

О ПОТЕНЦИАЛЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УРАНОВОГО ТОПЛИВА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РЕАКТОРОВ С РАЗЛИЧНЫМ УРОВНЕМ ОБОГАЩЕНИЯ

Александр Глэзер

В этой статье рассматриваются основания для выбора степени обогащения менее 20% (низкообогащенный уран – НОУ) в качестве рекомендуемого уровня обогащения для топлива исследовательского реактора для того, чтобы минимизировать общие риски распространения. Оценивается общая стратегическая ценность ядерного материала, связанного с эксплуатацией реактора, для различных уровней обогащения, в диапазоне от слабо обогащенного топлива, до топлива оружейного качества. Для количественной оценки потенциала распространения проводится оценка как потребностей в свежем урановом топливе, так и накопления плутония в облученном топливе, посредством расчета выгорания в ячейке. Анализ подтверждает полезность текущего уровня обогащения и ставит под вопрос текущую тенденцию пересмотра уровней обогащения в диапазоне от 20% до 50% для проектов новых исследовательских реакторов.

Статья получена 2 июня 2005 г. и принята к публикации 27 сентября 2005 г.

Автор работает по программе по науке и всеобщей безопасности Принстонского университета, Принстон, Нью-Джерси, США.

Посылать корреспонденцию по адресу: Alexander Glaser, Program on Science and Global Security, Princeton University, 221 Nassau Street, Princeton, NJ 08542, USA.

Адрес электронной почты: aglaser@princeton.edu

ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатация исследовательских реакторов связана с несколькими рисками распространения, которые в первую очередь связаны с топливом, требующимся для эксплуатации установки. С технической точки зрения следует рассмотреть два взаимодополняющих пути^{1,2}:

- *Перенаправление или кража высокообогащенного урана.*

Использование высокообогащенного урана (ВОУ) в топливе исследовательских реакторов непосредственно приводит к нескольким неизбежным и очевидным рискам распространения, которые связаны с перенаправлением или кражей материала. По этой причине с конца 1970-х гг. стремятся переводить исследовательские реакторы на низкообогащенное топливо. Уран, используемый в исследовательских реакторах с топливом из ВОУ, обычно обога-

¹ Гарантии МАГАТЭ были разработаны таким образом, чтобы иметь дело с некоторыми из этих рисков распространения, т.е. для того, чтобы своевременно обнаружить и противостоять изъятию ядерного материала. Однако, гарантии не могут предотвратить кражу или изъятие, и они являются неэффективными в сценарии разрыва. Поэтому в течение трех десятилетий эксперты подчеркивали важность увеличения сопротивляемости распространения, присущей самому ядерному топливному циклу, и эта мера была также признана государствами-членами МАГАТЭ во время оценки международного топливного цикла (INFCE, 1978-1980).

² Имеется несколько исторических прецедентов, которые иллюстрируют практическую значимость обеих сценариев. Наиболее важными примерами являются Израиль и Индия, которые с начала 1960-х гг. использовали не находящиеся под гарантиями установки (Димона, Сирус, и Дхрува), формально классифицированные как исследовательские реакторы, для производства плутония для своих соответствующих оружейных программ. В июне 1981 г. Израиль уничтожил иракский реактор Осирак с топливом из ВОУ, который был поставлен Францией, подозревая намерение тайного производства плутония, или перенаправления ВОУ. В 1991 г. Ирак планировал «срочную программу» для перенаправления находящегося под гарантиями обогащенного до 80% топлива из поставленного СССР исследовательского реактора (ИРТ-5000) для дальнейшего обогащения.

щен более, чем до 90% (уран оружейного качества, УОК), но любой урановый состав с содержанием U-235 по меньшей мере в 20% формально классифицируется как материал прямого использования.

В общем случае, предварительно обогащенный уран, содержащийся в свежем топливе, или извлеченный из отработавшего топлива, может также быть использован в качестве исходного материала для производства ВОУ оружейного качества, если у распространителя будут иметься небольшие обогатительные мощности.

- *Производство плутония.*

Чем ниже уровень обогащения любого ядерного топлива на основе урана, тем выше будет накопление плутония из-за нейтронного захвата в уране-238. Фактически производство плутония становится основным опасением распространения для реакторов с топливом из природного или слабо обогащенного урана, в то время как уран сам по себе становится сравнительно малопривлекательным.

Интуитивно ясно, что можно будет определить оптимальный состав урана, который подавляет образование плутония, насколько это возможно, сохраняя исходное урановое топливо непривлекательным для использования в ядерном оружии или взрывном устройстве³. Исторически этот предел был установлен для обогащения, несколько меньшего 20%, но адекватность этой цели преобразования исследовательских реакторов не является очевидной. Подробные, но все еще идеализированные сценарии для эксплуатации типового исследовательского реактора для испытания материалов мощностью 30 МВт были поэтому определены и оценены ниже⁴. До перехода к этому анализу будут вкратце обсуждены определения низкообогащенного и высокообогащенного урана, а также некоторые характеристики урана, относящиеся к оружию.

СРАВНЕНИЕ НИЗКООБОГАЩЕННОГО И ВЫСОКООБОГАЩЕННОГО УРАНА

В природе в заметных количествах встречаются два основных изотопа урана. Это уран-238 и уран-235 с изотопным содержанием 99,29% и 0,71% соответственно⁵. Обогащение, т.е. весовая доля U-235, определяет основные характеристики любого уранового состава в отношении его применения либо в качестве реакторного топлива, либо расщепляющегося материала в ядерном оружии. Конструкторы оружия заявляют, что ниже определенного уровня обогащения конструкция ядерного оружия или взрывного устройства становится непрактичной. По этой причине были введены понятия низкообогащенного (НОУ) и высокообогащенного урана (ВОУ).

Концепция НОУ была впервые использована некоторыми национальными лабораториями США и Комиссией по атомной энергии США в 1955 г., или несколько ранее⁶. Аналогичная

³ Целевое производство плутония в реакторах для испытания материалов, например, в природном уране, размещенном в специальных топливных элементах-мишенях, не является предметом настоящего анализа. Этот вопрос вкратце обсуждается для справочных целей в приложении к данной статье.

⁴ Сегодня реакторы для испытания материалов представляют наиболее важный класс исследовательских реакторов, и в них применяется обогащенный уран в характерных топливных элементах пластинчатого типа. Первый реактор для испытания материалов был совместно сконструирован и построен Ок-Риджской и Аргоннской национальными лабораториями (ORNL и ANL), и он работал в течение 1952-70 г.г. на площадке бывшей национальной инженерной лаборатории Айдахо (INEL).

⁵ Все другие изотопы урана распадаются, потому что их периоды полураспада не превышают 10^8 лет. Однако, в природном уране в части цепочки распада U-238 присутствуют следовые количества U-234 (0.0055%), в то время как U-236 искусственно создается во время облучения уранового топлива в ядерных реакторах. В последующем обсуждении следовые составляющие U-234 и U-236 игнорируются. Аналогично, урановые составы, содержащие значительную долю U-233, который возникает при облучении тория-232, не рассматриваются в этой статье.

⁶ На первой конференции «Атомы для мира», проводившейся в Женеве в 1955 г., Элвин Вейнберг сообщил, что он «только что получил из своей страны информацию о том, что образцы топливных элементов из алюминия и UO_2 с обогащением 20 процентов типа, который может быть доступен для иностранных государств, теперь были испытаны на реакторах LITR и MTR» (Session 9A, Vol. II, August 12, 1955, p. 430). Хотя Вейнберг явно не использовал термин НОУ ни в своей статье, ни в дискуссии, его заявления позволяют предположить, что политика различения НОУ и ВОУ уже применялась. В исследовательских реакторах на территории США топливо с ВОУ уже применялось. Экспорт ВОУ был раз-

концепция была позже принята Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ), которое определило низкообогащенный уран как «обогащенный уран, содержащий менее, чем 20% изотопа ^{235}U »⁷. Аналогично, МАГАТЭ классифицирует НОУ как так называемый материал непрямого использования, который, в свою очередь, определяется как ядерный материал, который не может быть использован для «производства ядерных взрывных устройств без трансмутации или дальнейшего обогащения»⁸.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБОГАЩЕННОГО УРАНА, ОТНОСЯЩИЕСЯ К ЕГО ПРИМЕНИМОСТИ ДЛЯ ОРУЖИЯ

В последующем обсуждении затрагиваются некоторые важные характеристики обогащенного урана, которые имеют отношение к контексту его применимости для оружия. Обсуждаются два основных аспекта: критическая масса и скорость испускания нейтронов для урана заданного состава. Эти соображения демонстрируют фундаментальное различие между высокообогащенным и низкообогащенным ураном.

Критическая масса

Критическая масса ядерного материала является одним из важным свойств материала в отношении его применимости для оружия. По определению, критическая масса – это количество материала в определенной концентрации, которое требуется для поддержания самоподдерживающейся нейтронной цепной реакции. В целом, критическая масса представляет обоснованную оценку количества материала, требующегося для создания ядерного оружия, или взрывного устройства с использованием материала заданного состава.

На рис. 1 показана критическая масса урановой сферы с бериллиевым отражателем в зависимости от обогащения ураном-235. Толщина рефлектора, равная 15 см, приводит к значительному уменьшению абсолютных значений по сравнению с соответствующими критическими массами без рефлектора. Более подробный набор данных приведен в табл. 1, где перечислены значения критических масс для различных уровней обогащения и толщин рефлектора. Для справочных целей приведены также данные для типичных составов плутония.

Критическая масса урана резко увеличивается с уменьшением обогащения, что имеет отношение к применимости урана в оружии по многим причинам. Наиболее важно то, что малая критическая масса упрощает сборку конечной сверхкритической конфигурации, процесса, который требует быстрого ускорения первоначально подкритических компонент⁹. Изотопный состав и соответствующая критическая масса одновременно влияют на другие свойства, которые имеют отношение к применимости материала для оружия. Один из таких аспектов, полная скорость образования нейтронов, обсуждается ниже.

Скорость испускания нейтронов

Скорость испускания нейтронов в уране и плутонии в основном вызывается событиями спонтанного деления¹⁰. Имеется по крайней мере два основных метода сборки ядерного

решен в США только в 1958 г.

⁷ International Atomic Energy Agency. Safeguards Glossary. 2001 Edition. International Nuclear Verification Series, No. 3. Vienna, 2002, §4.12.

⁸ См. сноску 7, IAEA, §4.25 and §4.26.

⁹ Самоочевидно, что малая критическая масса также сокращает количество материала, который должен быть изготовлен, перенаправлен, или приобретен другим способом. Она также облегчает транспортировку и скрытие материала, и т.п.

¹⁰ В дополнение к спонтанному делению, вторичным источником нейтронов являются реакции (α, n) . В этом случае α -частицы, излучаемые изотопами урана или плутония, могут взаимодействовать с примесями бериллия или водорода в ядерном материале. Из-за больших времен полураспада всех имеющих отношение к делу изотопов урана, в текущем контексте можно пренебречь реакциями (α, n) . Их следует принимать во внимание, однако, для оценок общей скорости образования нейтронов в плутонии. Уран, извлеченный из отработавшего топлива, может содержать следовые количества определенных трансурановых изотопов с большой скоростью спонтанного деления. Обсуждение см. в сноске 20.

оружия (пушечный метод и имплозия), и оба они требуют характеристического времени сборки для достижения окончательной сверхкритической конфигурации оружия. Эти времена сборки по порядку величины равны 1 мс для пушечного метода и 1 мкс для имплозии¹¹. Событие спонтанного деления по время процесса сборки может привести к преждевременной инициации нейтронной цепной реакции, и, в конце концов, привести к так называемому «хлопку» устройства. В табл. 2 перечислены справочные скорости испускания для основных изотопов урана и плутония.

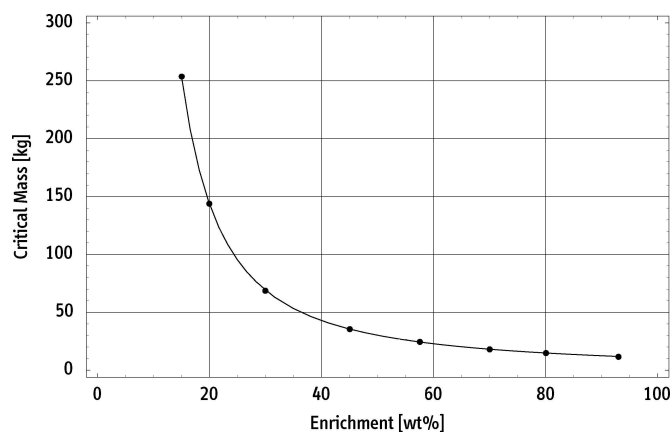


Рис. 1. Критическая масса урановой сферы с бериллиевым отражателем (по вертикальной оси) в зависимости от обогащения ураном-235 (по горизонтальной оси). Расчеты проводились по программе MCNP 4C при температуре 300 К с использованием библиотек сечений ENDF/B-VI. Толщина рефлектора равнялась 5 см. Предполагаемое значение плотности урана составляло 19 г/см³. Обогащение задавалось в весовых процентах для простой бинарной смеси U-235 и U-238.

Во время разработки первых образцов ядерного оружия в Манхэттенском проекте стало ясно, что плутоний не может быть использован в простом пушечном методе, в котором подкритический снаряд из расщепляющегося материала выстреливается в мишень из аналогичного материала. Из-за присущей ему очень низкой скорости спонтанного деления, только высокообогащенный уран является очевидным кандидатом для этого метода сборки. Как можно видеть из табл. 2, даже чистый Pu-239 требует скорости сборки, которая на три порядка величины превышает скорость сборки, которая требуется для U-235. Времена сборки, близкие к 1 мкс, могут быть достигнуты только с использованием специальных взрывчатых веществ в конструкции имплозивного типа, в которой сфера или сферическая оболочка из материала сжимается к центру симметричным взрывом до плотности, превышающей нормальную плотность металла.

Для пониженного уровня обогащения урана скорость испускания нейтронов возрастает из-за более высокого абсолютного содержания урана-238. В то же самое время общее излучение нейтронов повышается вместе с увеличивающейся длительностью сборки, что, вероятно, является результатом большего количества ядерного материала в устройстве¹². В конечном счете, простая сборка уранового устройства пушечного типа может оказаться трудной, или даже невозможной, в предположении того, что распространитель не будет очень

¹¹ Моделирование на программе MCNP сильно упрощенной модели оружия пушечного типа, концептуально подобного бомбе для Хиросимы (цилиндрическая геометрия снаряда и мишени) предсказывает, что расстояние, которое должен пройти снаряд для того, чтобы конфигурация стала сверхкритической, превышает 20 см. Это соответствует примерно 0,7 мс в предположении скорости сборки 300 м/с. В соответствующем обсуждении в «Букваре Лос-Аламоса» упоминается выходная скорость до 1000 м/с, но это требует веса пушки, который может считаться нереалистично большим. См. Robert Serber: The Los Alamos Primer. University of California Press, Berkeley, 1992, Section 20.

¹² Для сферической конфигурации расстояние, которое должен пройти снаряд для того, чтобы конфигурация стала сверхкритической, приблизительно возрастает как $M^{1/3}$. Используя значения для критической массы для ВΟΥ и НОУ из рис.1, можно показать, что это будет соответствовать увеличению времени сборки в 2,3 раза.

опытен в конструировании ядерного оружия¹³.

Табл. 1. Критические массы урана при различных уровнях обогащения и толщинах бериллиевого рефлектора из расчетов по программе MCNP 4C при температуре 300 К с использованием библиотек сечений ENDF/B-VI. Предполагалось, что урановые составы представляют собой бинарные смеси U-235 и U-238. Значения для плутония реакторного, топливного, и оружейного качества включены для справочных целей¹⁴. Плотности урана и плутония считались равными 19,0 г/см³. Отметим, что может потребоваться стабилизировать плутоний в δ -фазе, которая характеризуется меньшей плотностью металла.

Обогащение урана (в весовых процентах)	Толщина отражателя			
	0 см	5 см	10 см	15 см
10%	Очень большая	Очень большая	1435,0 кг (Ø 52,4 см)	753,0 кг (Ø 42,3 см)
15%	1351,0 кг (Ø 51,4 см)	758,3 кг (Ø 42,4 см)	426,5 кг (Ø 35,0 см)	253,8 кг (Ø 29,4 см)
19,75%	782,2 кг (Ø 42,8 см)	402,9 кг (Ø 34,3 см)	220,7 кг (Ø 28,1 см)	143,8 кг (Ø 24,4 см)
30%	367,4 кг (Ø 33,3 см)	171,2 кг (Ø 25,8 см)	100,3 кг (Ø 21,6 см)	68,7 кг (Ø 19,0 см)
45%	184,7 кг (Ø 26,5 см)	80,5 кг (Ø 20,1 см)	49,6 кг (Ø 17,1 см)	35,6 кг (Ø 15,3 см)
70%	87,2 кг (Ø 20,6 см)	36,5 кг (Ø 15,4 см)	23,7 кг (Ø 13,4 см)	18,2 кг (Ø 12,2 см)
93%	53,3 кг (Ø 17,5 см)	22,3 кг (Ø 13,1 см)	14,9 кг (Ø 11,4 см)	11,7 кг (Ø 10,6 см)
Плутоний реакторного качества	14,6 кг (Ø 11,4 см)	6,92 кг (Ø 8,86 см)	5,29 кг (Ø 8,10 см)	4,58 кг (Ø 7,72 см)
Плутоний топливного качества	13,2 кг (Ø 11,0 см)	6,24 кг (Ø 8,56 см)	4,76 кг (Ø 7,82 см)	4,10 кг (Ø 7,44 см)
Плутоний оружейного качества	11,5 кг (Ø 10,5 см)	5,53 кг (Ø 8,22 см)	4,26 кг (Ø 7,54 см)	3,71 кг (Ø 7,20 см)

Вероятность того, что в течение заданного интервала времени Δt в результате стохастического процесса, характеризующегося постоянной распада λ , произойдут k событий, определяется распределением Пуассона. В данном контексте интересно только $k = 0$, т.е. вероятность того, что в течение интервала времени Δt не произойдет события спонтанного деления:

$$P(\lambda, k, \Delta t) = \left[\frac{(\lambda \Delta t)^k}{k!} \exp(-\lambda \Delta t) \right] \quad (1)$$

$$P(\lambda, 0, \Delta t) = \exp(-\lambda \Delta t)$$

Постоянная распада λ задается удельной скоростью спонтанного деления, приведенной в табл. 2, умноженной на соответствующую массу материала. Количество урана, требующееся для простого устройства пушечного типа, по порядку величины равно одной критической

¹³ Предположение о том, что распространитель является относительно неопытным, является вероятным, поскольку, в противном случае, конструкция устройства импловзивного типа очевидно была бы предпочтительным вариантом.

¹⁴ Использовались следующие изотопные составы: 1.8% Pu-238, 59.0% Pu-239, 23.0% Pu-240, 12.2% Pu-241, и 4.0% Pu-242 для плутония реакторного качества; 1.2% Pu-238, 70.9% Pu-239, 15.4% Pu-240, 10.6% Pu-241, и 1.9% Pu-242 для плутония топливного качества; 0.05% Pu-238, 93.6% Pu-239, 6.0% Pu-240, 0.3% Pu-241, и 0.05% Pu-242 для плутония оружейного качества.

массе без рефлектора; соответствующие значения берутся из табл. 1. В этих предположениях рис. 2 показывает зависимость вероятности того, что в течение 1 мс не произойдет ни одного события спонтанного деления, в зависимости от степени обогащения урана. Этот рисунок ясно показывает, что вероятность для миллисекунды без спонтанного деления очень высока для урана оружейного качества (около 97,5%), и что эта вероятность становится исключительно малой при использовании низкообогащенного урана (около 1,4%), даже если предположить, что при использовании НОУ в устройстве длительность сборки не увеличивается.

Табл. 2. Свойства наиболее важных изотопов урана и плутония¹⁵. Тепловыделение включает вклады от α , β , и γ -распадов.

Нуклид	Период полураспада	Удельная активность	Тепловыделение	Скорость спонтанного деления
U-234	$2,46 \cdot 10^5$ лет	$2,30 \cdot 10^8$ Бк/г	$1,79 \cdot 10^{-4}$ Вт/г	$3,98 \cdot 10^{-3}$ 1/(г·с)
U-235	$7,04 \cdot 10^8$ лет	$8,00 \cdot 10^4$ Бк/г	$5,99 \cdot 10^{-8}$ Вт/г	$5,60 \cdot 10^{-6}$ 1/(г·с)
U-236	$2,34 \cdot 10^7$ лет	$2,39 \cdot 10^6$ Бк/г	$1,75 \cdot 10^{-6}$ Вт/г	$2,30 \cdot 10^{-3}$ 1/(г·с)
U-238	$4,47 \cdot 10^9$ лет	$1,24 \cdot 10^4$ Бк/г	$8,50 \cdot 10^{-9}$ Вт/г	$6,78 \cdot 10^{-3}$ 1/(г·с)
Pu-238	$8,78 \cdot 10^1$ лет	$6,34 \cdot 10^{11}$ Бк/г	$5,67 \cdot 10^{-1}$ Вт/г	$1,20 \cdot 10^3$ 1/(г·с)
Pu-239	$2,41 \cdot 10^4$ лет	$2,30 \cdot 10^9$ Бк/г	$1,93 \cdot 10^{-3}$ Вт/г	$7,11 \cdot 10^{-3}$ 1/(г·с)
Pu-240	$6,57 \cdot 10^3$ лет	$8,39 \cdot 10^9$ Бк/г	$7,06 \cdot 10^{-3}$ Вт/г	$4,78 \cdot 10^2$ 1/(г·с)
Pu-241	$1,44 \cdot 10^1$ лет	$3,82 \cdot 10^{12}$ Бк/г	$3,28 \cdot 10^0$ Вт/г	$9,18 \cdot 10^{-4}$ 1/(г·с)
Pu-242	$3,74 \cdot 10^5$ лет	$1,46 \cdot 10^8$ Бк/г	$1,17 \cdot 10^{-4}$ Вт/г	$8,04 \cdot 10^2$ 1/(г·с)

Отметим также, что характеристики урана, извлеченного из облученного топлива с ВОУ, будут очень близки к свежему урану оружейного качества, если сильные излучатели нейтронов, а именно некоторые изотопы плутония и кюрия, будут успешно извлечены во время переработки¹⁶. Для топлива с ВОУ при 40% выгорании, характеризующегося остаточным обогащением в 81%, общая вероятность отсутствия событий спонтанного деления за 1 мс, все еще будет равна 94%¹⁷. Вследствие этого, и с учетом того, что, как сообщают, уран, использованный в бомбе для Хиросимы, в среднем был обогащен на 80%, облученное топливо с ВОУ, очевидно, будет пригодным для простого устройства пушечного типа.

До сих пор обсуждались только статические, или начальные свойства материала и конфигурации. Дополнительные характеристики расщепляющегося материала определяют динамику взрывного процесса. Например, для заданного материала и конфигурации может быть определена характеристическая постоянная времени $\alpha(t)$, которая определяет эволюцию нейтронной популяции расщепляющегося материала $n(t)$ и, следовательно, временной масштаб цепной реакции деления.

$$n(t) = n_0 \exp(\alpha(t)t) \quad \text{с} \quad \alpha(t) = \frac{k_{\text{eff}}(t) - 1}{\tau_{\text{rem}}(t)} \quad (2)$$

Здесь k_{eff} – эффективный коэффициент размножения устройства, и τ_{rem} – время удаления нейтронов в результате поглощения и утечки. Популяция нейтронов растет экспоненциально, только если $\alpha > 0$. Аппроксимация временной зависимости α , после того, как начался взрыв, лежит далеко за рамками этой статьи. Однако, даже простой взгляд на начальное $\alpha = \alpha_0$, выявляет дальнейшие существенные различия в свойствах состава обогащенного урана (см. рис. 3). И снова уменьшающаяся величина α при уменьшении обогащения ухудшает применимость материала для оружия. Цепная реакция протекает более медленно, что в

¹⁵ Данные взяты из J. Magill: Nuclides.net - An Integrated Environment for Computations on Radionuclides and their Radiation. Springer-Verlag, Berlin, 2003.

¹⁶ См. сноску 21.

¹⁷ Изотопный состав облученного урана был определен в расчетах выгорания в ячейке, которые обсуждаются ниже: 81.0% U-235, 9.3% U-236, и 9.7% U-238. Критическая масса для этого состава без отражателя равна 65 кг (по сравнению с 53 кг для урана оружейного качества).

конце концов сокращает общее количество поколений нейтронов, завершившихся перед тем, как расширяющееся устройство станет подкритическим. Начальное значение везде используется как ключевая переменная для оценки энергетического выхода ядерного устройства¹⁸.

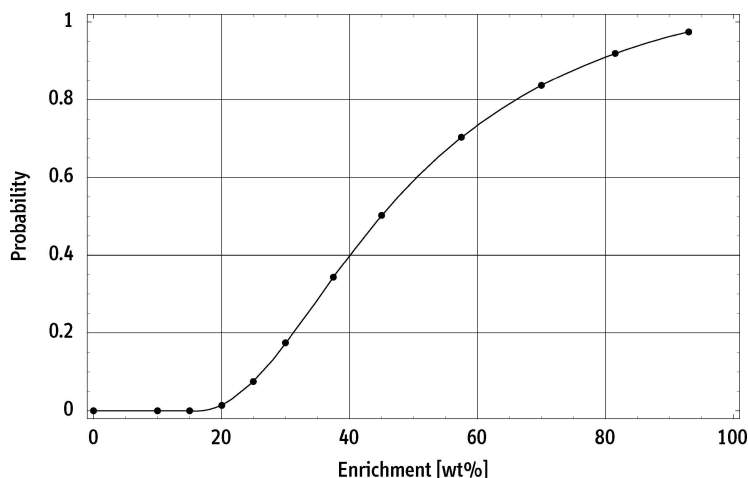


Рис. 2. Вероятность того, что за одну миллисекунду не произойдет события спонтанного деления в одной критической массе урана без отражателя (по вертикали) при заданной степени обогащения (по горизонтали). Численные значения равны 1,4% (НОУ при 19,75%), 50,2% (ВОУ при 45%), и 97,5% (уран оружейного качества при 93%).

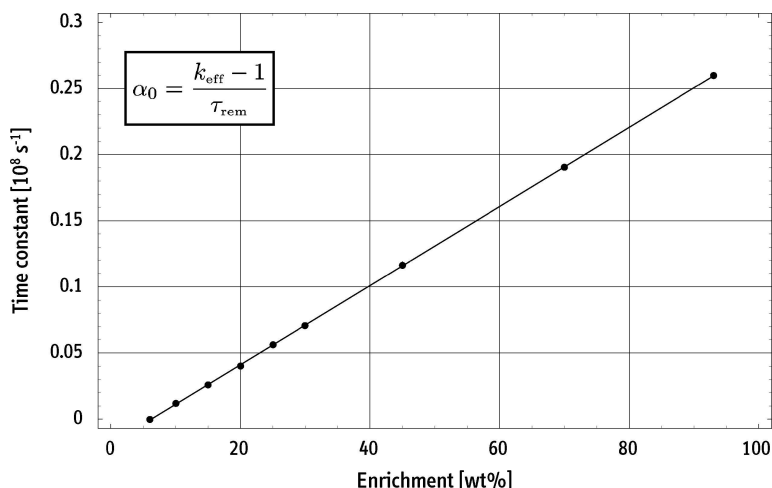


Рис. 3. Характеристическая постоянная α для сверхкритической конфигурации урана из двух критических масс без отражателя при стандартной плотности $19,0 \text{ г/см}^3$. Для уровней обогащения в 6% и менее критической массы урана без отражателя не существует. Данные получены в расчетах по программе MCNP 4C при температуре 300 K.

Предыдущее обсуждение показало, что имеются важные качественные различия между ВОУ и НОУ, помимо критической массы. Скорость испускания нейтронов в особенности существенна, если касаться реализуемости грубого ядерного оружия, или взрывных устройств, основанных на конструкции пушечного типа, или даже так называемых импровизированных ядерных устройств. НОУ очевидно не подходит для таких сценариев, как можно непосредственно увидеть из скоростей испускания нейтронов вместе с медленным процессом сборки. Очень высокие уровни обогащения очевидно предпочтительны, и разумно предположить, что распространитель с доступом к современной ядерной инфраструктуре предпримет все усилия, чтобы обогатить доступные запасы урана до оружейного качества, т.е. до 90% и выше.

¹⁸ См. Serber, (сноска 12), или J. Carson Mark, "Explosive Properties of Reactor-Grade Plutonium," Science & Global Security, 4 (1993): 111-128.

В последующем анализе, урановые составы с различным уровнем обогащения сравниваются друг с другом для того, чтобы получить количественную оценку общего потенциала распространения для топлива различных исследовательских реакторов. Для этой цели введены факторы η для учета уменьшения «качества» урана с уменьшенным уровнем обогащения. Два простых кандидата в такие факторы вытекают из предыдущего обсуждения: вероятность отсутствия нейтронов за миллисекунду, которая имеет отношение к реализуемости устройств пушечного типа, и временная постоянная α_0 , для более общей оценки пригодности материала для оружия, приемлемая для конструкций как пушечного типа, так и имплозивного типа (см. соответственно рис. 2 и 3).

ЭФФЕКТИВНАЯ СТРАТЕГИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ ЯДЕРНОГО МАТЕРИАЛА

Для того, чтобы получить представительные и обоснованно точные для составов отработавшего топлива, требуемых для обсуждаемой ниже оценки распространения, были проведены обширные расчеты выгорания в ячейке для типичной геометрии реактора для испытаний материалов и различных начальных уровней обогащения. Результаты приведены к установке, работающей на тепловой мощности 30 МВт; они были получены с помощью вычислительной системы, специально разработанной для анализа исследовательских реакторов. Эта система первоначально базировалась на существующих нейтронно-физических программах MCNP 4C и ORIGEN 2.2¹⁹. В табл. 3 сведены основные предположения и исходные данные, использующиеся в расчетах, в предположении бесконечной решетки топливных пластин реакторов для испытаний материалов.

Табл. 3. Исходные данные и предположения для расчета выгорания в ячейке.

Толщина сердцевины	0,60 мм
Толщина оболочки	0,38 мм
Канал для охлаждения	2,20 мм
Фиксированная плотность урана-235	0,948 г/см ³
Средняя плотность мощности в активной зоне	125 кВт/л
Тепловая мощность реактора	30 МВт

Был исследован набор различных обогащений топлива в диапазоне от 93% до 5%. Ниже этого предела работа в типичной геометрии реактора для испытаний материалов нереалистична. Концентрация урана-235 поддерживается постоянной для всех уровней обогащения за счет соответствующего увеличения общего количества урана в матрице топлива. При фиксированной плотности урана-235 различные топлива могут считаться эквивалентными, хотя, на практике, можно несколько увеличить эффективную плотность урана-235 для фиксированной геометрии активной зоны для поддержания аналогичных эксплуатационных характеристик, или длительности цикла реактора. Выбранное значение в 0,948 г U-235 на см³ соответствует современному стандарту 4,8 г U на см³ при обогащении в 19,75%. Для топлива с БОУ общая плотность будет близка к 1,0 г/см³, что представляет типичную плотность топлива, использовавшегося до конца 1970-х гг., когда началась разработка топлив высокой плотности с НОУ.

Расчеты выгорания дают зависящие от времени концентрации нескольких сотен изотопов, образующихся в топливе. В качестве примера этих результатов на рис. 4 показано накопление плутония для выбранных уровней обогащения. В табл. 4 показана сводка наиболее важных численных результатов, приведенных к реактору с мощностью 30 МВт, и полученных в этих вычислениях для выгорания мишеней из U-235 в 20%, 40%, и 60%²⁰.

¹⁹ A. Glaser: Neutronics Calculations Relevant to the Conversion of Research Reactors to Low-Enriched Fuel. Ph.D. Thesis, Department of Physics, Darmstadt University of Technology, 2005. Подробности об основных программах для нейтронной физики см. в J. F. Briesmeister (ed.): MCNP — A General Monte Carlo N-Particle Transport Code. Version 4C. LA-13709-M, Los Alamos National Laboratory, December 2000; A. G. Croff: A User's Manual for the ORIGEN2 Computer Code. ORNL/TM7175, Oak Ridge National Laboratory, July 1980; and S. Ludwig: "Revision to ORIGEN2—Version 2.2." Transmittal Memo, May 23, 2002.

²⁰ Выгорание U-235 соответствует полному долевого потреблению U-235, включая деление, захват, и другие процессы. Отметим, что длительность облучения не является прямо пропорциональной выго-

Основной трудностью при оценке потенциала распространения или «стратегической ценности» запасов расщепляющихся материалов, связанных с работой реактора, является соотношение и сравнение запасов урана и плутония в топливе. Уран может быть отделен от свежего топлива и, возможно, дополнительно обогащен. Кроме того, как уран, так и плутоний, может быть извлечен из облученного топлива. Реализуемость таких подходов зависит от умения распространителя и от доступности необходимой ядерной инфраструктуры. Поэтому последующий анализ является сильно упрощенным при принятии неизбежных специальных предположений в этом отношении.

Предлагаются несколько вариантов оценки. Они основаны на фундаментальном предположении о том, что для эксплуатации типового реактора требуется годовая поставка свежего (необлученного) топлива, и доступно годовое количество отработавшего топлива с выгоранием 40% U-235. Однако, делаются различные предположения в отношении окончательного использования материала в ядерном устройстве в зависимости от ядерных возможностей распространителя.

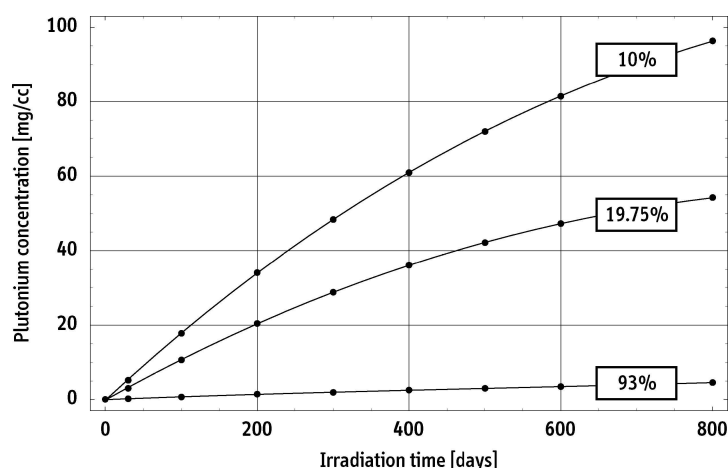


Рис. 4. Удельное производство плутония в типе топлива для реакторов для испытания материалов для различных степеней обогащения (концентрация плутония в мг/см³, по вертикали) в зависимости от длительности облучения (в сутках, по горизонтали). Корреляция длительности облучения и выгорания урана-235 показана в табл. 4. Результаты основаны на расчетах выгорания в ячейке.

Базовые ядерные возможности

Для первого сценария предполагается, что предпринимаются усилия для изготовления грубого ядерного устройства, основанного на пушечном методе. Для такого устройства пригоден только уран, и если уран извлекается из отработавшего топлива, то соответствующие запасы плутония не будут применяться для дальнейшего использования²¹. Справочным количеством расщепляющегося материала, используемым для этой оценки, является одна критическая масса урана без отражателя M_b , которая примерно равна количеству, необходи-

рования топлива из-за накопления и последующего деления плутония, эффекта, который в особенности проявляется при малых уровнях обогащения. Вследствие этого, потребление U-235 на тепловой мегаватт-день уменьшается при меньшем обогащении и большем среднем выгорании топлива.

²¹ Если уран, извлеченный из отработавшего топлива, будет использоваться в устройстве пушечного типа, то сильные излучатели нейтронов будут успешно удалены в процессе очистки. Анализ типичных составов отработавшего топлива типа используемого в реакторе для испытаний материалов указывает, что около 99,99% критических изотопов Pu-238, Pu-240, и Cm-244 будет удален из уранового потока. Это, в частности, эквивалентно окончательному отношению плутония к урану в 10^{-6} . В работе M. Benedict, T. H. Pigford, and H. W. Levi, Nuclear Chemical Engineering, Second Edition, McGraw-Hill, New York, 1981, pp. 466-514, в которой обсуждается процесс PUREX, подтверждается, что в этом процессе могут быть достигнуты отношения менее 10^{-8} , если будет введен этап дополнительной очистки (р. 487). Непонятно, сможет ли распространитель с низким техническим уровнем достичь такой степени очистки. Если этого не произойдет, то кандидатом в материал для грубого ядерного устройства может стать только свежее топливо.

мому для устройства пушечного типа. Как указывалось ранее, уменьшающаяся применимость материала с сокращенным содержанием U-235 учитывается посредством применения весового фактора η для материала. Для этой цели используется относительная вероятность отсутствия событий спонтанного деления за миллисекунду $\eta_1 = P/P_{\text{БОВ}}$ (см. рис. 2). Общая стратегическая полезность материала, извлекаемого из топлива, CM_A^* , определяется следующим образом:

$$CM_A^* = \eta_1(\varepsilon_{FF}) \frac{m_{FF}}{M_B(\varepsilon_{FF})} + \eta_1(\varepsilon_{SF}) \frac{m_{SF}}{M_B(\varepsilon_{SF})} \quad (3)$$

Индексы FF и SF при массе m и уровне обогащения ε относятся к урану, содержащемуся в свежем и отработавшем топливе, соответственно. На основании результатов, полученных при расчетах выгорания, сведенных в табл. 4, были рассчитаны значения CM_A^* для выгорания U-235 в мишени в 40% для различных уровней обогащения. Результаты показаны на рис. 5. В табл. 5 перечислены численные значения запасов расщепляющихся материалов, критических масс, и весовых факторов.

При уменьшении уровней обогащения оценка стратегического значения топлива уменьшается по двум причинам: как отношение критических масс m/M_B , так и фактор применимости одновременно падают до низких значений по сравнению со случаем урана оружейного качества. Для типового реактора материал, извлеченный из свежего и облученного топлива, достигает CM_A^* , равного 0,86, если в установку загружается топливо с ураном оружейного качества. Абсолютная масса загружаемого урана в этом случае близка к величине, необходимой для создания грубого устройства пушечного типа. Около одной трети общей величины связано с ураном, содержащимся в облученном топливе. При 45% обогащении CM_A^* уменьшается до 0,21, и фактически достигает нуля при уровнях обогащения в 20%, или менее. Как и ожидалось, поскольку плутоний, содержащийся в отработавшем топливе, выключается из сценария, наименьшие уровни обогащения минимизируют потенциал распространения топлива.

Расширенные ядерные возможности

Фундаментальное предположение сценария с расширенными ядерными возможностями состоит в том, извлекаются и используются для оружейных целей и уран, и плутоний. Поэтому эта стратегия требует успешной реализации более сложной конструкции имплозивного типа. Однако, в результате для построения устройства потребуется гораздо меньше материала. Справочными величинами, используемыми в дальнейшем, являются критические массы критические массы урана и плутония, помещенные в толстый (15 см) бериллиевый отражатель. Значения берутся из табл. 1.

Рассматриваются два варианта расширенного сценария (B1 и B2). Так же, как и в сценарии с низким уровнем технологии, в основном сценарии B1 не делается попытки обогащения такого материала до оружейного качества, т.е. до 93%. Аналогично, применимость урана корректируется с использованием весового множителя, но вместо скорости спонтанного деления²² для характеристики применимости материала в оружии применяется временная постоянная α_0 . Весовой множитель определяется как $\eta_2 = \alpha/\alpha_{\text{БОВ}}$.

В то время как критическая масса урана с отражателем (M_R) сильно зависит от обогащения урана, значения критической массы плутония практически одинаковы (4,0 кг) для всех составов, встречающихся в топливе исследовательского реактора с указанным выгоранием (см. табл. 6). Общая стратегическая ценность расщепляющегося материала для оценки B1 задается уравнением:

$$CM_{B1}^* = \eta_2(\varepsilon_{FF}) \frac{m_{FF}}{M_R(\varepsilon_{FF})} + \eta_2(\varepsilon_{SF}) \frac{m_{SF}}{M_R(\varepsilon_{SF})} + \frac{m_{Pu}}{4,0 \text{ кг}} \quad (4)$$

²² Скорость спонтанного деления не является значимой величиной для оценки применимости урана в оружии, если в нем используется быстрый имплозивный метод, который был сначала предложен для преодоления проблемы преждевременной инициации. В целом, скорости исключительно малы по сравнению с типичными значениями для плутониевых составов.

Табл. 4. Ядерный материал, включенный в эксплуатацию типового реактора для испытаний материалов с мощностью 30 МВт, работающего 300 дней в году (плотность мощности в активной зоне и эффективная плотность урана-235 в топливе во всех случаях поддерживаются постоянными: 125 кВт/л и 0,948 г/см³; все результаты основаны на расчетах выгорания бесконечной решетки топливных пластин типа используемых в реакторах для испытания материалов).

Обогащение	5%			10%		
Эффективная плотность урана	18,96 г/см ³			9,48 г/см ³		
Выгорание мишени из U-235	20%	40%	60%	20%	40%	60%
Общая длительность нахождения топлива в активной зоне	227,1 суток	496,5 суток	Не примени- мо	214,6 суток	451,8 суток	720,4 суток
Годовая потребность в уране	1013,3 кг	463,4 кг		536,0 кг	254,6 кг	159,7 кг
Потребление U-235 на МВт (тепл.)/день	1,13 г	1,03 г		1,19 г	1,13 г	1,07 г
Среднее обогащение отработавшего топлива	4,1%	3,1%		8,2%	6,3%	4,3%
Общее годовое производство Pu	3,46 кг	3,02 кг		2,05 кг	1,80 кг	1,53 кг
Среднее содержание Pu-239	89,8%	79,5%		89,8%	79,2%	68,5%
Обогащение	19,75%			30%		
Эффективная плотность урана	4,80 г/см ³			3,16 г/см ³		
Выгорание мишени из U-235	20%	40%	60%	20%	40%	60%
Общая длительность нахождения топлива в активной зоне	208,3 суток	429,5 суток	668,1 суток	205,9 суток	421,0 суток	648,8 суток
Годовая потребность в уране	279,7 кг	135,6 кг	87,2 кг	186,2 кг	91,1 кг	59,1 кг
Потребление U-235 на МВт (тепл.)/день	1,23 г	1,19 г	1,15 г	1,24 г	1,21 г	1,18 г
Среднее обогащение отработавшего топлива	16,4%	12,8%	9,0%	25,4%	20,3%	14,5%
Общее годовое производство Pu	1,23 кг	1,07 кг	0,91 кг	0,88 кг	0,77 кг	0,65 кг
Среднее содержание Pu-239	89,7%	78,9%	67,8%	89,6%	78,7%	67,3%
Обогащение	45%			93%		
Эффективная плотность урана	2,11 г/см ³			1,02 г/см ³		
Выгорание мишени из U-235	20%	40%	60%	20%	40%	60%
Общая длительность нахождения топлива в активной зоне	204,2 суток	415,0 суток	634,2 суток	201,4 суток	404,7 суток	610,5 суток
Годовая потребность в уране	125,2 кг	61,6 кг	40,3 кг	61,4 кг	30,6 кг	20,3 кг
Потребление U-235 на МВт (тепл.)/день	1,25 г	1,23 г	1,21 г	1,27 г	1,26 г	1,26 г
Среднее обогащение отработавшего топлива	39,1%	32,2%	23,8%	87,9%	81,2%	70,1%
Общее годовое производство Pu	0,60 кг	0,52 кг	0,44 кг	0,09 кг	0,08 кг	0,07 кг
Среднее содержание Pu-239	89,6%	78,4%	66,5%	88,5%	83,5%	56,7%

Результаты оценки В1 иллюстрируются рис. 6 и суммируются в табл. 6. По сравнению со сценарием с низким уровнем технологии, в котором предполагалось изготовление оружия пушечного типа, абсолютная стратегическая ценность в этом случае намного выше, и достигает для урана оружейного качества величины $СМ_{В1}^* = 3,90$.

Значения $СМ_{В1}^*$ быстро уменьшаются для урана с качеством ниже оружейного, но одновременно производство плутония становится более важным. В результате минимальное значение $СМ_{В1}^*$ наблюдается сейчас для уровня обогащения в 15-20%, ниже которого в потенциале распространения топлива начинает доминировать плутоний²³. Этот результат, конечно, согласуется с международными усилиями по конверсии исследовательских реакторов на НОУ с обогащением чуть меньше 20%. По сравнению с ураном оружейного качества эффективный потенциал распространения топлива сокращается для НОУ с обогащением 19,75% почти на 90%.

Вторичный сценарий улучшенной технологии В2 основан на предположении, что ограниченное количество разделительной работы, скажем, на лабораторной или полупромышленной установке, доступно для переработки перенаправленного топлива.

²³ Примечательно, что вклад урана представляет собой основное опасение по распространению для уровней обогащения, столь низких, как 30%, даже если его полезность сильно подавляется весовым фактором, используемым в настоящем анализе.

Целью может быть производство максимального количества урана оружейного качества, т.е. ВОУ с обогащением 93%, с использованием запасов предварительно обогащенного урана, извлеченного из свежего топлива и потенциально также из отработавшего топлива. В последующем анализе рассматриваются значения производительности от 10 до 640 единиц разделительной работы (ЕРР). Эти значения весьма малы по сравнению с производительностью коммерческих обогатительных заводов.

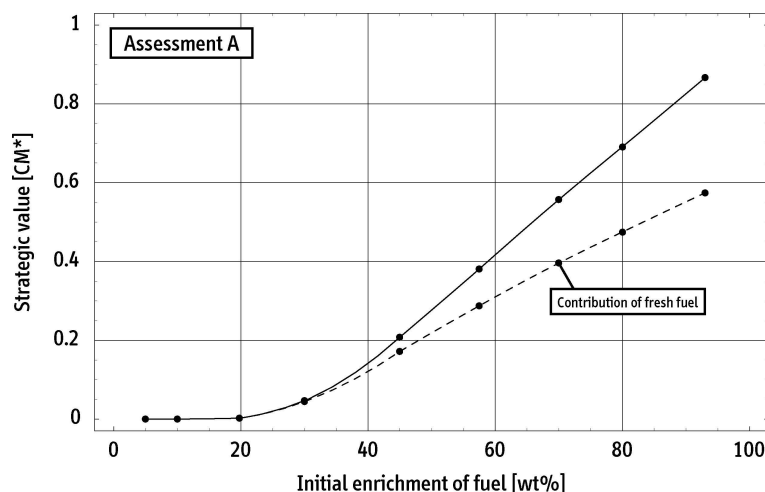


Рис. 5. Базовые ядерные возможности (оценка А). Стратегическая ценность расщепляющихся материалов (по вертикали), связанных с эксплуатацией исследовательского реактора, в предположении того, что из топлива извлекается и используется только уран, в зависимости от начального обогащения топлива в весовых процентах (по горизонтали). Предполагаемой целью является создание грубого устройства пушечного типа. Запасы плутония в отработавшем топливе извлекаются из дальнейшего использования. Штриховой кривой показан вклад урана из свежего топлива.

Однако, если распространителю будут доступны гораздо большие обогатительные мощности, ему не понадобится изымать ограниченное количество топлива исследовательского реактора (предположительно находящегося под гарантиями). Вместо этого для непосредственного производства ВОУ могут быть использованы необъявленные запасы природного урана. Если предположить, например, что для обработки сырьевого материала доступна центрифужная технология, то для проведения работы в 10 ЕРР за месяц может быть использован комплект из 60 машин, в предположении, что каждая центрифуга обладает производительностью около 2 ЕРР/год – типичного значения для машин первого поколения. В случае центрифуг нельзя предположить, что каскад с количеством машин, много меньшим 50 – 60, может использоваться сколь бы то ни было разумным способом²⁴. Поэтому производительность 10 ЕРР в месяц представляет обоснованный нижний предел.

Вообще говоря, у распространителя есть выбор для распределения доступных обогатительных мощностей между свежим и отработавшим топливом. Несмотря на то, что мощности обычно более эффективно используются со свежим топливом, может оказаться предпочтительным обрабатывать также и отработавшее топливо. Очевидно, что если свежее топливо уже обладает оружейным качеством, то все обогатительные мощности могут быть использованы для обработки облученного топлива.

²⁴ В упомянутой ранее срочной программе 1991 г. Ирак планировал перенаправить находящееся под гарантиями обогащенное до 80% топливо для исследовательского реактора для дальнейшего обогащения в небольшом каскаде центрифуг (49 машин); эта стратегия была эквивалентна настоящему сценарию. Однако, для столь малого числа устройств разделения, работа каскада обогащения неизбежно будет неоптимальной, и можно будет ожидать существенных потерь смешивания. Эти потери приведут к умеренному увеличению времени, необходимого для обогащения сырья до урана оружейного качества. Описание срочной программы Ирака можно найти в работе D. Albright, F. Berkhout, and W. Walker, *Plutonium and Highly Enriched Uranium 1996. World Inventories, Capabilities, and Policies*. Stockholm International Peace Research Institute (SIPRI), Oxford University Press, 1997, pp. 344-349.

Табл. 5. Базовые ядерные возможности (запасы, изотопный состав, критические массы и весовые множители для свежего топлива и для облученного топлива со степенью выгорания мишени в 40% U-235).

Обогащение топлива	5%	10%	19,75%	30%	45%	70%	93%
<i>Свежее топливо</i>							
Годовые потребности в уране	463,4 кг	254,6 кг	135,6 кг	91,1 кг	61,6 кг	40,2 кг	30,6 кг
Справочная критическая масса (M_B)	нет	1351,0 кг	782,2 кг	367,4 кг	184,7 кг	67,2 кг	53,3 кг
Отношение критических масс	0,00	0,07	0,17	0,25	0,33	0,46	0,57
Фактор применимости η_1	0,00	0,00	0,013	0,18	0,51	0,86	1,00
$CM_{A,FF}^*$	0,00	0,00	0,002	0,05	0,17	0,40	0,57
<i>Облученное топливо при выгорании 40% U-235</i>							
Начальное обогащение топлива	5%	10%	19,75%	30%	45%	70%	93%
Остаточные запасы урана	451,0 кг	243,4 кг	125,1 кг	80,9 кг	51,6 кг	30,5 кг	21,1 кг
U-235	3,1%	6,3%	12,8%	20,3%	32,2%	55,4%	81,0%
U-236	0,4%	0,7%	1,5%	2,3%	3,7%	6,4%	9,3%
U-238	96,5%	93,0%	85,7%	77,4%	64,1%	38,2%	9,7%
Справочная критическая масса (M_B)	нет	огромна	1884,6 кг	743,5 кг	324,8 кг	131,1 кг	67,8 кг
Отношение критических масс	0,00	0,07	0,17	0,109	0,16	0,23	0,31
Фактор применимости η_1	0,00	0,00	0,00	0,019	0,23	0,69	0,94
$CM_{A,SF}^*$	0,00	0,00	0,00	0,002	0,04	0,16	0,29
<i>Комбинированная стратегическая ценность свежего и облученного урана</i>							
$CM_{A,tot}^*$	0,00	0,00	0,002	0,05	0,21	0,56	0,86

Табл. 6. Расширенные ядерные возможности, первичный сценарий (стратегическая ценность доступного урана и плутония, связанного с годовой эксплуатацией реактора; справочная степень выгорания топлива 40% U-235).

Обогащение топлива							
	Свежее топливо						
Годовые потребности в уране	463,4 кг	254,6 кг	135,6 кг	91,1 кг	61,6 кг	40,2 кг	30,6 кг
Справочная критическая масса (M_R)	огромна	753,0 кг	143,8 кг	68,7 кг	35,6 кг	18,2 кг	11,7 кг
Отношение критических масс	0,00	0,338	0,94	1,33	1,74	2,21	2,62
Фактор применимости η_2	0,00	0,043	0,16	0,27	0,45	0,73	1,00
$CM_{B1,FF}^*$	0,00	0,015	0,15	0,36	0,78	1,61	2,62
	Облученное топливо при выгорании 40% U-235						
Остаточная доля U-235	3,1%	6,3%	12,8%	20,3%	32,2%	55,4%	81,0%
Остаточные запасы урана	451,0 кг	243,4 кг	125,1 кг	80,9 кг	51,6 кг	30,5 кг	21,1 кг
Справочная критическая масса (M_R)	нет	огромна	379,4 кг	125,1 кг	61,4 кг	25,9 кг	14,4 кг
Отношение критических масс	0,00	0,00	0,330	0,585	0,84	1,18	1,47
Фактор применимости η_2	0,00	0,00	0,075	0,162	0,30	0,57	0,86
$CM_{B1,SF}^*$	0,00	0,00	0,025	0,095	0,25	0,67	1,26
Запасы плутония	3,02 кг	1,80 кг	1,07 кг	0,77 кг	0,52 кг	0,28 кг	0,08 кг
Pu-238	0,32%	0,42%	0,58%	0,77%	1,06%	1,94%	6,87%
Pu-239	79,49%	79,27%	78,07%	78,74%	78,36%	77,59%	73,59%
Pu-240	12,61%	12,57%	12,55%	12,52%	12,55%	12,34%	11,71%
Pu-241	6,88%	7,01%	7,16%	7,23%	7,29%	7,39%	7,12%
Pu-242	0,70%	0,73%	0,74%	0,74%	0,74%	0,74%	0,71%
Справочная критическая масса (RCM)	(4,0±0,04) кг						
$CM_{B1,Pu}^*$	0,76	0,45	0,27	0,19	0,13	0,07	0,02
	Комбинированная стратегическая ценность свежего и облученного урана						
$CM_{B1,tot}^*$	0,76	0,47	0,445	0,65	1,16	2,35	3,90

Для того, чтобы сделать анализ таким простым, насколько это возможно, ниже рассматриваются только три основных случая: распространитель может направить доступные мощности на свежее топливо, потратить их на облученное топливо, или распределить их поровну между ними. Количество урана оружейного качества, которое может быть произведено с применением уранового сырья, определяется специальными выражениями для многокомпонентного уранового обогащения, которые требуются для правильного учета содержания U-

236 в облученном топливе²⁵:

$$\begin{aligned} SWU &= PV(x_P) + TV(x_T) - FV(x_F) \\ 0 &= PH(x_P) + TH(x_T) - FH(x_F) \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} F &= P + T \\ x_F F &= x_P P + x_T T \\ y_F F &= y_P P + y_T T \end{aligned} \quad (6)$$

с

$$\begin{aligned} V(x_i, y_i) &= (2x_i - 1 + 4y_i) \ln \left[\frac{x_i}{1 - x_i - y_i} \right] \\ H(x_i, y_i) &= y_i^3 \sqrt[3]{\frac{1 - x_i - y_i}{x_i}} \end{aligned} \quad (7)$$

Индексы F , P , и T относятся к сырью, продукту, и отвалам, а x и y обозначают изотопные фракции U-235 и U-236 в соответствующих потоках.

Как это и требуется, эти выражения упрощаются до стандартных уравнений для обогащения урана, если третья компонента (U-236) не присутствует в исходном материале. Начальные запасы топлива F с изотопным содержанием урана-235 и -236 x_P и y_P соответственно обрабатываются при заданной производительности в ЕРР для производства конечного продукта P с $x_P = 0,93$. Неизвестные величины, включая массу продукта P , определяются приведенным выше набором уравнений, который может быть решен численно. После того, как будет известно эквивалентное количество продукта (урана оружейного качества), можно будет присвоить ему общее значение стратегической ценности по формуле:

$$CM_{B2}^i = \frac{m_{WGU,FF} + m_{WGU,SF}}{11,7 \text{ кг}} + \frac{m_{Pu}}{4,0 \text{ кг}} \quad (8)$$

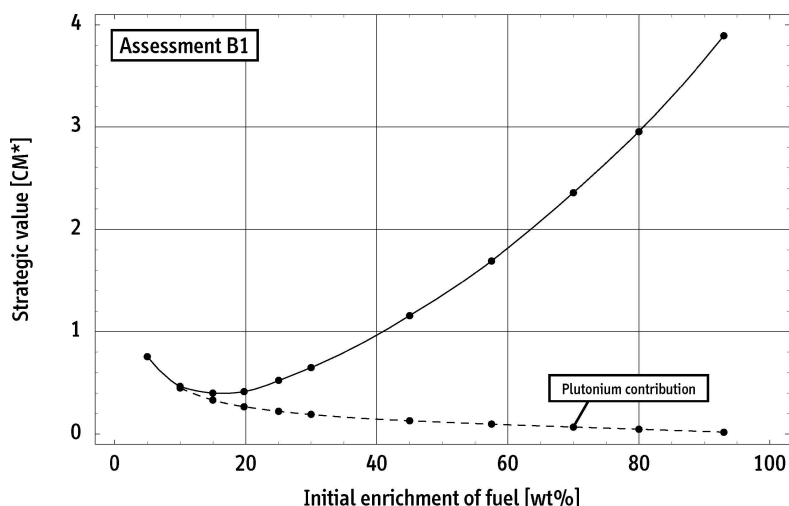


Рис. 6. Расширенные ядерные возможности, первичный сценарий (оценка В1). Стратегическая ценность расщепляющихся материалов, связанных с эксплуатацией исследовательского реактора (по вертикали), в предположении, что уран и плутоний используются в оружии имплозивного типа, в зависимости от начального обогащения топлива в весовых процентах (по горизонтали). Штриховая линия показывает вклад плутония в общую величину.

²⁵ A. de la Garza, G. A. Garrett, and J. E. Murphy, "Multicomponent Isotope Separation in Cascades," Chemical Engineering Science, 15, 1961: 188-209.

Результаты для этого сценария показаны на рис. 7, а численные значения перечислены в табл. 7. Аналогично оценке В1, имеется минимум $СМ^*_{B2}$ при малых мощностях обогащения (10 – 40 ЕРР), Положение этого слабо выраженного минимума близко к начальному уровню обогащения топлива в 20%, но смещается к меньшим значениям при увеличении мощности в ЕРР. Как и ожидалось, при больших значениях ЕРР, из сырьевого материала извлекается практически все количество U-235. Например, 320 ЕРР достаточно для собирания более 90% от максимального $СМ^*_{B2}$ даже при таких низких начальных уровнях обогащения топлива, как 40%. При 640 ЕРР это отношение достигается при всех уровнях обогащения выше 20% (см. рис. 7). В этих случаях различие между НОУ и ВОУ очевидно, более не существенно.

Результаты обеих расширенных оценок (В1 и В2) демонстрируют, что уровень обогащения, близкий к 20%, в самом деле минимизирует стратегическую ценность расщепляющихся материалов, включенных в эксплуатацию типового реактора для испытаний материалов. Для уровней обогащения в 15% и ниже в опасениях по распространению, связанных с топливом исследовательских реакторов, доминирует плутониевая компонента²⁶. Для промежуточного обогащения выше 20% потенциал распространения ядерного материала сильно зависит от типа оценки, т.е. от предположений, сделанных в отношении возможностей и доступной инфраструктуры распространителя. Тем не менее, выше обогащения в 20% абсолютные значения возрастают во всех сценариях. Как и ожидалось, использование урана оружейного качества для топлива исследовательского реактора, очевидно, максимизирует общий потенциал распространения, связанный с эксплуатацией реактора.

ВЫВОДЫ

Количественный анализ, представленный выше, ясно демонстрирует полезность различия между НОУ и ВОУ. Урановое топливо с обогащением менее 20% практически исключает возможность того, что материал может быть непосредственно использован для создания ядерного взрывного устройства. Конкретно, как показывают некоторые простые соображения, НОУ не может быть использован в простом устройстве пушечного типа, как из-за своей большой критической массы, так и соответствующей скорости испускания нейтронов. Одновременно и по совпадению при уровне обогащения в 15-20% производство плутония существенно подавляется, минимизируя общую стратегическую ценность материала при доступности имплозивной технологии. По обеим причинам 20% предел предоставляет обоснованный, и даже оптимальный выбор для цели конверсии исследовательских реакторов.

Поэтому анализ ставит под вопрос тенденцию некоторых недавних проектов исследовательских реакторов, в которых снова рассматривается обогащение топлива выше 20% предела. Больше всего заметен новый немецкий исследовательский реактор FRM-II, начавший работу в 2004 г., в котором в настоящее время используется топливо с 93% обогащением, но к декабрю 2010 г. будет произведен переход на топливо с обогащением не более 50%²⁷. Хотя такое сокращение обогащения и достойно похвалы, текущие планы оператора предполагают обогащение на измененном реакторе, в точности равное 50%²⁸. Аналогично, конструкторы французского реактора Жюль Горовица (JHR), в котором первоначально предполагалось использование низкообогащенного урана, сейчас рассматривают 30-35% обогащение в качестве резервного варианта. Самое последнее развитие позволяет предположить, что этот вариант в конце концов и будет реализован²⁹.

²⁶ Независимо от того факта, что производство плутония существенно возрастает при очень низких уровнях обогащения, такое топливо будет неподходящим кандидатом для современных исследовательских реакторов. Для определенного запаса U-235 очень низкое обогащение топлива потребует большего размера активной зоны, что сократит максимальные потоки нейтронов, доступные для экспериментов.

²⁷ Federal Ministry of Education and Research (BMBF). Vereinbarung iiber FRMII vorgestellt. Press release No. 169/2001, October 25, 2001.

²⁸ Последние исследования показали, что обогащение до 30% может оказаться подходящим для монолитного топлива только с небольшой модификацией активной зоны (см. сноску 19). Если можно будет смягчить некоторые другие дополнительные проектные ограничения, такие, как внешний диаметр топливного элемента, или уровень мощности реактора, то переход на НОУ может быть осуществим без потери эксплуатационных качеств реактора.

²⁹ Nuclear Fuel. "CEA likely to use HEU to start up new test reactor." 29(24) November 22, 2004, p. 1.

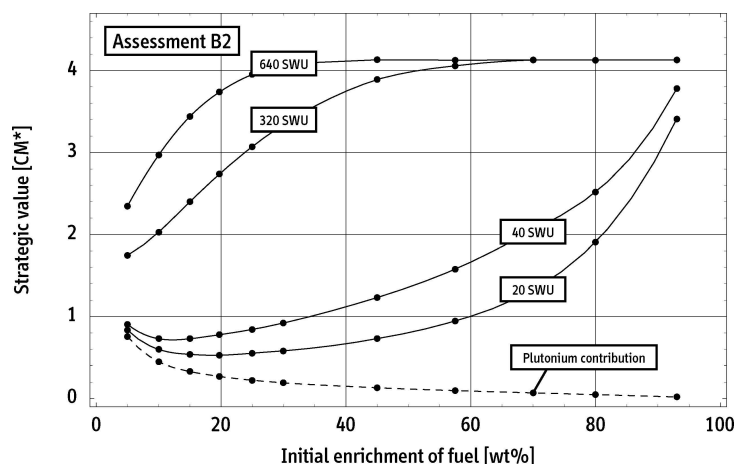


Рис. 7. Расширенные ядерные возможности, вторичный сценарий (оценка В2). Стратегическая ценность (по вертикали) в предположении того, что для производства урана оружейного качества доступно указанное количество разделительной работы (отмечено в прямоугольниках на кривой), в зависимости от начального обогащения топлива в весовых процентах (по горизонтали). Штриховая линия показывает вклад плутония в общую величину.

В целом, после двух десятилетий строгого выполнения проектной задачи с НОУ, появилось возрастающее стремление конструкторов, операторов, и лицензирующих органов интерпретировать задачу конверсии для исследовательских реакторов как нечто отличное от строгого ограничения. На основании представленных выше данных и анализа эта тенденция не может быть оправдана техническими аргументами, поскольку она, очевидно, уменьшает сопротивляемость ядерного топливного цикла распространению.

Табл. 7. Расширенные ядерные возможности, вторичный сценарий (стратегическая ценность доступного урана и плутония, связанных с годовой эксплуатацией реактора в предположении доступности небольших обогатительных мощностей для обработки топлива; справочное выгорание топлива равно 40% U-235).

Обогащение топлива	5%	10%	19,75%	30%	50%	70%	93%
<i>Свежее топливо</i>							
Годовой спрос на уран	463,4 кг	254,6 кг	135,6 кг	91,1 кг	61,6 кг	40,2 кг	30,6 кг
Эквивалент УОК + 10 EPP	0,47 кг	0,86 кг	1,57 кг	2,34 кг	3,69 кг	8,31 кг	
20 EPP	0,92 кг	1,70 кг	3,08 кг	4,56 кг	7,04 кг	14,69 кг	30,6 кг
40 EPP	1,81 кг	3,31 кг	5,92 кг	8,57 кг	12,84 кг	23,27 кг	
80 EPP	3,50 кг	6,29 кг	10,87 кг	15,18 кг	21,20 кг	29,68 кг	
$CM_{B2,FF}^* + 10 \text{ EPP}$	0,04	0,07	0,13	0,20	0,32	0,71	2,62
20 EPP	0,08	0,15	0,26	0,39	0,60	1,26	2,62
40 EPP	0,15	0,28	0,50	0,73	1,10	1,99	2,62
80 EPP	0,30	0,54	0,93	1,30	1,81	2,54	2,62
<i>Облученное топливо с 40%выгоранием урана-235</i>							
Остаточная доля урана-235	3,1%	6,3%	12,8%	20,3%	32,2%	55,4%	81,0%
Остаточный запас урана	451,0 кг	243,4 кг	125,1 кг	80,9 кг	51,6 кг	30,5 кг	21,1 кг
Эквивалент УОК + 10 EPP	0,28 кг	0,53 кг	0,93 кг	1,32 кг	1,87 кг	2,99 кг	5,37 кг
20 EPP	0,56 кг	1,04 кг	1,81 кг	2,57 кг	3,59 кг	5,56 кг	9,04 кг
40 EPP	1,11 кг	2,03 кг	3,47 кг	4,84 кг	6,60 кг	9,61 кг	13,30 кг
80 EPP	2,14 кг	3,84 кг	6,34 кг	8,57 кг	11,10 кг	14,33 кг	16,21 кг
$CM_{B2,SF}^* + 10 \text{ EPP}$	0,02	0,05	0,08	0,11	0,16	0,26	0,46
20 EPP	0,05	0,09	0,15	0,22	0,31	0,48	0,77
40 EPP	0,09	0,17	0,30	0,41	0,56	0,82	1,14
80 EPP	0,18	0,33	0,54	0,73	0,95	1,22	1,39
Запас плутония	3,02 кг	1,80 кг	1,07 кг	0,77 кг	0,52 кг	0,28 кг	0,08 кг
Отношение критических масс	0,76	0,45	0,27	0,19	0,13	0,07	0,02
<i>Комбинированное стратегическое значение свежего топлива и облученного топлива (урана и плутония)</i>							
$CM_{B2,tot}^* + 10 \text{ EPP}$	0,80	0,52	0,40	0,39	0,45	0,78	3,10
20 EPP	0,84	0,60	0,53	0,58	0,73	1,33	3,41
40 EPP	0,91	0,73	0,78	0,92	1,23	2,06	3,78
80 EPP	1,06	0,99	1,20	1,49	1,94	2,88	4,03

ПРИЛОЖЕНИЕ

ЦЕЛЕВОЕ ПРОИЗВОДСТВО ПЛУТОНИЯ НА ТИПОВОМ РЕАКТОРЕ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

В дополнение к оценке стратегического значения ядерного материала, связанного с регулярной эксплуатацией установки, для справочных целей кратко рассматривается эффективность кампании целевого производства плутония.

Кампания производства плутония может производиться либо на специально построенном военном производственном реакторе, либо на исследовательском или энергетическом реакторе, который не был первоначально сконструирован для производства плутония. В случае исследовательского реактора производство плутония может проводиться скрыто или открыто, т.е. попытка скрытия этого режима от внешних наблюдателей может либо делаться, либо не делаться³⁰. Производство плутония на типовом реакторе для испытаний материалов может быть оптимизировано, если в активную зону будут загружены так называемые запальные топливные элементы для поддержки критичности реактора и топливные элементы-мишени для производства плутониевой продукции. Запальные топливные элементы могут быть высокообогащенными, в то время как элементы-мишени могут содержать либо природный, либо обедненный уран³¹.

Разработка и анализ подробных сценариев производства выходит за рамки этого исследования, но грубую оценку можно сделать только на основании нейтронного баланса в типичном реакторе для испытаний материалов. Скорость делений и образования нейтронов на тепловой мегаватт можно определить, используя типичные значения для выделения энергии и образование нейтронов в акте деления, соответственно равные 200 МэВ и $\nu = 2,4$.

$$1 \text{ МВт (тепл.)} \equiv 3,12 \cdot 10^{16} \text{ делений/с или } 7,50 \cdot 10^{16} \text{ н/с} \quad (1A)$$

Обычно 25-35% всех нейтронов, высвобождаемых в типичном реакторе для испытаний материалов, не требуются для поддержания критичности, и поэтому доступны для других целей. Предполагая, что все эти нейтроны поглощаются в материале мишени и в конце концов приводят к накоплению плутония, можно получить теоретический верхний предел для производства плутония:

$$\xi_{\text{макс}} \approx (0,50 \div 0,90) \text{ г Pu / МВт·день (тепл.)} \quad (2A)$$

На практике скорость образования, близкая к $\xi_{\text{макс}}$, которая была бы эквивалентна к общему отношению преобразования, равному $0,55 \div 0,80$ ³², не достижима. Из-за относительно компактной конструкции активной зоны типичных реакторов для испытания материалов ожидается, что значительная доля нейтронов выйдет из активной зоны. Кроме того, паразитное поглощение нейтронов в конструкционных и других материалах, так же как и в самом плутонии, еще более уменьшит эффективность³³. Сделав специальное предположение, что эти эффекты уменьшат эффективность на дополнительные 30-40%, можно будет оценить прак-

³⁰ Последующее обсуждение не касается возможности успешного скрытия производства плутония на находящемся под гарантиями исследовательском реакторе. Эффективность гарантий для обнаружения тайного производства плутония обсуждалась, например, в отчете M. M. Miller and C. A. Eberhard: The Potential for Upgrading Safeguards at Research Reactors Fueled with Highly Enriched Uranium. Massachusetts Institute of Technology, prepared for the United States Arms Control and Disarmament Agency (ACDA), November 1982; и в работе J. A. Powers: Safeguarding Research Reactors. STR-118 (Draft), International Atomic Energy Agency, March 1983.

³¹ Оба материала мишени практически идентичны для накопления плутония, но энерговыделение в природном уране может составлять значительную долю от полной тепловой мощности реактора.

³² Отношение преобразования определяется как количество атомов плутония, в расчете на количество потребленных атомов U-235. Как показано в табл. 4, типичные справочные значения составляют 1,1 – 1,2 г U-235 на тепловой мегаватт-день.

³³ В случае большого реактора с графитовым замедлителем и топливом из природного урана, утечка будет намного меньше. В этом типе реакторов достигаются отношения преобразования до 0,8. Для реактора мощностью 30 МВт, работающего 300 дней в году, это соответствует годовому производству плутония более 8 кг.

тическую скорость производства плутония $\xi_{эфф}$:

$$\xi_{эфф} \approx (0,4 \div 0,6) \text{ г Pu / МВт}\cdot\text{день (тепл.)} \quad (3A)$$

Основываясь на этих значениях и масштабируя к ранее обсуждавшемуся типовому реактору с мощностью 30 МВт, работающему 300 дней в году, можно получить, что достижимая скорость накопления плутония в целевой кампании по производству плутония составляет $3,6 \div 5,4$ кг Pu в год.

С этим согласуются выводы более подробного анализа сценариев производства плутония, по которым на типичном реакторе для испытания материалов с мощностью 30 МВт может быть ежегодно произведено $3 \div 6$ кг плутония³⁴. Эти числа можно сравнить с регулярным и неизбежным накоплением плутония в реакторе с топливом из НОУ (19,75%) мощностью 30 МВт, по порядку величины равному 1 кг Pu в год (см. табл. 4). Отметим также, что производство плутония в воображаемом реакторе для испытания материалов с топливом из слабо обогащенного урана (5%), работающем при относительно небольшом выгорании топлива (20%) уже приближается к скорости накопления, достигаемой в целевых кампаниях на типичных реакторах для испытания материалов ($3,46$ кг со средним содержанием Pu-239 около 90%, табл. 4).

Имеется множество практических последствий целевых кампаний производства плутония, которые далее не обсуждаются здесь. Например, для работы такого реактора потребуется значительно меньше обычных топливных элементов, чем это можно было бы ожидать на основании тепловой мощности установки. Это связано со значительным высвобождением энергии в материале мишени. В то же время, большое количество топливных элементов-мишеней, содержащих заметное, и, возможно, необъявленное количество урана, должно загружаться в реактор, и выгружаться из него. Это разительное противоречие между запрашиваемым количеством топлива (небольшим) и объемом работ с активной зоной (высоким) делает скрытое производство плутония на реакторе, находящемся под адекватными гарантиями, довольно трудным.

³⁴ В работе Миллера и Эберхарда (см. сноску 30) рассматривается типичный реактор с мощностью 50 МВт, и годовое производство плутония оценивается в $5 - 10$ кг.