ГЛАВА 2. ЯДЕРНОЕ ОРУЖИЕ И АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Как ядерное оружие, так и атомная энергетика основаны на действии процессов, протекающих в недрах вещества. Для понимания специфики ядерного оружия и методов предотвращения его распространения необходимо хотя бы кратко рассмотреть некоторые аспекты этого вопроса: главные технические проблемы на пути к созданию ядерного оружия, особенности делящихся материалов, выделяющие их среди радиоактивных веществ, процесс деления и слияния ядер, цепную реакцию деления, некоторые особенности урана и плутония, основные фазы ядерного топливного цикла (ЯТЦ), а также значение различных типов реакторов для целей нераспространения.

Главные проблемы на пути к ядерному оружию

Путь к ядерному оружию был впервые проложен в 1940-х гг. Программа его создания в США (Манхэттенский проект) осуществлялась ускоренными темпами в условиях мировой войны. Она потребовала напряженных усилий тысяч ученых из многих стран и мобилизации передовых отраслей самой развитой индустрии мира. Даже по официальным данным затраты составили 2 млрд долл. (свыше 16 млрд долл. в ценах конца века)[1], работа длилась шесть лет. Аналогичный путь прошли и другие ЯОГ, однако с каждым десятилетием «атомный секрет» становился более прозрачным, в первую очередь благодаря росту общего уровня научно-технических знаний. В 1980-е гг. ЮАР смогла создать шесть ЯВУ на основе собственной технологии, используя не более 400 специалистов и затратив менее одного миллиарда долларов[2].

Обобщенная характеристика показателей научно-технического потенциала, необходимого для производства ОМУ, была дана в одной из публикаций Службы внешней разведки (СВР) России[3]. Помимо кадровых ресурсов и достаточного научного потенциала[4],

---

[1] По неофициальным данным, затраты достигли 25 млрд долл. в ценах 1940-х гг.

[2] См.: www.fas.org/nuke/intro.htm.

[3] См.: Новый вызов после «холодной войны»: распространение оружия массового уничтожения. М., СВР, 1993, с.32.

[4] По оценкам японских специалистов, для создания ядерного оружия необходимо примерно 1 300 инженеров и 500 ученых, в числе которых — около 120 специалистов-атомщиков. Государство, желающее создать ядерное оружие, может использовать как обучение собственного персонала за рубежом, так и приглашение иностранных атомщиков, имеющих опыт в создании компонентов оружия. По мнению экспертов СВР, необходимо разработать «систему национальных санкций и межгосударственных многосторонних соглашений, налагающих ответственность на специалистов — граждан одних государств, участвующих в создании ОМУ в других государствах». См.: Новый вызов после «холодной войны»: распространение оружия массового уничтожения, с.20.

в этом издании особо отмечаются технические аспекты производства ОМУ, связанные с наличием сырьевых ресурсов для собственного производства его компонентов, импортом недостающего сырья и компонентов, созданием соответствующих технологий и производственных мощностей.

Наиболее узкое место на пути к ядерному оружию — это создание или приобретение делящихся материалов. Это же является и самой дорогостоящей частью военной ядерной программы. Например, свыше 80% расходов США на создание первой атомной бомбы были связаны с затратами на получение расщепляющихся материалов.

Таблица 1. «Ядерный клуб» и соискатели

1945, 16 июля	США: первое ядерное испытание
1949, 29 августа	СССР: первое ядерное испытание
1952, 3 октября	Великобритания: первое ядерное испытание
1952, 31 октября	США: первое термоядерное испытание
1953, 12 августа	СССР: первое термоядерное испытание
1957, 15 мая	Великобритания: первое термоядерное испытание
1960, 13 февраля	Франция: первое ядерное испытание
1964, 16 октября	Китай: первое ядерное испытание
1967, 1 января	«ядерная черта» по ДНЯО
1967, 17 июня	Китай: первое термоядерное испытание
1968, 24 августа	Франция: первое термоядерное испытание
1974, 18 мая	Индия: первое ядерное испытание
1990, 24 октября	СССР: последнее ядерное испытание
1991, 26 ноября	Великобритания: последнее ядерное испытание
1992, 23 сентября	США: последнее ядерное испытание
1996, 27 января	Франция: последнее ядерное испытание
1996, 29 июля	Китай: последнее ядерное испытание
1998, 11 мая	Индия: первое термоядерное испытание
1998, 28 мая	Пакистан: первое ядерное испытание

В процессе формирования режима нераспространения мировое сообщество, создавая соответствующие политические стимулы и структуры, одновременно уделило первостепенное внимание научно-техническим аспектам проблемы. Начиная с ДНЯО 1968 г., главный упор был сделан на усилиях по контролю за ядерными материалами (ЯМ).

Радиоактивные изотопы

Каждый элемент периодической таблицы характеризуется строго определенным числом протонов в ядре. В то же время количество нейтронов в ядре может быть различным. Атомы элементов, в ядрах которых одинаковое число протонов, но разное число нейтронов, называются *изотопами* соответствующего

Спутниковые снимки объектов ядерных центров Израиля, Индии и Пакистана



Пакистан
Комплекс по обогащению урана в Кахуте, активно развивающийся в последние десять лет.



Израиль
Ядерный центр в Димоне, являющийся ключевым звеном в израильской программе производства ядерного оружия.



Индия
Атомный исследовательский центр им. Хоми Бабы — ведущий индийский институт в области ядерных исследований и разработок.

Источник: www.fas.org.

элемента. В природе обнаружено 94 вида элементов (90 из них стабильны), еще около пятнадцати получены искусственно. В то же время количество стабильных изотопов достигает трехсот. Различие химических свойств изотопов минимально, что сильно затрудняет их разделение, зато их ядерные свойства могут различаться в значительной степени.

Например, водород в основном состоит из атомов, в ядре которых содержится только один протон. Но примерно в одном из 6 500 атомов водорода находится один протон и один нейтрон. Такой изотоп называют *дейтерий* (или водород-2). Он повсеместно встречается в природе, в частности, входит в состав молекул воды, которую в случае высокой концентрации дейтерия называют *тяжелая вода*. Она практически неотличима от обычной воды в химическом отношении, «незаметно» используется в быту и промышленности. Если выделить всю тяжелую воду Земли, ею можно было бы заполнить емкость Черного моря. Однако ее выделение — сложный процесс, к которому прибегают из-за замечательных ядерных свойств дейтерия. Дейтерий хорошо замедляет нейтроны, причем слабо поглощает их. Эти свойства определяют необходимость контролировать тяжелую воду в рамках режима нераспространения подобно ЯМ, используемым для производства оружия. Большую роль в создании ядерного оружия играет и другой изотоп водорода — водород-3, или *тритий*.

Изотопы одного элемента принято различать по сумме протонов и нейтронов в ядре, которая именуется *атомным* или *массовым числом*. Оно добавляется к названию элемента, например уран-235, уран-238, плутоний-239, плутоний-241 и т.д. В составе ядра урана-235 — 92 протона (как и у любого изотопа урана), а кроме них — 143 нейтрона, что в сумме составляет атомное число этого изотопа. В ядре плутония-239 — 94 протона и 145 нейтронов.

За 15 млрд лет существования Вселенной возникшие в период ее образования и позднее радиоактивные ядра почти все распались, в том числе все изотопы элементов, стоящих в периодической таблице после урана (порядковый номер 92), именуемых трансурановыми элементами. Время, в течение которого распадается половина начального количества атомных ядер, называют *периодом полураспада*. Эти периоды различны для разных изотопов. Немногих сохранившихся радиоактивных изотопов тем больше, чем больше у них период полураспада. Все остальные (более двух тысяч) получены искусственным путем.

Радиоактивные изотопы получили самое широкое применение в мировой экономике, особенно в медицине, промышленной рентгенографии, в устройствах контроля за окружающей средой, в сельском хозяйстве практически всех стран мира. В сельском хозяйстве они используются для выявления болезней скота, определения влажности почв, стерилизации сельскохозяйственных

Таблица 2. Периоды полураспада некоторых изотопов

Изотоп	Период полураспада (в годах)	Изотоп	Период полураспада (в годах)
Торий-232	14 млрд	Плутоний-239	24,1 тыс.
Уран-238	4,46 млрд	Плутоний-240	6,5 тыс.
Уран-235	704 млн	Плутоний-238	87,7
Плутоний-244	81 млн	Плутоний-241	14,4
Плутоний-242	376 тыс.	Водород-3	12,3
Уран-234	245 тыс.	(тритий)	

продуктов, при селекционной работе в растениеводстве, при контроле за качеством продовольствия и обеспечении их гигиенических свойств. В США, например, выдано 157 тыс. лицензий на использование радиоактивных материалов, причем общее количество устройств, в которых они применяются, превышает 1 800 тыс.: это ионизационные индикаторы дыма, светящиеся надписи, контрольно-измерительные приборы и т.д.[5] В подавляющем большинстве случаев речь идет о микроскопических количествах радиоактивных изотопов, не оказывающих заметного воздействия на естественный уровень радиации (природный фон) и не представляющих опасности для здоровья людей. МАГАТЭ оказывает разнообразное техническое содействие государствам-участникам по укреплению их потенциала радиационной безопасности и сохранности радиоактивных материалов[6].

Лишь малая часть радиоактивных изотопов может быть использована в целях получения ядерной энергии в атомной промышленности или в военных целях. Международный контроль в интересах нераспространения через МАГАТЭ и иные структуры осуществляется в первую очередь в отношении делящихся, или расщепляющихся, материалов, в которых возможно осуществление цепной реакции.

Деление и слияние ядер

Самопроизвольное (спонтанное) деление ядра наблюдается в природе у тяжелых элементов с числом протонов больше 90. В результате спонтанного деления могут появляться как стабильные, так и новые нестабильные изотопы, деление которых продолжается.

[5] См.: *Бюллетень МАГАТЭ*, №3, Том 41, 1999, с.22. Весьма широкое распространение получили, например, противопожарные детекторы дыма на основе америция-241, открытого Гленном Сиборгом в ноябре 1945 г. Одного грамма америция хватает для работы пяти тысяч таких детекторов. Большая часть из нескольких килограммов америция, ежегодно получаемого в США, идет на эти цели. См.: www.uilondon.org/americum.htm.

[6] См.: *Бюллетень МАГАТЭ*, №2, Том 40, 1998. Все издание посвящено роли МАГАТЭ в обеспечении радиационной безопасности.

В ходе спонтанного деления ядра нейтроны могут вылетать за пределы атома. Например, в одном килограмме урана-235 освобождается за секунду примерно один нейтрон, а у изотопов плутония — 60-300 тыс. нейтронов. Нейтрон обладает способностью при попадании в другое ядро тяжелого элемента вызывать его деление.

В 1939 г. было обнаружено, что процесс деления ядер урана-235 нейтронами сопровождается появлением новых нейтронов в большем количестве, что создает возможность цепной реакции в той мере, в которой высвобожденные нейтроны продолжат процесс деления ядер. *Цепная реакция* — цепь процессов, аналогичных тому, который вызвал их начало; она может идти с затуханием, самоподдержанием и расширением. Незатухающая цепная ядерная реакция была впервые осуществлена 2 декабря 1942 г. в чикагском реакторе, построенном под руководством Энрико Ферми. Аналогичный реактор был запущен в Советском Союзе 26 декабря 1946 г. (под руководством академика И.В. Курчатова). В дальнейшем была открыта возможность цепной ядерной реакции в искусственно полученных ЯМ.

Уже в середине XX века подконтрольным отдельным государствам оказалось как военное применение деления и слияния (синтеза) ядер (1945-1953), так и мирное использование процесса деления на атомных электростанциях (1954). На реакции деления основано действие *атомного оружия (А-бомба)*, на реакции синтеза — *термоядерного*, или *водородного (Н-бомба)*. В совокупности они объединяются названием *ядерное оружие*[7].

Оба названия оружия, основанного на слиянии ядер, проистекают из особенностей протекания реакции синтеза. Во-первых, если делению ядер нейтральными частицами не препятствует электростатическое отталкивание, то синтезу положительно заряженных ядер оно весьма противодействует. Поэтому к слиянию оказываются способны ядра легких элементов с наименьшими зарядами, т.е. изотопы водорода — дейтерий и тритий. Во-вторых, для реакций деления температура среды не играет роли, но она очень существенна для протекания обратного процесса, отсюда — термоядерное оружие[8].

Температуры порядка 100 млн градусов достижимы в земных условиях при реакции деления ядер тяжелых элементов. При взрывах водородных (термоядерных) боеприпасов атомные заряды, входящие в их состав, играют роль детонатора. Разрушительная мощь термоядерного оружия примерно в шесть-восемь раз больше атомного боезаряда аналогичной массы[9], а высвобождающаяся

---

[7] В широком понимании ядерное оружие включает и средства доставки.

[8] Помимо аномально высоких температур, совершенно необходимым условием детонации термоядерного боеприпаса является достижение сверхвысокого давления.

[9] В реальном ЯВУ мощность боеприпаса обусловлена преимущественно его конструкцией в зависимости от целевого назначения.

энергия соответствует по масштабу энергии извержения вулкана, землетрясения или урагана.

Энергия, выделяющаяся в значительных количествах при распаде, делении и слиянии ядер (ядерных превращениях), получила название *атомной* или *ядерной энергии*. Поскольку при делении ядра урана масса его осколков оказывается в сумме легче исходной на 20% массы одного протона, ученые легко рассчитали параметры энергии деления. Всего один грамм урана-235 при полном делении его ядер способен дать 23 тыс. кВт · ч тепла, а при сжигании угля или нефти для этого потребовалось бы три тонны энергоносителя. При этом энерговыделение произойдет чрезвычайно быстро, что особенно важно для его военного использования. Если цепная реакция начнется с деления всего одного ядра, то за половину одной тысячной секунды (примерно 53 поколения делящихся ядер) 57 г делящегося вещества выделят энергию, эквивалентную взрыву тысячи тонн обычной взрывчатки (мощность ядерных взрывов принято измерять в *тринитротолуоловом эквиваленте* — ТНТ).

Не все свободные нейтроны вызывают деление ядер. Во-первых, как нейтрально заряженная частица, нейтрон может пролететь значительное расстояние до какого-либо взаимодействия с ядром и даже вылететь из нужной среды, не испытав столкновения. Во-вторых, находясь среди атомов урана-235, нейтрон может взаимодействовать с ядром и поменять направление своего движения (рассеяться), а может и поглотиться ядром, не вызвав его деления. В-третьих, нейтроны имеют разную скорость (быстрые и медленные нейтроны) и по-разному взаимодействуют с различными ЯМ.

Ядра всех тяжелых элементов относятся к категории делимых (способных разделиться под действием нейтронов), однако ядра урана-235, плутония-239 и урана-233 лучше делятся под действием медленных (тепловых) нейтронов. С другой стороны, для начала процесса деления на основе тория-232 и урана-238 необходимы быстрые нейтроны. Отсюда перед создателями реакторов с использованием, например, урана-235 встала проблема замедления нейтронов ради создания условий, необходимых для цепной ядерной реакции.

Наконец, для каждого делящегося вещества существует своя минимальная масса, в которой возможно протекание самоподдерживающейся цепной реакции деления. Эту массу называют *критической массой* (КМ). КМ делящегося вещества зависит от его геометрической формы, объема, плотности и посторонних примесей. КМ минимальна для сферической формы ЯМ. Ее можно уменьшить примерно вдвое, окружив образец делящегося вещества слоем материала, отражающего нейтроны, например, бериллия или природного урана. Если использовать

сжимание делящегося вещества, например, при неядерном взрыве вокруг сферы расщепляющегося материала (*имплозии*[10]), КМ можно уменьшить еще значительнее. Хотя расчетное значение КМ для шара из урана-235 — 40-60 кг, а из плутония-239 — порядка 10-20 кг, МАГАТЭ считает 25 кг урана-235 и 8 кг плутония-239 *значимым количеством* ЯМ, опасность переключения которого на изготовление оружия должна быть своевременно предотвращена. Специалисты полагают, что расход делящегося материала на одну бомбу — 20 кг урана-235 либо 4,7 кг плутония-239. Наименьшая теоретически возможная КМ плутония-239 оценивается в несколько сотен граммов. Для еще более тяжелых изотопов трансурановых элементов критическая масса значительно ниже.

С точки зрения возможных нарушителей режима нераспространения, необязательно добиваться минимальных размеров взрывного устройства, если технически или экономически это окажется неприемлемым. Поэтому считается возможным использование для взрыва урана с обогащением более 20%.

Хотя в основе действия и атомного оружия, и ядерного реактора лежат аналогичные процессы деления ядра, между бомбой и реактором есть существенная разница в характере протекания этих процессов. Военное использование цепной реакции нацелено на максимальное выделение энергии в сжатые сроки, в то время как в реакторе развитие процесса идет подконтрольно. Главный показатель, количественно характеризующий цепную ядерную реакцию — коэффициент размножения нейтронов К. Он измеряется как отношение числа нейтронов следующего поколения к числу нейтронов предыдущего поколения.

Уран, плутоний и другие ядерные материалы

В 1788 г. немецкий химик Мартин Хайнрих Клапрот выделил из урановой смолки (добываемой в Чехии руды) то, что он посчитал новым элементом (оказавшимся в дальнейшем оксидом). Поскольку всего за семь лет до этого англичанин Уильям Хершель открыл новую планету, названную немцем Иоганном Боде в античной традиции Ураном (Uranus), это имя пользовалось большой популярностью в научной среде. В пару планете Клапрот предложил назвать новое вещество урания (Urania), а в дальнейшем за выделенным действительно новым элементом закрепилось чуть

[10]Хотя имплозия стала в современных ядерных арсеналах практически единственным способом создания КМ для ядерного взрыва, в первой атомной бомбе, сброшенной на Хиросиму, был использован другой метод, основанный на быстром сближении двух частей ядерного материала, вместе составляющих КМ (ствольная, или пушечная, бомба). Любопытно, что ЯВУ, тайно построенные в ЮАР, были основаны именно на этом более простом и, казалось бы, устаревшем методе.

видоизмененное имя уран (uranium). До конца XIX века уран применялся лишь в фотографии и для получения редких оттенков желтого цвета в глазури.

Встречающийся в природе уран состоит из смеси трех изотопов — урана-238 (99,276%), урана-235 (0,718%) и урана-234 (0,0056%). Отношение веса урана-235 к весу всего урана называется *обогащением* (для целей МАГАТЭ при этом к весу урана-235 добавляется вес искусственно получаемого изотопа урана-233). Для использования в большинстве реакторов АЭС достаточно обогащения порядка 3-5%, высокообогащенным (ВОУ) считается уран после уровня в 20% обогащения, а в реальном оружии обогащение урана превышает 93%. Понижение уровня содержания урана-235 в смеси изотопов называется разобогащением. При содержании урана-235 ниже природного уровня уран именуется обедненным.

Самоподдерживающаяся реакция деления ЯМ, имеющихся в природе, возможна только в уране-235. Гораздо более доступный уран-238 называют сырьевым материалом для ядерного воспроизводства (*воспроизводящим материалом*), так как при облучении его нейтронами возможно образование делящегося материала. Его способность поглощать лишние нейтроны используется в реакторном топливе для удержания процесса под контролем[11].

Помимо урана-238 к воспроизводящим материалам относят достаточно широко встречающийся в природе торий-232 (а также получаемый искусственно плутоний-240). В той мере, в которой будут истощаться урановые залежи Земли, в отдаленной перспективе возможно повышение внимания к ториевому циклу: при облучении нейтронами торий превращается в уран-233, т.е. делящийся ЯМ. Пока, кроме официальных ЯОГ, лишь Индия и Япония ведут исследования в этой области. В документах МАГАТЭ торий рассматривается, как правило, наравне с обедненным ураном.

Второй вид делящегося материала, реально применяемого при производстве ядерного оружия — плутоний-239. Его период полураспада в 24 100 лет оказывается слишком мал для того, чтобы он сохранился во Вселенной. Поэтому плутоний-239 получают искусственным путем при нейтронном облучении урана-238. Атомный номер плутония — 94, а массовые числа его изотопов — от 230 до 247. Он был впервые получен американцем Гленном Сиборгом в 1940 г. и назван по аналогии с планетой Плутон, открытой за десять лет до этого.

---

[11]В то же время следует указать, что ядра урана-238 делятся под воздействием высокоэнергетических нейтронов. Это его свойство используется для создания так называемой трехфазной бомбы, работающей по принципу: «деление — синтез — деление» (вокруг термоядерного заряда такого ЯВУ создается оболочка из урана-238, деление которого способствует значительному увеличению энергии взрыва).

Хотя известно 15 изотопов плутония (все они высокотоксичны), лишь один из них (помимо плутония-239) получил практическое применение в промышленных целях: плутоний-238, получаемый в ядерных реакторах из нептуния-237, используется для производства компактных термоэлектрических генераторов. Плутоний, содержащий свыше 80% плутония-238, может освобождаться из-под гарантий МАГАТЭ (INFCIRC/153, п. 36)[12]. Высокая стоимость и радиоактивность сделали непрактичным применение плутония-241. Присутствие в смеси плутония-240 и плутония-242 повышает КМ.

При обычной урановой загрузке легководного реактора АЭС в составе тонны облученного ядерного топлива (ОЯТ) через три года после выгрузки находится примерно: 0,2 кг плутония-238, 5,3 кг плутония-239, 2,2 кг плутония-240, 0,9 кг плутония-241, 0,4 кг плутония-242. Однако существует возможность увеличить выход плутония-239, так как он одним из первых изотопов образуется в реакторе из воспроизводящего материала (урана-238). Поэтому интересам нераспространения соответствует удлинение режима облучения. Подобно урану, изотопный состав плутония также оценивают в процентах, но «от противного»: чем меньше в нем плутония-240, тем более он пригоден в качестве оружейного. По классификации, принятой в США, оружейным считается плутоний с содержанием плутония-240 менее 5,8%[13].

МАГАТЭ относит ВОУ, уран-233 и плутоний с содержанием плутония-238 менее 80% к *материалу прямого использования*. Причем плутоний считается наиболее опасным, если судить хотя бы по тому, что понятие *эффективный килограмм*[14] введено Агентством на основе веса всего плутония в килограммах, в то время как масса других ЯМ пересчитывается в эффективные килограммы в определенных пропорциях (для тория, например, 20 тыс. кг считаются одним эффективным килограммом). Это связано с тем, что выделение плутония из ОЯТ намного проще процесса обогащения, или изотопного разделения урана. Поэтому ЯОГ шли к первому испытанию атомного оружия в основном плутониевым путем.

Если говорить о ЯМ в целом, то в международно-правовых документах они подразделяются на *исходный материал* (торий, уран с природным обогащением или обедненный) и *специальный расщепляющийся материал* (плутоний, обогащенный уран и уран-233), внутри которого особняком стоит материал прямого

---

[12]МАГАТЭ. Док. INFCIRC/153. Нераспространение ядерного оружия: Сборник документов, М., Международные отношения, 1993, с.81.
[13]См.: Подвиг П.Л. (ред.). Стратегическое ядерное вооружение России. М., ИздАТ, 1998, с.75.
[14]МАГАТЭ. Док. INFCIRC/66/Rev.2. Нераспространение ядерного оружия: Сборник документов, с.56.

использования. Развернутое определение того, что считать исходным и специальным расщепляющимся материалом, дано в Уставе МАГАТЭ (ст. XX), Договоре о создании Евратома (ст. 197), Меморандуме А (п. 2) Комитета Цангера и др.[15]

Для целей физической защиты применяется выделение трех категорий ЯМ. Согласно приложению С к Руководящим принципам ядерного экспорта, материалы категории III[16] могут использоваться и храниться в пределах зоны, доступ в которую контролируется. Материалы категории II[17] используются и хранятся только в пределах защищенной зоны, которая должна находиться под постоянным наблюдением охраны или электронных устройств и быть обнесена физическим барьером с ограниченным числом пропускных пунктов, под соответствующим контролем. Перевозка материалов II и III категории разрешается со специальными мерами предосторожности, включая предварительную договоренность между отправителем, получателем и перевозчиком и предварительное соглашение между организациями, находящимися под юрисдикцией и руководствующимися нормами регулирования государств-поставщиков и государств-получателей соответственно, предусматривающие в случае международной перевозки время, место и процедуры передачи ответственности за перевозку. К наиболее высокой, I категории относят два и более килограммов плутония или урана-233, пять и более килограммов ВОУ. Использование и хранение материалов категории I разрешается только в пределах усиленно защищенной зоны. Доступ в усиленно защищенную зону должен быть дополнительно ограничен лицами, надежность которых была проверена, и под наблюдением охраны, тесно связанной с соответствующими системами реагирования. Перевозка таких материалов осуществляется только со специальными мерами предосторожности, под постоянным наблюдением конвоя и при условиях, которые обеспечивают тесную связь с соответствующими силами реагирования[18].

По оценкам, на Земле к середине 1990-х гг. было накоплено 1 200 т плутония, из которых примерно 250 т сосредоточивалось в военных арсеналах. К концу XX века количество плутония возросло еще на 400 т[19]. Из плутония в невоенных программах около 120 т было выделено в процессе переработки ОЯТ до 1991 г.,

---

[15]МАГАТЭ. Док. INFCIRC/66/Rev.2, с.151, 152.

[16]К категории III относят: 500 г или менее плутония, 1 кг или менее ВОУ, менее 10 кг урана (с обогащением 10% и более), 10 кг или более урана (с обогащением менее 10%) и т.д.

[17]К категории II относят: от 500 г до 2 кг плутония, от 1 до 5 кг ВОУ, 10 кг и более урана (с обогащением 10% и более), от 500 г до 2 кг урана-233 и т.д.

[18]Руководящие принципы ядерного экспорта. Нераспространение ядерного оружия: Сборник документов, с.211-213.

[19]См.: Albright David, Berkhout Frans, Walker William. Plutonium and Highly Enriched Uranium 1996. World Inventories, Capabilities and Policies. SIPRI, 1996, pp.395-398.

еще 190 т, как предполагается, выделены в течение 1990-х гг. Количество произведенного ВОУ оценивается в 1 700 т (±25%), и, кроме этого, 100-200 т ВОУ относится к транспортным реакторам. Под гарантиями МАГАТЭ, по данным на конец 2000 г., находилось примерно 642,8 т плутония в облученном топливе и 72,2 т извлеченного плутония (включая около 20 т в НЯОГ), а также 21,8 т ВОУ (включая одну тонну в НЯОГ)[20].

Ядерный топливный цикл

Ядерный топливный цикл включает добычу урановой руды и производство уранового концентрата, конверсию и изотопное обогащение урана, изготовление реакторного топлива, его облучение в реакторах, хранение и переработку ОЯТ и обращение с радиоактивными отходами. ЯТЦ считается замкнутым, если в него входит переработка ОЯТ и повторное использование делящихся материалов. Процессы обогащения и переработки считаются *чувствительными фазами* ЯТЦ, и к экспорту соответствующих технологий и оборудования применяются особые ограничения в рамках режима нераспространения (решения ГЯП).

Исторически мирный ЯТЦ складывался в государствах, создавших ядерное оружие, в тесной связи с военным ЯТЦ. В СССР, например, оба цикла оказались интегрированными и на уровне урановых потоков, и в конкретных комбинатах[21]. Запасы природного урана шли как на производство оружейного плутония, так и установки по обогащению урана, откуда часть потока ВОУ опять же попадала в оружейную цепочку[22].

Хотя в реактор загружается относительно малое количество ядерного топлива, если сравнивать с ТЭЦ, работающей на угле или мазуте, весь ЯТЦ охватывает движение значительных объемов и масс материалов. Для того, чтобы получить одну тонну уранового топлива (объемом 0,4 куб. м), необходимо добыть три тысячи тонн руды (1 500 куб. м). Основная масса этого материала пойдет в «хвосты» — отвалы породы после извлечения полезного элемента[23]. В случае незамкнутого цикла тонна ОЯТ считается высокоактивными отходами и подлежит, со временем, захоронению, причем оказывается использованной лишь малая часть природного урана (порядка одного процента).

---

[20]См.: Ежегодный доклад МАГАТЭ за 1999 г.
[21]См.: Бухарин О.А. Интеграция военного и гражданского ядерных топливных циклов в России. *Ядерный Контроль*, №9, сентябрь 1995, с.10-13.
[22]См.: Стратегическое ядерное вооружение России, с.71.
[23]См.: The Regulation of Nuclear Trade. Non-proliferation — Supply — Safety. Vol.I. International Aspects. Paris, Nuclear Energy Agency. OECD, 1988, p. 251, 252.

К 1992 г. в 21 стране мира действовало 55 урановых рудников. За период 1938-1999 гг. было добыто около 1,9 млн т природного урана, больше всего в США, Канаде, ГДР, СССР и его правопреемниках, ЮАР, КНР, Чехословакии, Франции, Нигере, Австралии. В соответствии с полноохватной системой гарантий МАГАТЭ[24] термин *исходный материал* не интерпретируется как применяющийся к руде или отходам руды (INFCIRC/153, пп. 33 и 112). В то же время любой исходный или специальный расщепляющийся материал, определенный в Уставе МАГАТЭ, может быть поставлен под гарантии по соглашениям, заключенным на основе старой системы (INFCIRC/66/Rev.2).

Производство урановых концентратов максимально приближено к местам добычи урана. Урановый концентрат проходит доочистку (аффинаж) от бора, кадмия и других поглощающих нейтроны элементов, а также от редкоземельных элементов. К концу 1980-х гг. производство концентрата было сосредоточено (около 85%) в девяти странах (Австралия, Габон, Канада, Намибия, Нигер, СССР, США, Франция, ЮАР). Большая часть разведанных запасов Советского Союза находилась на территории России (до 300 тыс. т), Казахстана (576,7 тыс. т) и Узбекистана (230 тыс. т); добыча руды велась также в Таджикистане, Киргизстане, Украине. Производство и импорт урана (из Чехословакии, ГДР, а также Болгарии и Венгрии) достигали в 1970-1980-е гг. порядка 30 тыс. т ежегодно, однако в 1990-е гг. производство снизилось в несколько раз, а импорт прекращен[25].

Полученный после первой фазы необогащенный продукт может быть затем либо переработан в топливо реакторов, работающих на природном уране (например, тяжеловодных), либо преобразован в гексафторид урана для последующего обогащения. В ЯОГ значительная часть (до 70%) потреблявшегося природного урана направлялась по третьему пути: на производство плутония-239 в военных целях, однако в середине 1990-х гг. его выделение было прекращено (в США — с 1989 г.). Согласно системе полноохватных гарантий МАГАТЭ (INFCIRC/153, пункты 104, 106) они применяются в НЯОГ в отношении природного урана и другого ЯМ на заводах по обработке урана и разделению его изотопов, а также в любом другом месте, где ЯМ обычно используется в количестве, превышающем один эффективный килограмм (т.е. 10 тыс. кг для урана с обогащением 0,5-1%)[26]. В России в настоящее время переработкой природного урана и производством гексафторида занимается в основном Ангарский электролизный химический комбинат (северо-западнее Иркутска).

---

[24]См.: Нераспространение ядерного оружия: Сборник документов, с.80, 106.
[25]См.: Стратегическое ядерное вооружение России, с.68, 69.
[26]См.: МАГАТЭ. Док. INFCIRC/153. Нераспространение ядерного оружия: Сборник документов, с.104.

К иным «нечувствительным» фазам ЯТЦ относят изготовление топливных элементов для реакторов, хранение ОЯТ и захоронение РАО. Документы, принятые в Комитете Цангера, относят установки для производства топливных элементов к оборудованию или материалам, специально предназначенным или подготовленным для обработки, использования или производства специального расщепляющегося материала (раздел 2.4 Меморандума В, раздел 4 Приложения)[27], экспорт которых контролируется на основании ДНЯО (ст. III.2).

Создание топливных элементов из урана и плутония способствует безопасности использования ЯМ и делает этот процесс максимально подконтрольным. Ядерному материалу придают цилиндрический вид, причем в процессе изготовления ЯМ нагревают до 1 700 градусов и обтачивают с точностью до десятитысячных долей миллиметра. Таблетки герметически упаковывают в стержни, из которых, в свою очередь, формируются топливные сборки. Размеры таблеток, стержней (или других тепловыделяющих элементов) и состав сборок различаются в зависимости от типа конкретных реакторов. Уязвимость к краже или переключению ЯМ в форме топлива зависит исключительно от эффективности гарантий и мер физической защиты, определенных международно-правовыми документами и внутренним законодательством государств. Привлекательность топливных сборок для возможных похитителей находится в прямой зависимости от уровня обогащения находящегося в них ЯМ, поэтому в особой защите нуждаются сборки с ВОУ, например, для транспортных реакторов атомных подводных лодок (АПЛ).

Производство топливных элементов в силу экономической целесообразности развито практически во всех странах, имеющих атомную энергетику. В России оно сосредоточено на Машиностроительном заводе в Электростали (Московская обл.) и Заводе химических концентратов в Новосибирске.

Непереработанное ОЯТ само по себе не слишком привлекательный объект для кражи или переключения ЯМ прежде всего из-за его высокой радиоактивности. Извлеченное из реакторов ОЯТ выдерживается в резервуарах с водой (от года до 20 лет), а затем отправляется в специальных контейнерах в места «сухого хранения» (вдали от реакторов). Характерный для таких транспортных контейнеров тип имеет стенки толщиной в полметра, весит более 100 т и вмещает 6-12 топливных сборок. Он способен выдержать падение с девятиметровой высоты, удары (вплоть до удара от упавшего самолета), восьмичасовое нахождение под водой (на глубине 15 м) и пребывание в пламени (800 градусов) в течение получаса. Проблема окончательного захоронения ОЯТ, в

[27]См.: там же, с.155, 165.

случае отказа от его переработки, по-разному решается отдельными государствами и пока не нашла однозначного решения.

В зависимости от радиоактивности РАО классифицируются как слабо-, средне- и высокоактивные. После выпаривания, сжигания и опрессовывания слабо- и среднеактивные РАО цементируют в специальных емкостях для захоронения. На высокоактивные РАО при относительно малых объемах (в сравнении с другими категориями) приходится 99% радиоактивного излучения всех отходов. Они представляют определенную опасность с точки зрения проблем нераспространения, для устранения которой разработан ряд методов: битуминизация, остекловывание (сплавление со стеклянным порошком) таких отходов с последующим захоронением.

Чувствительные фазы ядерного топливного цикла

Наибольший интерес с точки зрения задач ядерного нераспространения вызывают фазы ЯТЦ, связанные с обогащением урана и переработкой ОЯТ. В ходе процесса разделения изотопов, по определениям МАГАТЭ, ЯМ сразу превращается из исходного в специальный расщепляющийся. В дальнейшем остается преимущественно количественная разница между достижением уровня в 2-4% обогащения, достаточного для топлива АЭС, и уровня в 20%, за которым уран становится ВОУ — материалом прямого использования, контролируемым МАГАТЭ с особым вниманием. При применении технологии газового центрифугирования, например, 10 повторных операций необходимы для выхода на уровень в 3% обогащения и всего 35 — на уровень в 90%, реально применимый в вооружениях. По технологии газовой диффузии — использование 1 100 и 3 700 барьеров, соответственно[28].

Риск распространения возрастает с каждым процентом обогащения урана, поскольку чем оно выше, тем меньше у ЯМ критическая масса и тем привлекательнее он становится для переключения на немирные цели. Теоретически можно построить атомную бомбу с применением урана, обогащенного всего до 10-20%, правда, КМ возрастет при этом до тонн[29]. Однако не следует забывать, что первая атомная бомба со всеми приспособлениями тоже весила порядка пяти тонн.

В международно-правовых документах, посвященных ядерному нераспространению, значимость обогащения выражена, в частности, системой пересчета урана в эффективные килограммы:

[28]См.: Potter William. Nuclear Power and Nonproliferation. An Interdisciplinary Perspective. Cambridge (Mass.), Oelgeschlager, Gunn & Hain, 1982, p.77.
[29]См.: Nuclear Proliferation and Safeguards. Congress of the United States. Office of Technology Assessment. New York, London, Praeger Publishers, 1977, p.143.

его вес умножается на квадрат обогащения (INFCIRC/153, пункт 104). Это значит, что килограмм урана с обогащением 10% приравнен к 10 эффективным граммам, а с обогащением в 90% — уже к 810 г. «Установки для разделения изотопов урана и оборудование, кроме аналитических приборов, специально предназначенное или подготовленное для этого» отнесены Комитетом Цангера к оборудованию или материалам, специально предназначенным или подготовленным для обработки, использования или производства специального расщепляющегося материала (раздел 2.5 Меморандума В), экспорт которых контролируется на основании ДНЯО[30]. Подробное описание этих установок и оборудования дано в Приложении к меморандуму (раздел 5).

Известно несколько способов обогащения урана. Одним из старейших является *газовая диффузия*. Гексафторид урана, переходящий в газообразное состояние при 56°С, прокачивается через пористый барьер (мембрану). Наращивая количество мембран, повышают обогащение. Большим экономическим недостатком является очень высокое потребление электроэнергии для реализации этой технологии, хотя тем самым ее использование резко затруднено для тех государств, которые попытались бы скрытно обойти барьеры нераспространения. Эта технология была освоена в США, СССР (до 1950-х гг.), Франции, Китае. Пилотные установки построены в Аргентине, Италии, Нидерландах, ФРГ.

Иная технология предполагает вращение гексафторида в вертикальной *центрифуге*. При скорости 40-50 тыс. оборотов в минуту молекулы, включающие атомы урана-235, скапливаются ближе к оси. Выигрыш в сравнении с диффузионным процессом — десятикратное уменьшение потребляемой энергии и еще большее сокращение количества повторных операций, необходимых для достижения сравнимых уровней обогащения. Среди недостатков — ограниченные объемы производства на каждой установке. Центрифугирование на промышленной основе осуществляется в России, Великобритании, ФРГ, Японии, Нидерландах. Пилотные установки построены в Бразилии, Индии, Китае, Пакистане, США. Среди прочих методов обогащения — аэродинамические (Бекер, Хеликон), лазерные (AVLIS, MLIS, LAP), химические (ACEP, Chemex) и электромагнитные (EMIS и др.). В США на промышленной основе использовались диффузионная и электромагнитная (EMIS) технологии, а в ЮАР — Хеликон. В гораздо более широком круге государств осуществлялись НИОКР в этой области: помимо ЯОГ, к диффузионной технологии проявляли интерес Ирак, Иран и Япония; к центрифужной — Австралия, Ирак, Италия и ЮАР; к аэродинамической —

[30]См.: Нераспространение ядерного оружия: Сборник документов, с.155, 165-176.

Бразилия, Ирак и ФРГ; к лазерной — два десятка стран, включая Аргентину, Бразилию, Израиль, Индию, Иран, Пакистан, ЮАР и Южную Корею; к химической — Бразилия, Ирак и Япония; к электромагнитной — Ирак и Иран[31]. Один перечень этих государств свидетельствует о том, что фаза обогащения урана не случайно считается чувствительной с точки зрения проблем нераспространения, будучи ключевой на «урановом пути» к ядерному оружию.

«Плутониевый путь» к бомбе в большей степени связан с другой фазой ЯТЦ — переработкой ОЯТ, благодаря которой из облученного топлива извлекаются делящиеся материалы (уран-235 и изотопы плутония), а также большая часть урана-238 (в состав тонны ОЯТ входят 943 кг урана-238, 8 кг урана-235 и 8,9 кг изотопов плутония). Мирный замкнутый ЯТЦ позволяет вернуть в производство как минимум изотопы урана; помимо регенерации урана возможна и утилизация плутония. Для этого в ряде стран налажено производство смешанного уран-плутониевого топлива (МОКС-топлива) из диоксидов обоих элементов.

Хотя в военных целях ЯОГ построили специальные реакторы, нарабатывавшие плутоний, ядерное оружие может быть создано и из плутония, выделенного при переработке ОЯТ невоенных реакторов. В 1962 г. в США был осуществлен взрыв ЯВУ, использовавшего реакторный плутоний. Повышенное значение фазы переработки для проблем нераспространения определяется и тем, что если технология обогащения урана остается во многом секретной, то основы технологии переработки стали достоянием гласности, начиная с Женевской конференции 1955 г.[32] Комитет Цангера относит «установки для переработки облученных топливных элементов и оборудование, специально предназначенное или подготовленное для этого» к оборудованию, экспорт которого контролируется на основании ДНЯО (раздел 2.3 Меморандума В и раздел 3 Приложения)[33].

Наиболее практичной и распространенной формой переработки ОЯТ является использование технологии «пурекс». При этом облученные топливные элементы измельчаются, растворяются в азотной кислоте, а затем уран, плутоний и продукты деления выделяются из раствора путем конверсии сначала из нитрата в оксид, а затем в металл.

---

[31]См.: Tyson S. Uranium Enrichment Technologies: Proliferation Implications. *Eye on Supply*, No.5, Fall 1991, p.77-92. Многих специалистов особенно заинтересовало обращение Ирака к электромагнитному методу разделения изотопов, использовавшемуся в США на самых ранних фазах ядерной программы и считавшемуся неперспективным.

[32]См.: Kokoski Richard. Technology and the Proliferation of Nuclear Weapons. Stockholm, SIPRI, 1995, p.69.

[33]См.: Нераспространение ядерного оружия: Сборник документов, с.155, 160-165.

Регенерированный уран энергетических реакторов оказывается НОУ[34] (около одного процента урана-235), а расходы на переработку превышают ценность получаемого в итоге топлива. Тем не менее процесс переработки привлекал внимание в различных государствах не только по военным причинам. В Советском Союзе, например, вплоть до 1960-х гг. ощущалась недостаточность урановых ресурсов, что способствовало ориентации на замкнутый ЯТЦ с максимальной регенерацией делящихся материалов из ОЯТ. Отработавшее топливо перерабатывалось на производственном объединении «Маяк» (Челябинск-65, ныне Озерск). После обогащения регенерированный уран использовался для изготовления топлива для транспортных реакторов АПЛ.

Вне ЯОГ наибольший интерес к переработке ОЯТ проявляют в Индии и Японии.

Ядерные реакторы

Реактор занимает центральное место в ЯТЦ. Именно в нем идет контролируемая самоподдерживающаяся цепная реакция деления ядер под действием нейтронов и происходит ядерное превращение воспроизводящего материала в делящиеся вещества. Комитет Цангера все реакторы и реакторное оборудование включил в раздел 2 Меморандума В (Исходный список), как предметы, экспорт которых подлежит обязательному контролю МАГАТЭ (Приложение, раздел 1.1)[35]. Исключение сделано для реакторов нулевой мощности[36].

Главная часть ядерного реактора, где находится ядерное топливо и протекает ядерная реакция, называется *активной зоной*. В большинстве реакторов используется *замедлитель*, с помощью которого понижается КМ (за счет увеличения числа медленных, или тепловых, нейтронов). Использование в этих целях тяжелой воды позволяет использовать уран с природным обогащением (или НОУ). По определению Комитета Цангера, вода считается тяжелой, если отношение дейтерия к водороду превышает 1:5 000 (в природной воде — 1:6 500). В период создания первых реакторов наиболее доступным был другой замедлитель — графит, производство которого было поставлено на промышленную основу. И тяжелая вода, и ядерно-чистый графит — неядерные материалы, относимые Комитетом Цангера к материалам, передача которых за

[34]Регенерированный уран исследовательских и транспортных реакторов — не обязательно НОУ.

[35]См.: Нераспространение ядерного оружия: Сборник документов, с.155, 157-159.

[36]Для целей МАГАТЭ реактор нулевой мощности определяется как реактор с проектным максимальным уровнем производства плутония, не превышающим 100 г в год.

пределы государства требует применения гарантий МАГАТЭ (раздел 2.2 Меморандума В и раздел 2 Приложения)[37]. В то же время обычная вода, которая также используется как замедлитель[38], не включена в Исходный список (ввиду общедоступности). Не требуют применения замедлителя реакторы на быстрых нейтронах. Другой элемент устройства реактора — теплоноситель. На АЭС с помощью теплоносителя тепло отводится от топливных стержней, как правило, через один или два контура; образовавшийся пар используется, как на обычной электростанции, для вращения производящей электроэнергию турбины.

Есть несколько вариантов классификации реакторов. В зависимости от технических признаков, реакторы характеризуют по:

- виду теплоносителя и замедлителя (тепловые реакторы с тяжеловодным или графитовым замедлителем, реакторы на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем, реакторы с органическим теплоносителем и т.д. (таблица 3);
- агрегатному состоянию водного теплоносителя (водо-водяные реакторы с водой под давлением или кипящей и т.д.);
- элементу, в котором создается давление теплоносителя (корпусные, канальные, канально-корпусные);
- числу контуров охлаждения;
- структуре и форме активной зоны;
- возможности перемещения (стационарные, транспортные, транспортабельные)[39].

В зависимости от назначения ядерные реакторы можно подразделить на транспортные реакторы (морские и космические), военные реакторы для наработки плутония, реакторы АЭС, исследовательские реакторы.

Транспортные реакторы (преимущественно двигатели АПЛ и атомных ледоколов) используют ВОУ, но сосредоточены практически только в признанных ЯОГ и попадают в поле зрения, связанное с проблематикой нераспространения, как правило, в связи с вопросом об утилизации силовых установок списанных АПЛ. На рубеже 1990-х гг. пять ЯОГ обладали в общей сложности 513 морскими транспортными реакторами. В то же время только в СССР (затем в России) за период после середины 1950-х гг. использовалось 468 реакторов на 245 АПЛ, пяти надводных кораблях ВМФ и девяти атомных ледоколах[40].

Исторически ЯОГ использовали три вида реакторов для наработки оружейного плутония, причем во всех реакторах, по крайней мере на начальной стадии, применялся природный уран.

---

[37]См.: Нераспространение ядерного оружия: Сборник документов, с.155, 159-160.
[38]Обычная вода не только хорошо замедляет, но и активно поглощает нейтроны, что понижает ее привлекательность в качестве замедлителя.
[39]См.: Гурин В.Н. Физические основы, системы и типы ядерных реакторов.
[40]См.: Стратегическое ядерное вооружение России, с.73.

Таблица 3. Характеристика наиболее распространенных реакторов по топливу, замедлителю и теплоносителю

Тип реактора	Топливо	Замедлитель	Теплоноситель
CANDU	природный уран	тяжелая вода	тяжелая вода под давлением
«Magnox»	природный уран	графит	углекислый газ
AGR	НОУ	графит	углекислый газ
РБМК	НОУ	графит	кипящая вода
Легководный реактор/ВВЭР	НОУ	вода	вода под давлением
BWR	НОУ	вода	кипящая вода
Реактор на быстрых нейтронах	обогащенный уран или плутоний	—	натрий

Для США, СССР и Китая было характерно использование графитовых реакторов с легководным охлаждением, в то время как для Великобритании и Франции — графитовых реакторов с газовым охлаждением. Помимо этого СССР и США использовали для производства плутония и трития реакторы, в которых и теплоносителем, и замедлителем служила тяжелая вода[41].

В отличие от военных реакторов, которые были построены в ЯОГ специально для этих целей, остальные реакторы официально не предназначаются для решения военных проблем. Возможность обхода международно-правовых барьеров на пути распространения во многом связана с использованием этих мирных реакторов для производства плутония. Три фактора оказываются определяющими при оценке реальности угрозы переключения ЯМ этих реакторов на иные цели (помимо вопросов о наличии перерабатывающей установки и мощности реактора): во-первых, обстоятельства загрузки/выгрузки топлива, во-вторых, потребность в материалах, требующих дополнительных установок (для обогащения урана или производства тяжелой воды) и, в-третьих, соотношение потребляемых и производимых расщепляющихся материалов.

При остановке реактора на перегрузку топлива возникает возможность переключения ЯМ, а от периода между остановками (т.е. сроков выгорания топлива) зависит изотопный состав ОЯТ, включая содержание ЯМ прямого использования. Для энергетических реакторов АЭС экономически выгоден максимально длительный период между перегрузками, что облегчает международно-правовой контроль за движением выгружаемых ЯМ. В то же время реакторы (преимущественно типа CANDU), использующие в качестве замедлителя тяжелую воду (тяжеловодные реакторы), могут работать непрерывно, а топливо

[41]См.: Kokoski Richard. Technology and the Proliferation of Nuclear Weapons, p.79.

перегружается без остановки реактора. Через тяжеловодный реактор мегаваттной мощности за год проходит около 130 т топлива, в то время как через средний легководный — 30 т, причем в ОЯТ реактора типа CANDU оказывается вдвое больше плутония. К тому же он ближе по изотопному составу к оружейному плутонию, чем плутоний из ОЯТ легководных реакторов, отличающихся большим сроком облучения топлива в реакторе. Тем не менее в пользу тяжеловодных реакторов свидетельствует ряд преимуществ: они используют природный уран, рентабельны при размерах вчетверо ниже минимально рентабельного легководного реактора и т.д.[42] Канада, в которой был разработан этот тип реактора (отсюда название CANDU, т.е. CANadian Deuterium Uranium), экспортировала его в Индию, Румынию, Бразилию, Южную Корею и Пакистан.

Вторым типом энергетического реактора, вызывающим повышенное внимание с точки зрения задач нераспространения, является реактор с газовым охлаждением. Реакторы типа «Magnox» (и частично его модификация AGR), при массе неудобств, преодоленных в более поздних типах реакторов, позволяют обойти два узких места, встречающихся на пути к началу цепной реакции и получению плутония: они не требуют ни тяжелой воды, ни обогащения урана. Великобритания (наряду с Францией) вплоть до 1960-х гг. делала упор на строительство этих реакторов и даже экспортировала их: по одному экземпляру в Италию и Японию (оба остановлены к настоящему времени).

Следующим фактором, учитываемым при оценке опасности переключения ЯМ на том или ином типе реактора, является соотношение потребляемых и получаемых расщепляющихся материалов. Почти все энергетические реакторы: и легководные, и тяжеловодные, и реакторы с газовым охлаждением сжигают больше делящихся материалов, чем их содержится в ОЯТ (в пропорции примерно 10:7), что сужает вероятность их использования в военных целях. В то же время реакторы-размножители (бридеры) специально разрабатывались для наращивания количества плутония (в пропорции от 10:11 до 10:14), который может использоваться в них и в качестве топлива. Новый плутоний получается в этих реакторах из урана-238, которым окружают делящийся материал. Бридеры разрабатывались в условиях имевшегося или ожидавшегося дефицита уранового топлива, поэтому относительное перенасыщение мирового рынка ураном в 1990-х гг. при сокращении строительства новых АЭС во многих странах способствовало свертыванию программ развития этих реакторов. Лидерами в этой области остаются Франция, Россия, Япония.

[42]См.: Rochlin G. Plutonium, Power, and Politics. International Arrangements for the Disposition of Spent Nuclear Fuel. Berkeley, Los Angeles, London, University of California Press, 1979, p.47.

В целом в мире к концу 2000 г. было 438 действующих реакторов и еще 33 строились. Среди них примерно половину составляли легководные реакторы с водяным теплоносителем под давлением и еще четверть — легководные реакторы с водяным кипящим теплоносителем. На тяжеловодные реакторы приходилось примерно шесть процентов. Наибольшее число энергетических реакторов было в США (104), Франции (59), Японии (53), Великобритании (35), России (29), ФРГ (19), Южной Корее (16), Индии (14), Канаде (14), Украине (13) и Швеции (11). Доля ядерной энергетики в производстве электричества составляла во Франции — 76%, Украине — 47%, Южной Корее — 41%, Швеции — 39%, Японии — 34%, ФРГ — 31%, Великобритании — 22%, США — 20%, России — 15%, Канаде — 12% и Индии — 3%[43].

Исследовательские реакторы отличаются значительным разнообразием по мощности и используемым замедлителям и теплоносителям. Уступая по масштабам и стоимости энергоблокам АЭС, они вместе с тем реже попадают в поле зрения широкой общественности[44], хотя многие из них вызывают те же вопросы, что и перечисленные выше энергетические реакторы. Кроме этого, проводимые на этих реакторах эксперименты требуют частой остановки и перегрузки топлива, что предоставляет серьезные возможности для злоупотреблений. Исследовательские реакторы служили важным средством продвижения ядерных военных программ Индии, Пакистана, Израиля, ЮАР.

Обзор технических аспектов проблем создания ядерного оружия и возможных обходов международно-правовых барьеров на пути нарушителей режима нераспространения свидетельствуют, что при всей сложности пути «к Бомбе» он становится проходимее с каждым десятилетием. С одной стороны, это ставит повышенные требования к деятельности международных контрольных органов, прежде всего МАГАТЭ, что находит свое отражение в совершенствовании их работы. С другой стороны, относительная успешность борьбы против распространения ядерного оружия в прошлом и перспектива упрочения режима нераспространения в первую очередь связаны с умелым сочетанием различных средств поддержки этого режима (политических, дипломатических, экономических и др.), среди которых методы технического контроля ЯТЦ и противодействия возможным нарушителям занимают важное, но далеко не исключительное положение.

---

[43]См.: www.iaea.or.at/programmes/a2.

[44]В течение ряда лет МАГАТЭ реализовывала международную программу (с участием России) по оценке опасности исследовательских реакторов с точки зрения возможного применения ЯМ. Главный параметр, который рассматривается при такой оценке, — мощность реактора.

ЛИТЕРАТУРА

Ауст З. Атомная энергия. М., Слово, 1994.

Гарднер Г. Ядерное нераспространение. М., МИФИ, 1995.

Нераспространение ядерного оружия: Сборник документов. М., Международные отношения, 1993.

Подвиг П.Л. (ред.). Стратегическое ядерное вооружение России. М., ИздАТ, 1998.

Радаев Н.Н., Протасов Ю.М. Технические аспекты истории создания и совершенствования ядерного оружия. М., РВСН, 1999.

Albright David, Berkhout Frans, Walker William. Plutonium and Highly Enriched Uranium. 1996. World Inventories, Capabilities and Policies. SIPRI, 1997.

Cochran T., Arkin W., Hoenig M. Nuclear Weapons Databook. Vol.I. U.S. Nuclear Forces and Capabilities. Cambridge (Mass.), Ballinger Publishing Company, 1984.

Kokoski Richard. Technology and the Proliferation of Nuclear Weapons. Stockholm, SIPRI, 1995.

Potter William. Nuclear Power and Nonproliferation. An Interdisciplinary Perspective. Cambridge (Mass.), Oelgeschlager, Gunn & Hain, 1982.

Rochlin G. Plutonium, Power, and Politics. International Arrangements for the Disposition of Spent Nuclear Fuel. Berkeley, Los Angeles, London, University of California Press, 1979.

The Regulation of Nuclear Trade. Non-proliferation — Supply — Safety. Vol.I. International Aspects. Paris, Nuclear Energy Agency. OECD, 1988.

Tyson S. Uranium Enrichment Technologies: Proliferation Implications. *Eye on Supply*, No.5, Fall 1991, 77-92.