup>. США взяли на себя обязательство построить на замену реакторам обычные угольные электростанции, но расходы выросли до уровня, соответствующего постройке реакторов, что ставит будущее проекта под сомнение<sup>74</sup>.

**ЛЕДОКОЛЬНЫЕ РЕАКТОРЫ.** В России действуют 11 реакторов на ВОУ-топливе на семи атомных ледоколах, которые в среднем потребляют ежегодно все вместе около 0.4 тонны урана-235. Российский комплекс производства реакторов переделывает ледокольный двигательный реактор КЛТ-40 для плавающей электростанции. Ведущий российский институт по разработке ядерного топлива – институт Бочвара, запросил американское финансирование для разработки НОУ-топлива как для плавающей электростанции, так и для ледокольных реакторов<sup>75</sup>. Первый этап процесса разработки топлива, поддерживавшийся международным научно-техническим центром в Москве, завершился в 1997 г.<sup>76</sup>, но последующее финансирование не поступило.

**РЕАКТОРЫ ДЛЯ ПОДЛОДОК.** Если бы российский флот проявил согласие, разработанное для российских ледоколов топливо можно было бы также приспособить под конверсию российских реакторов для подлодок. ВОУ-топливо в топливном цикле этих реакторов вызывает основную тревогу с точки зрения распространения<sup>77</sup>. Франция переводит свои реакторы для подлодок от ВОУ на НОУ по экономическим причинам. Китай, скорее всего, применяет топливо с обогащен-

<sup>70</sup> «Использование НОУ в импульсных реакторах ВНИИЭФ», предложение в МНТЦ, Москва, 2004 г.

<sup>71</sup> См. [16].

<sup>72</sup> См. [32].

<sup>73</sup> D.F. Newman, C.J. Gesh, E.F. Love, and S.L. Harms, *Summary of near-term options for Russian plutonium production reactors*, Pacific Northwest Laboratory, PML-9982, 1994, p.10.

<sup>74</sup> DOE's effort to close Russia's plutonium production reactors faces challenges, and final shutdown is uncertain, GAO-04-662, 2004.

<sup>75</sup> A. Savchenko (Bochvar Institute). "Development and validation of LEU core for nuclear icebreakers and floating nuclear power plant reactors (FNPP) to avoid the risk of nuclear material proliferation," April 24, 2003.

<sup>76</sup> A. Vatulin, V. Lysenko and A. Savchenko, "Designing a new generation fuel element for different purpose water reactors," 1997 International RERTR Meeting.

<sup>77</sup> См. [10]. Впрочем, сейчас безопасность ядерных топливных циклов на российских подлодках значительно выросла. См. Morten Bremen Maerli, "U.S.–Russian naval security upgrades: Lessons learned and the way ahead," *Naval War College Review* (Autumn 2003), p.20. (<http://www.nwc.navy.mil/press/Review/2003/Autumn/pdfs/art2-a03.pdf>).

нием, близким к НОУ, для своих подлодок<sup>78</sup>. Индия разрабатывает реактор для подлодок, который, как передают, заполняется урановым топливом с обогащением 30-45%<sup>79</sup>. Бразильский флот утверждал в 2000 г., что в это время его обязали применять НОУ для бразильской программы реакторов в подлодках<sup>80</sup>.

Перевод американских и английских реакторов для подлодок на НОУ окажется более трудным. Французские и российские реакторы перезагружаются топливом каждые 5-10 лет. США и Англия, пытаясь избежать остановок реакторов при перезагрузке, переходят к активным зонам такой конструкции, чтобы продлить срок годности корабля до 45 лет. В 1995 г., докладывая в Конгрессе, управление ядерными двигательными установками подлодок МЭ утверждало, что плотность урана в его реакторах для подлодок нельзя увеличить и поэтому длительность существования активной зоны придется сохранить, а переход на НОУ потребует иметь в три раза более крупные и, соответственно, более дорогие активные зоны<sup>81</sup>. Не было проведено независимой экспертизы такого утверждения. Поскольку информация о топливе реакторов для подлодок является секретной, такую экспертизу пришлось бы проводить в условиях секретности.

Для следующего поколения ядерных судов могут быть изменены конструкции реактора и топлива<sup>82</sup>. Если окажется необходимым, новые суда могут быть также спроектированы так, чтобы разместить более крупные активные зоны. Можно будет также пересмотреть компромиссы между крупными активными зонами и перезагрузкой с интервалами 15-20 лет. Хотя это потребует значительного обязательства со стороны ведущих правительственных чиновников убедить ВМФ США в серьезном рассмотрении таких альтернатив, вопрос заслуживает того, чтобы им заняться. Поток оружейного урана, проходящий через топливные циклы реакторов для подлодок, несет с собой серьезные риски, связанные с распространением ядерного оружия и ядерным терроризмом, и это уже затрудняет контроль за ядерными вооружениями<sup>83</sup>.

**КОСМИЧЕСКИЕ РЕАКТОРЫ.** В прошлом СССР и США выводили на околоземную орбиту реакторы малой мощности с ВОУ-топливом. Подавляющее большинство было запущено Советским Союзом для питания космических радаров, предназначенных для слежения за американскими силами особого назначения. При администрации Рейгана проявлялся интерес к разработке реакторов, вырабатывающих энергию для противоракетного пучкового оружия, что оживляло лозунг «звездных войн»<sup>84</sup>. Недавно НАСА заявило о проекте разработки реактора для снабжения энергией проекты полетов к другим планетам и, возможно, также для того, чтобы сократить сроки полета человека на Марс<sup>85</sup>. Все космические реакторы проектируются с использованием урана оружейного качества. Только одно достаточно беглое исследование было проведено с целью оценок увеличения веса при использовании НОУ-топлива. Было найдено, что увеличение веса окажется значительным в случае реакторов на быстрых нейтронах, для которых требуется урановое топли-

---

<sup>78</sup> Похоже, что конструкции реакторов для китайских подлодок основаны на конструкциях первых российских лодочных реакторов, в которых использовался ВОУ с обогащением 21%. См. [34].

<sup>79</sup> Mark Hibbs, "India to equip centrifuge plant with improved rotor assemblies," *Nuclear Fuel* (Dec.1,1997), p.7.

<sup>80</sup> Mark Hibbs, "Brazil may enrich to HEU for submarine reactor fuel," *Nuclear Fuel* (July 24, 2000), p.7.

<sup>81</sup> *Report on the use of the LEU in naval reactors* by the Director, Naval Nuclear Propulsion, 1995.

<sup>82</sup> Для более детального обсуждения технических вопросов смотрите Thomas D. Ippolito, *Effects of Variations of Uranium Enrichments on Nuclear Submarine Design*, Master of Science Thesis, MIT Department of Nuclear Engineering, May 1990. Also, Marvin M. Miller, "Nuclear Submarines and their Implications for Weapons Proliferation," in *Averting a Latin American Nuclear Arms Race*, Paul L. Leventhal and Sharon Tanzer, eds., Macmillan, London (1992), p.153.

<sup>83</sup> США предложили, чтобы Договор о прекращении производства делящихся материалов (ФМСТ), который запретит будущее производство этих материалов для военного пользования, не требовал ратификации. Как сказал автору осведомленный сотрудник американского правительства, такое решение в значительной степени продвигал ВМФ США, озабоченный, что ФМСТ может повлиять на будущие поставки топлива из урана оружейного качества.. Поскольку США накопили достаточно топлива из урана оружейного качества, чтобы обеспечить свои и английские ядерные корабли примерно на 100 лет, такое послабление будет ненужным, если США и Англия захотят разрабатывать конструкции с НОУ-топливом для своих будущих ядерных судов в течение этого периода.

<sup>84</sup> Стивен Афтергуд, «Использование ядерной энергии в космосе», *Наука и всеобщая безопасность*, т.1, вып.2 (1991 г.).

<sup>85</sup> "Project Prometheus," NASA, (<http://spacescience.nasa.gov/missions/prometheus.htm>), July 28, 2004.

во с обогащением порядка 20%<sup>86</sup>. Вес всегда является важным фактором для стоимости космических проектов. Впрочем, следует провести детальное исследование альтернатив с НОУ-топливом до того, как позволить применение ВОУ-топлива.

## ЛИКВИДАЦИЯ ИЗБЫТОЧНОГО ПОТЕНЦИАЛА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РЕАКТОРОВ

До обсуждения возможности конверсии первым вопросом, на который следует дать ответ, будет таким : а не стоит ли лучше ликвидировать исследовательский реактор? Как сообщает МАГАТЭ, в мире существуют 275 действующих исследовательских реакторов<sup>87</sup>. Лица, отвечающие за программу исследовательских реакторов МАГАТЭ, недавно подсчитали, что, возможно, только 30-40 % исследовательских реакторов потребуются в будущем<sup>88</sup>. В вышедшем ранее докладе МАГАТЭ вопрос ставится таким образом:

Требования во всем мире к изучению ядерных наук, обучению, исследованиям, разработке технологии и к обслуживанию реакторов уменьшаются, так что больше не требуется большое число исследовательских реакторов, которые сейчас действуют. Поэтому многие установки стоят перед проблемой отыскать пользователей для своих услуг или же перейти на постоянное отключение и, в конечном счете, уничтожение. Только реакторы с специальными особенностями (например, высокий поток нейтронов, источник холодных нейтронов, моделирование условий работы энергетических реакторов) или с клиентами, имеющими промышленный интерес (например, производство радиоактивных изотопов или допинг кремния) будут адекватно использоваться<sup>89</sup>.

В период между 1996 г. и 2000 г. было заглушено 47 исследовательских реакторов, но только 12 были введены в строй. Можно ожидать, что подобная тенденция продолжится, так как большинство из исследовательских реакторов во всем мире уже проработало свыше 30 лет, а строятся всего семь и планируются еще восемь. МАГАТЭ предположило, что заинтересованная в исследовательских реакторах общественность будет лучше обслужена, если небольшие страны сосредоточат свое внимание на совместном пользовании «высококачественными региональными центрами», где один реактор сможет обслужить несколько соседних стран<sup>90</sup>. Аналогичная идея региональных исследовательских реакторов могла бы осуществиться в крупных странах, например в России и США.

МАГАТЭ отметило далее в отношении уже заглушенных, но еще не уничтоженных реакторов, существующих в мире, следующее:

Существует серьезное опасение, что многие из заглушенных, но не уничтоженных реакторов все еще имеют на своих площадках топливо, как свежее, так и отработанное. Длительная задержка между заглушкой и уничтожением повлияет на затраты и безопасность во время уничтожения, в основном, из-за потери опытного штата сотрудников (уже постаревших во время заглушки), которые требуются для участия при уничтожении<sup>91</sup>.

В 2000 г. Международная группа советников по ядерной безопасности при МАГАТЭ настаивала на «надлежащем уничтожении» свыше 200 заглушенных исследовательских реакторов<sup>92</sup>.

К сожалению, бюджетные ограничения иногда работают против заглушки и ликвидации реак-

<sup>86</sup> *Impact of the use of low or medium enriched uranium on the masses of space nuclear reactor power systems* (Department of Energy, Office of Nuclear Energy, 1984).

<sup>87</sup> Иайн Ритчи, МАГАТЭ, частное сообщение, 28 июля 2004 г. Впрочем, база данных МАГАТЭ по исследовательским реакторам в России оказалась неполной. В нее не входят, например, исследовательские реакторы и критические сборки, расположенные во ВНИИЭФ (российский аналог Лос Аламоса).

<sup>88</sup> "New life for research reactors? Bright future but far fewer projected," IAEA press release, March 8, 2004, (<http://www.iaea.org/NewsCenter/Features/Research/Reactors/reactors20040308.html>).

<sup>89</sup> См. [29]. Генеральный директор объединенного исследовательского центра Европейского Союза тоже заметил, что Европа стоит перед избытком исследовательского потенциала. "Enlarging EU faces oversupply of research and test reactors," *Nucleonics Week* (March 23, 2000), p.13.

<sup>90</sup> См. [88].

<sup>91</sup> См. [29].

<sup>92</sup> "Over 200 research reactors need decommissioning, ISAG told IAEA," *Nucleonics Week* (Sept. 28, 2000), p.11.

торов. Хотя в удаленном будущем уничтожение реактора сэкономит средства, с точки зрения годовых бюджетов будет дешевле продолжать работать на реакторе или сохранять его в безопасном заглушенном состоянии. Ликвидация исследовательских реакторов может стоить миллионы или десятки миллионов долларов, а типичные затраты на работающем реакторе обычно не превышают немногих миллионов долларов в год<sup>93</sup>. Для ядерных институтов может также оказаться затруднительным получить финансирование на новые программы при наличии заглушенного реактора. Эта ситуация может быть облегчена на несколько лет, если сотрудники, принимавшие участие в поддержании реактора и в работах на нем, примут участие в процессе очистки от следов реактора<sup>94</sup>. Для научных сотрудников существует также возможность стать «группой пользователей» на другом исследовательском реакторе. Такие меры являются вполне привычными в США и Западной Европе, но, по-видимому, не в России<sup>95</sup>. Возможно, в России проще всего будет заглушить исследовательский реактор на ВОУ-топливе, если он находится в институте, где имеется множество исследовательских реакторов, штаты сотрудников которых можно комбинировать для работы на одном или двух наиболее перспективных исследовательских реакторах института.

**Табл. 1.** Текущие программы устранения ВОУ-топлива и сбора отработанного ВОУ-топлива

	Разработка НОУ-топлива	Конверсия	Уничтожение
Исследовательские реакторы	Да (RERTR)	Да (не в России)	В основном, нет
- без давления	Нет	Нет	Нет
- под давлением	Нет (с некими исключениями)	Нет	Да (МСС)
- критические установки	Нет	Нет	Нет
- импульсные реакторы	Нет	Нет	Нет
Ледокольные реакторы	Нет	Нет	Нет

<sup>93</sup>Расходы на ликвидацию занимают широкий диапазон значений в зависимости от степени активации и заражения, а также от стандартов, установленных на очистку. Дания выделила 66 миллионов долларов на ликвидацию своего реактора D-3 с мощностью 10 МВт и еще двух меньших реакторов, а также на возвращение занимаемой площади к состоянию «нетронутой природы». Укажем для сравнения, что оцениваемые затраты на слежение за отработанным топливом заглушенных датских реакторов составляли 2.6 миллионов долларов ежегодно. “Danes Begin Decommissioning of Rise Laboratory Reactors,” *Nucleonics Week* (August 29, 2002), p.7. Уничтожение немецкого реактора KNK на 58 МВт будет стоить 12 миллионов долларов. “Westinghouse gets KNK job,” *Nucleonics Week* (April 12, 2001), p.14. Остановка английского реактора BTR-300 на 0.3 МВт будет стоить 3.2 миллионов долларов. “BNFL Gets Dismantling Contract For Scottish Research Reactor.” *Nucleonics Week* (June 10, 1999), p.15. США согласились помочь Латвии ликвидировать заглушенный реактор на ВОУ-топливе с мощностью 5 МВт в Институте ядерной физики (Саласпилс). По оценкам 1999 г. полные расходы составили 21 миллионов долларов (<http://www.nti.org>). Операционные расходы также занимают широкий диапазон в зависимости от мощности исследовательских реакторов и проводимых исследований. Корнеллский университет недавно принял решение заглушить свой реактор «Трига» на 0.5 МВт, на работу которого тратилось по оценкам 0.5 миллионов долларов в год. “Cornell Board of Trustees Votes in Favor of Closing Reactor,” *Nucleonics Week* (May 31, 2001), p.3. Операционный бюджет реактора МТИ с мощностью 5 МВт составляет примерно 2.9 миллионов долларов в год, а бюджет на 1999-2000 гг. для реактора Мичиганского университета на 2 МВт был равен примерно 1.7 миллионов долларов. 2 МВт был равен примерно 1.7 миллионов долларов. На принятие решения о закрытии оказывали влияние требования ядерного регулирования. В 2001 г. Мичиганский университет рассматривал решение о закрытии своего реактора отчасти по той причине, что он требовал подтверждения лицензии и обновления, а такие расходы оценивались в 5-10 миллионов долларов. “DOE reviewing task force advice on university research reactor.” *Nucleonics Week* (May 17, 2001), p.3.

<sup>94</sup> «Марта Кребс – директор Управления по науке МЭ... добавила, что по всей вероятности в ближайшие два года на реакторе будет достаточно предварительной работы для закрытия, чтобы оправдать оставление полного штата сотрудников, состоящего из 90 человек, Надо будет осушить реактор от всех жидкостей и удалить все топливо», “Brookhaven Research Reactor To Permanently Close, DOE Says,” *Nucleonics Week* (November 18, 1999), p.15.

<sup>95</sup> Частное сообщение, Николай Архангельский, Российское агентство по атомной энергии, 6 октября 2003 г.

Реакторы для трития	Нет	Нет	Нет
Реакторы подлодок	Во Франции	Во Франции	Да

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Табл.1 подведены итоги того, что сделано и не сделано для устранения использования ВОУ-топлива.

Все существующие программы выиграют от увеличения бюджетов. Но существенны также политическая поддержка на высоком уровне и внимание, чтобы расширять усилия и удалять или преодолевать бюрократические преграды.

Недавно появились некоторые проявления интереса на высоком уровне в американском правительстве к устранению применения ВОУ в гражданских ядерных реакторах. В мае 2004 г. Сенат дополнил закон о расходах на оборону на 2005 ф.г. приложением, где санкционировано развитие усилий на то, что часто называют «глобальным вычищением» от гражданских делящихся материалов, имеющих военное применение, и от радиологических материалов, которые можно использовать при создании так называемых «грязных бомб».

Два из указанных элементов всеобъемлющей программы приведены ниже.

- «Разработка альтернативных топлив и облучаемых мишеней, основанных на НОУ, для конверсии исследовательских или иных реакторов, работающих на ВОУ... а также конверсия реакторов и облучаемых мишеней, применяющих ВОУ...»
- «Предоставление содействия при закрытии и уничтожении площадок, которые определены как представляющие риск распространения привлекательных делящихся материалов...»<sup>96</sup>

Представляя это дополнение, сенатор Доменичи сказал следующее:

Приведу как пример потенциальную угрозу, связанную с исследовательскими реакторами – российскими ледоколами, получающими энергию от ядерных реакторов, использующих ВОУ. Я полагаю, что мы сможем помочь конвертировать эти реакторы в течение данной программы<sup>97</sup>.

Впрочем, дополнение не получило дополнительного финансирования.

Неделей позже министр энергетики Спенсер Эбрахемс заявил в Вене о «новой инициативе – Инициативе по уменьшению глобальной угрозы», где, похоже, он в чем-то расширил задачи ряда существующих программ МЭ:

- « Возврат свежего ВОУ-топлива российского происхождения к концу 2005 г. и завершение возврата отработанного ВОУ-топлива российского происхождения к 2010 г. ...»
- «Завершение возвращения отработанного топлива американского происхождения для исследовательских реакторов в рамках нашей текущей программы из всех мест во всем мире в течение десяти лет...» (Все топливо американского происхождения не покрывается в рамках текущей программы).
- Работа над конверсией активных зон гражданских исследовательских реакторов, применяющих ВОУ, для перехода к НОУ-топливу. Мы сделаем это не только в США, где планируется завершить конверсию активных зон до 2013 г., но и по всему миру...» (Все гражданские исследовательские реакторы не покрываются в рамках текущей программы)<sup>98</sup>.

Эбрахемс заявил, что США «планируют выделить более 450 миллионов долларов на эти усилия, чего будет более чем достаточно для завершения программ по возврату отработанного топлива от исследовательских реакторов из других стран и по возврату топлива от российских исследовательских реакторов, а также для финансирования конверсии всех намеченных активных

<sup>96</sup> Закон S.2400 в том виде, как он был принят Сенатом 23 июня 2004 г.. раздел 3132, «Ускорение удаления или безопасности делящихся материалов, радиологических материалов и соответствующего оборудования в уязвимых местах по всему миру.»

<sup>97</sup> *Congressional Record*, May 19, 2004, S5772.

<sup>98</sup> «Заметки, подготовленные министром энергетики Спенсером Эбрахемсом» - МАГАТЭ, Вена, 26 мая 2004 г.

зон реакторов, поставленных Соединенными Штатами и Россией исследовательских реакторов в рамках программы RERTR.» Он объявил также, что «мы создадим простую организацию в рамках администрации по национальной ядерной безопасности МЭ, которая будет заниматься исключительно этими усилиями.»

Таким образом, хотя это еще не новый план, появляется новая ясность, чтобы изучить возможность расширения существующих программ. Впрочем, когда у МЭ спросили, какое новое финансирование оно запросило по новой инициативе на 2005 ф.г., ответ оказался разочаровывающим – всего 5 миллионов долларов. К тому же палата представителей отказала даже в таких средствах без предоставления программного плана<sup>999</sup>. Можно надеяться, что когда МЭ разработает программный план, оно вернется к этому вопросу в Конгрессе с предложением перераспределить значительное финансирование от программ с низким приоритетом для поддержки новой инициативы.

Потребуется еще значительные усилия для разработки и введения в действие всеобъемлющей американской программы помощи устранению ВОУ из гражданского ядерного топливного цикла. Затем потребуются дальнейшие усилия, чтобы получить обязательства российского правительства осуществить такую же программу в России. Наконец, потребуется еще более крупное усилие для введения в действие всеобщих программ для устранения ВОУ из топливного цикла реакторов подлодок.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Мне хотелось бы поблагодарить многих коллег, которые прокомментировали эту статью, включая Олега Бухарина, Джорджа Банна, Мэттью Банна, Алана Красса, Мику Ловенталя, Марвина Миллера, Иайна Ритчи и Армандо Травелли. Конечно, я несу ответственность за любые оставшиеся ошибки и высказанные мнения. Два гарвардских доклада – *Controlling Nuclear Warheads and Materials: A Report Card and Action Plan* by Matthew Bunn, Anthony Wier and John Holdren (2003), and *Securing the Bomb: An Agenda for Action* by Matthew Bunn and Anthony Wier (2004), представляют собой выдающиеся источники информации для любой политической деятельности в этой области. Оба могут быть найдены по адресу: <http://www.nti.org/cnwm>. Доклады ежегодных международных конференций по программе RERTR (<http://www.td.anl.gov/Programs/RERTR/RERTR.html>) также служат выдающимися источниками информации по техническим вопросам.

---

<sup>99</sup> *Congressional Record*, June 25, 2004, pp. H5118-19.