

ПРОВЕРКИ СОГЛАСОВАННОСТИ ЗАЯВЛЕНИЙ США О ПРОИЗВОДСТВЕ ДЕЛЯЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ

Фрэнк фон Хиппель

В 70-х и начале 80-х годов правительство США выпустило сведения по истории закупок естественного урана, величине разделительной работы, произведенной на американских предприятиях по обогащению урана, и по энергии деления, высвобожденной на американских производственных реакторах. Эти данные создали основу для неправительственных оценок в 80-е годы производства плутония и высоко обогащенного урана в США. В 1996 и 2006 годах Соединенные Штаты опубликовали доклады по истории производства плутония и высоко обогащенного урана, соответственно. В этой статье представлен первый грубый анализ двух подборок данных и сделан вывод, что они находятся в разумном согласии.

Фрэнк фон Хиппель работает по Программе науки и всеобщей безопасности, и в Школе Вудро Вильсона по государственным и международным вопросам, Принстонский университет. Принстон, Нью Джерси, США..

Статья поступила 20 ноября 2010 года и принята к опубликованию 23 ноября 2010 года.

Почтовый адрес для корреспонденции: Frank N. von Hippel, Program on Science and Global Security, Woodrow Wilson School of Public and International Affairs, Princeton University, 221 Nassau St., Floor 2, Princeton, NJ 08542, USA.

Электронный адрес: fvhippel@princeton.edu

ВВЕДЕНИЕ

Соединенные Штаты были первой страной, получившей высоко обогащенный уран (ВОУ) и плутоний для оружия. В 1996 и 2006 годах они опубликовали официальные отчеты об истории производства и использования этих материалов, основанные на данных Системы управления ядерными материалами и их охране:

- Высоко обогащенный уран : подведение баланса¹, и
- Плутоний: первые 50 лет².

На Рис.1 показаны площадки, где США производили ВОУ и выделяли плутоний для военных целей.



Рис. 1. Производственные площадки в США для производства ВОУ и плутония. Квадратиком отмечены площадки для ВОУ (это Портсмут в штате Огайо и Окридж в штате Теннесси), а звездочкой – для плутония (Хэнфорд в штате Вашингтон и Саванна Ривер в Южной Каролине).

В соответствии с заявлением по ВОУ США всего произвели в Окридже (штат Теннесси) и в Портсмуте (штат Огайо) около 850 тонн ВОУ, содержащего около 750 тонн урана-235. Производство ВОУ для оружия прекратилось в 1964 году как раз до того, когда запас американских ядерных боеголовок достигнул максимума свыше 30 000 единиц³. В дальнейшем каждое поколение ядерных боеголовок США использовало ВОУ, переработанное от предыдущих поколения. Впрочем, ВОУ с обогащением ураном-235 до 96% производился до конца 1992 года. Он использовался в качестве топлива для реакторов морского базирования. Доступность громадных количеств урана оружейного качества от избыточного оружия холодной войны сделала ненужным дальнейшее производство ВОУ и для этой цели.

Согласно заявлению о производстве плутония девять американских реакторов, изготовлявших плутоний на площадке Хэнфорд, произвели всего 67 тонн плутония, а пять реакторов в Саванне Ривер 36 тонн. Пик производ-

ства пришелся на 1964 год. Девять из четырнадцати реакторов были закрыты в 1964-1971 годы, а последний – в 1988 году.

В этой статье сообщается о положительных результатах грубой проверки согласования американских заявлений о производстве ВОУ и плутония с информацией, опубликованной правительством США в 70-х и начале 80-х годов и касающейся следующего:

- Ежегодная работа по обогащению, проводившаяся на обогатительном комплексе США, и
- Ежегодное выделение тепла от деления на производственных реакторах США.

Сообщается также о хорошем согласии между количеством урана, закупленного правительством США в период 1944-71 годов, и подсчитанным количеством урана-235, требовавшимся для заявленного производства ВОУ и плутония, когда принимаются во внимание опубликованные запасы естественного и низко обогащенного урана на конец холодной войны.

Эти проверки на совместимость получены из неправительственных оценок производства американских ВОУ и плутония, выполненных в 80-годах, задолго до того, когда стали доступными правительственные заявления⁴.

ВИСОКООБОГАЩЕННЫЙ УРАН (ВОУ)

Естественный уран содержит около 0.72 процента изотопа уран-235, осуществляющего цепную реакцию и смешанного с ураном-238, который не поддерживает цепную реакцию. Уран, обогащенный более, чем на 20%, ураном-235, рассматривается как приемлемый для оружия и называется "высокообогащенным ураном". ВОУ впервые был изготовлен для бомбы, сброшенной на Хиросиму и содержавшей около 60 кг обогащенного до 80% урана.

В течение 1945-47 годов немногим более тонны ВОУ было получено с помощью электромагнитного разделения на заводе Y-12 около Окриджа (штат Теннесси), созданного в рамках Манхэттенского проекта. Впрочем, метод разделения американского ВОУ быстро переменялся в пользу двух крупных газодиффузионных заводов (ГДЗ). Один из них находился в Окридже (штат Теннесси) и второй в Портсмуте (штат Огайо) (смотрите Таблицу 1)⁵.

ГДЗ в Окридже, строительство которого началось во время второй мировой войны, производил ВОУ для оружия вплоть до 1964 года, когда запас американских боеголовок достиг максимума. Затем до 1985 года он производил только уран с низким обогащением для топлива ядерных электростанций.

ГДЗ в Портсмуте начал выпускать продукцию в 1956 году и также прекратил производство ВОУ для оружия в 1964 году. Однако он начал производить ВОУ, имеющий даже еще более высокую степень обогащения (в среднем 97.4%) для топлива реакторов морского базирования. Всего для топлива таких реакторов было изготовлено 164

тонны урана столь высокого качества со средней производительностью около 6 тонн в год. Эта программа завершилась в 1992 году, когда огромные количества ВОУ (с обогащением свыше 90%) стали доступными в результате первого после холодной войны сокращения запасов американского ядерного оружия. Будущие американские реакторы морского базирования сконструированы для питания этим ураном⁶.

Табл. 1. Обогащительные заводы, производившие американский ВОУ. Источник: МЭ США, "Высокообогащенный уран: подведение баланса."

Площадка	Технология разделения изотопов	Период производства ВОУ	Пик годового производства (уран-235 в ВОУ)
Ок Ридж, Теннесси	Электромагнитный	1945-47	Около 1 т, но в основном повторное разделение
Ок Ридж, Теннесси	Газовая диффузия	1945-64	37 т/год в 1958-62
Портсмут, Огайо	Газовая диффузия	1956-92	39-40 т/год в 1960-62

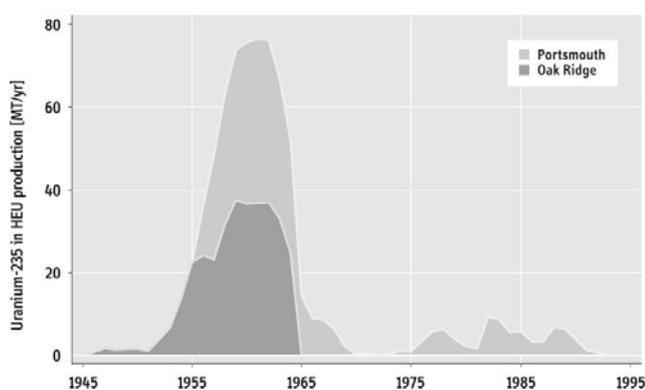


Рис. 2. История общего производства ВОУ в США по площадкам (тонны содержащегося урана-235 в год) Данные накладываются, поэтому верхняя кривая отражает полное производство ВОУ. Основано на докладе МЭ США "Высокообогащенный уран: подведение баланса".

На Рис.2 приведена история заявленного производства американского ВОУ, измеренного содержанием урана-235, по годам и по площадкам. ВОУ измеряется по содержанию урана-235, поскольку это определяет ценность ВОУ и является также хорошей мерой разделительной работы, которая требуется для производства ВОУ⁷.

Согласованность с исторической разделительной работой

В 70-х годах и в начале 80-х правительство США открыло историю ежегодной работы по разделению, проведенной разделительным комплексом США, и количества урана-235, оставшегося в соответствующем обедненном уране (Рис.3)⁸. На Рис.3. приведено также количество работы по обогащению, которая требуется для учета ежегодного производства ВОУ, заявленного в докладе "ВОУ: подведение баланса", плюс небольшие затраты на повторное обогащение топлива, используемого для ежегодного производства американского плутония, как сказано в докладе "Плутоний: Первые 50 лет". Расчеты носят приблизительный характер более важно по причине того, что производство и повторное обогащение американского ВОУ представлены в виде двух потоков со средним обогащением в диапазонах 20-70 и 70-100 процентов. Однако, будет видно, что такая подгонка действует примерно до 1964 года, когда США начали производить в больших количествах уран с низким уровнем обогащения для энергетических реакторов.

ПЛУТОНИЙ

Первые значительные количества плутония, произ-

веденного в США, были использованы для ядерного взрыва, испытанного в штате Нью Мексико 16 июля 1945 года. Основанная на этом устройстве бомба была взорвана 9 августа 1945 года над японским городом Нагасаки. Этот плутоний был получен на первых трех реакторах с графитовым замедлителем и водяным охлаждением, построенных там, где теперь на реке Колумбия (штат Вашингтон) находится площадка Хэнфорд Министерства энергетики (МЭ) США. Еще шесть таких производственных реакторов с замедлителем из графита и водяным охлаждением были позднее построены в Хэнфорде, а пять производственных реакторов на тяжелой воде, использованной для замедления и охлаждения, были созданы на площадке Саванна Ривер в штате Южная Каролина (Табл.2 и Рис.4)⁹. Кроме получения плутония реакторы в Саванне Ривер использовались для получения трития – тяжелого изотопа водорода с периодом полураспада 12 лет, который применялся для увеличения интенсивности делений в запускающих устройствах современных моделей оружия¹⁰.

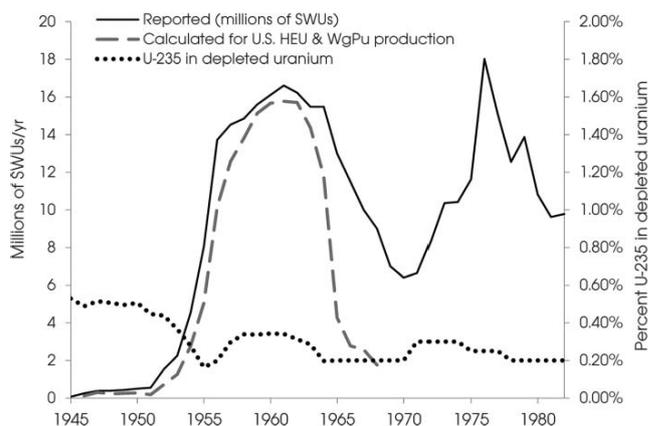


Рис. 3. Распределение по годам опубликованной обогащательной работы в США, которую можно учитывать по производству ВОУ в США и по повторному обогащению естественного урана для применения в качестве топлива в реакторах, производящих плутоний. Источник: James H.Hill and Joe Parks, Администрация США по НИР в области энергетики. По оси X отложены годы, по оси Y (слева) – миллионы EPP в год, а справа – доля U-235 в обедненном уране. Сплошная линия указывает опубликованные значения EPP, штрихованная линия – расчеты EPP для производства ВОУ и плутония оружейного качества, а точечная линия - содержание урана-235 в обедненном уране.

Восемь из девяти производственных реакторов в Хэнфорде были закрыты навсегда между 1964 и 1971 годами – в период, когда ядерные запасы США достигли максимума. N-реактор в Хэнфорде продолжал работать в период 1971-82 годов прежде всего для выработки электроэнергии, а полученный в качестве побочного продукта плутоний топливного качества шел на программу реакторов-бридеров. В 1983 году из-за планов администрации Рейгана по увеличению размера американского запаса N-реактор вернули к производству плутония оружейного качества, но в 1987 году его закрыли после того, как авария 1986 года в Чернобыле возбудила опасения относительно отсутствия здания, способного выдержать аварию¹¹. Четыре из пяти реакторов в Саванне Ривер продолжали действовать в 80-х годах, в основном производя тритий. Сегодня тритий для ядерного оружия США производят в энергетических реакторах¹².

Весь плутоний, произведенный на реакторах Саванна Ривер, имел "оружейное качество" (относительно чистый плутоний-239 с содержанием плутония-240 менее семи процентов), но 12.9 тонн плутония из Хэнфорда не имеют оружейного качества. Сюда входят 4 тонны плутония, которые никогда не выгружались из облученного топлива N-реактора.

Реакторы в Хэнфорде применялись для производства примерно тонны урана-233 и некоторого количества трития на экспериментальной основе¹³, но значительное преимущество имело производство плутония. Реакторы в

Саванне Ривер заправлялись большую часть времени ВОУ-топливом для получения трития, а также плутония. На них также были получены меньшие количества урана-233, америция-242, юрия-244, полония-210, кобальта-60, плутония-238, плутония-242 и калифорния-252¹⁴.

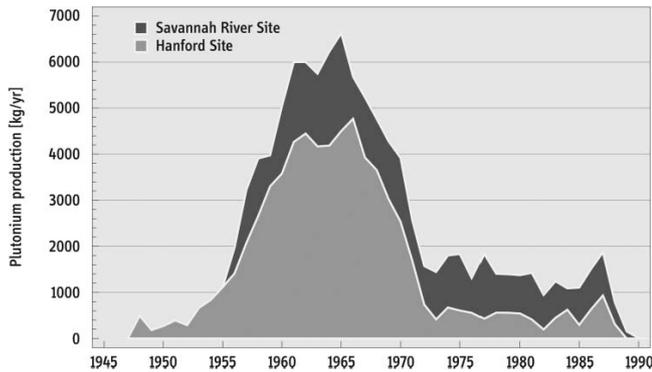


Рис. 4. Заявленное производство (по годам) американского плутония на двух площадках. Данные накладываются и поэтому верхняя кривая соответствует полному производству плутония. По оси X отложены годы, в по оси Y - производство плутония (кг/год). Светлый фон соответствует производству в Хэнфорде, а темный – в Саванне Ривер. Источник: МЭ².

Табл. 2. Американские производственные реакторы и периоды их работы. Источник: Министерство энергетики США².

Площадка Хэнфорд	Сроки работы	Площадка Саванна Ривер	Сроки работы
B-реактор	1944-68	R-реактор	1953-64
D-реактор	1944-67	P-реактор	1954-88
F-реактор	1945-65	K-реактор	1954-92
H-реактор	1949-65	L-реактор	1954-88
DR-реактор	1950-64	C-реактор	1955-85
C-реактор	1952-69		
KW-реактор	1955-70		
KE-реактор	1955-71		
N-реактор	1963-87		
Пик производства плутония на площадке:	5,3 т (1965)	2,1 т (1964)	

Совместимость с историей производства тепла от деления

В середине 80-х годов МЭ опубликовало данные о выделении тепла производственными реакторами в Хэнфорде и Саванне Ривер за период 1951-1971 годов, а Кохрен и др. в работе *Производство американских ядерных боеголовок* воспользовался данными МЭ за 1955-84 годы. Эту информацию можно теперь сравнить со сведениями по ежегодному производству плутония, сообщенными в докладе *“Плутоний: Первые 50 лет”*. Считалось, что производство плутония связано с теплом, выделенным в реакторе шесть месяцами ранее, то есть охлаждение облученного урана и переработка занимают шесть месяцев. На Рис.5 показано отношение заявленного общего производства плутония оружейного качества к заявленному количеству тепла от деления для реакторов в Хэнфорде и Саванне Ривер в зависимости от длительности этих периодов.

Это отношение становится менее чувствительным к предполагаемой задержке во времени по мере движения вправо, когда полные суммы в числителе и знаменателе покрывают больше лет. Как показывают данные за последние сроки, отношение для восьми реакторов в Хэнфорде на 1963 год¹⁵ и реакторов в Саванне Ривер на 1984 год находятся, соответственно, на уровне 0.9 и 0.57 тонн плутония на тераватт-день произведенного тепла.

Глейзер подсчитал, что 0.87 тонны плутония оружейного качества, содержащего 94 процента плутония-239, будет создано на каждый тераватт-день в реакторах Хэнфорда¹⁶. Величина производства плутония оружейно-

го качества, приведенная на Рис.5 для Хэнфорда на 1963 год, близка в разумных пределах к его оценкам¹⁷. Темпы производства на реакторах Саванны Ривер должны быть сравнимыми. Тот факт, что их полное производство было меньше примерно на 0.3 тонны на тераватт-день, в первую очередь связан с затратой большей части избыточных нейтронов на производство трития¹⁸.

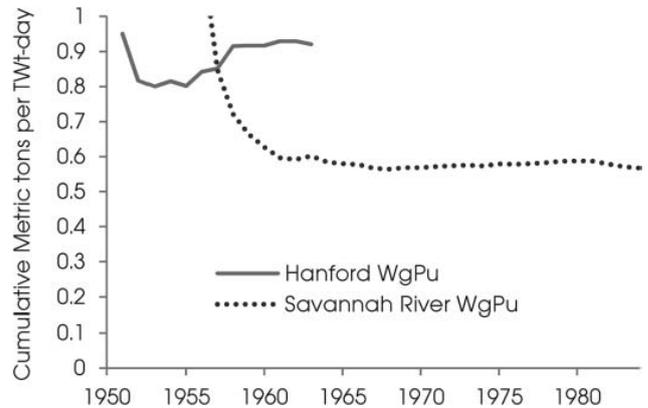


Рис. 5. Полное производство плутония, деленное на полное тепло от деления, выделяемое от восьми производственных реакторов в Хэнфорде за период 1944-1963 годов и реакторов в Саванне Ривер за период 1955-1984 годов. Предполагалось, что плутоний был выделен через шесть месяцев после производства. Большое значение отношения в ранний период для реакторов в Саванне Ривер вероятно является артефактом, связанным с неточностью этого предположения, который дает только небольшой эффект в более поздние годы. Источник: вычисления автора. По оси Y отложено отношение полного количества плутония к времени в единицах тонна на Тераватт /день. По оси X отложены годы, сплошной линией обозначены данные для плутония оружейного качества из Хэнфорда, а пунктирной - из Саванны Ривер.

ЗАКУПКИ УРАНА

На Рис.6 приведен график ежегодных закупок правительством США естественного урана. Всего было закуплено 250 тысяч тонн урана, содержащего около 1800 тонн урана-235¹⁹.

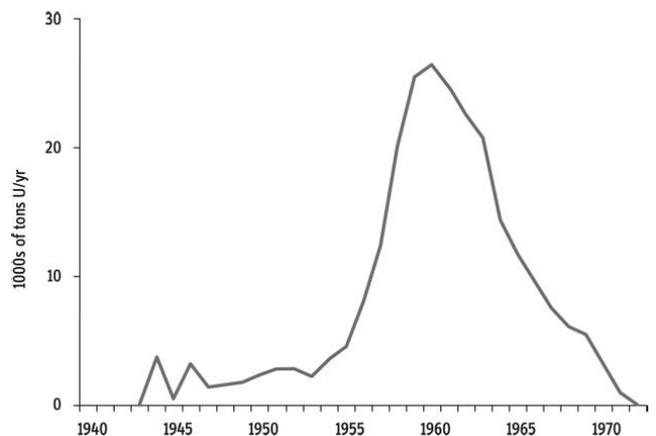


Рис. 6. Закупки естественного урана правительством США. Источник: Кохрен и др. По оси Y отложено ежегодное количество урана (тысячи тонн), по оси X – годы.

Соединенные Штаты завершили холодную войну с некоторым количеством урана-235 в неиспользованном естественном и обедненном уране. В 1985 году МЭ официально заявило об американских операциях по обогащению, утверждая, что запасы естественного и обогащенного урана эквивалентны 41600 тоннам естественного урана и 16.5 миллионам единиц разделительной работы (ЕРР)²⁰. Эквивалент естественному урану должен содержать около 300 тонн урана-235. Однако МЭ продол-

жало свою деятельность и произвело с 1986 по 1992 годы ВОУ, содержащий 34 тонны урана-235. Эта операция сопровождалась накоплением 18 тонн урана-235 в обедненном уране (в предположении, что содержание урана-235 составило 0,25%)²¹. Все это оставит около 250 тонн урана-235, что эквивалентно 35700 тоннам естественного урана в резервах МЭ. Этот запас позднее был большей частью продан или передан Обоганительной Корпорации МЭ²².

В добавление к этому запасу естественного и низкообогащенного урана (НОУ) на установках по обогащению урана МЭ завершило холодную войну с запасом естественного урана и НОУ в топливных циклах производственных реакторов Хэнфорда и Саванны Ривер. Из этого материала 2159 тонн НОУ находилось в закрытом Центре Фернальд по производству топливных материалов (2155 тонн с обогащением в диапазоне 0.82-1.25% и 4 тонны со средним процентом обогащения около 5), а 1462 тонны – на площадке МЭ по производству плутония в Хэнфорде (865 тонн с обогащением 0.95-1.25%, 450 тонн со средним уровнем обогащения 0.86% и 147 тонн естественного урана)²³. Рассмотренный уран содержит поэтому дополнительные 35 тонн урана-235. Кроме того, если предположить, что 2100 тонн отработанного топлива N-реактора в Хэнфорде имеют среднее обогащение порядка одного процента, то реактор содержит около 20 тонн урана-235. Общее количество урана-235 в остатках топливного цикла этого реактора для производства плутония окажется порядка 55 тонн. Приведенная информация суммируется в Таблице 3.

Табл. 3. Приобретенный правительством США уран-235 в составе естественного урана минус оставшийся в составе естественного и низкообогащенного урана на конец холодной войны сравнивается с оцененным количеством, требуемым для производства плутония и ВОУ (тонны).

Приобретено	1800
Осталось в естественном уране и НОУ в топливном цикле производственных реакторов в обоганительном комплексе	55
остаточное использованное количество	250
Потребности для производства ВОУ	1495
Потреблено в естественном и слегка обогащенном топливе производственных реакторов	750
В обедненном уране от производства ВОУ	100
от производства естественного и слегка обогащенного топлива производственных реакторов	550
Общие потребности	69
	1469

Табл.3 дает также оценки потребностей США в уране-235 для производства ВОУ и плутония, а также связанные с этим оценки количества урана-235 в обедненном уране. Согласие между приобретенным и затраченным количествами лучше, чем ожидалось, с учетом содержащихся неопределенностей. Ниже мы дополним записи в Табл.3, помещенные под заголовком "потребности".

Для производства ВОУ

Мы видели выше, что 750 тонн урана-235 ушли в американский ВОУ.

Потрачено в виде топлива из естественного и слабо обогащенного урана в реакторах для производства плутония

Девять реакторов в Хэнфорде выработали 54.5 тонн плутония оружейного качества и 12.9 тонн плутония топливного качества. Если использовать темпы производства 0.9 тонн плутония на тераватт-день для плутония оружейного качества (0.7 тонн для плутония топливного качества),²⁴ соответствующее выделение тепла составит около 60 (18) тераватт-день. Около 5 (3) тераватт-день этого тепла от делений выделится от деления плутония-239²⁵. Если предположить, что одна тонна делений приходится на кВт-день, число делений урана-235 в плутонии оружейного (топливного) качества составит 55 (15) тонн. Если принять во внимание, что 0.18 атомов урана-235 превращаются в уран-236 на каждый атом урана-235, который испытывает деление, полное количество потребленного урана-235 для производства в Хэнфорде плутония оружейного и топливного качества составит

около 80 тонн.

Уран-235, потребленный в ВОУ-топливе для производственных реакторов в Саванне Ривер, уже включен в оценки производства ВОУ, проведенные выше. Реакторы в Саванне Ривер заполнялись, однако, топливом из естественного или низкообогащенного урана во время кампании по производству плутония до 1968 года²⁶ и за это время они произвели 17.4 тонн плутония оружейного качества. Если предположить темпы производства 0.9 тонн плутония на тераватт-день, это будет соответствовать потреблению дополнительных 18 тонн урана-235.

Полное количество урана-235, потребленное в виде естественного или слегка обогащенного урана при производстве американского плутония, окажется поэтому равным около 100 тонн.

В обедненном уране

Большинство урана-235 из естественного урана, закупленного Соединенными Штатами, перешло в обедненный уран.

От производства ВОУ.

С учетом чистого производства ВОУ и истории обедненного урана (Рис.3) количество урана-235 в обедненном уране, связанное с производством ВОУ, составит 550 тонн.

От обогащения естественного и слегка обогащенного топлива для производственных реакторов.

Для производства плутония оружейного качества, содержащего 5 процентов плутония-240, в реакторе с графитовым замедлителем топливо из естественного урана облучается до тех пор, пока не выделится примерно 700 МВт-дней энергии деления на тонну урана²⁷. Как отмечалось, примерно 0.9 тонны плутония оружейного качества было создано на тераватт-день выделенной энергии деления (Рис.5). Примерно 1 тераватт-день энергии выделяется при делении тонны урана-235 или тонны плутония и примерно 0.18 тонн урана-235 преобразуется в уран-236 на каждую тонну разделившегося урана-235. Впрочем, часть делений приходится на плутоний. На каждый атом плутония-239, захвативший нейтрон и превратившийся в плутоний-240, два атома плутония-239 делятся²⁸. Если все это принять во внимание, то на каждую тонну произведенного плутония оружейного качества приходится облучить около 1600 тонн урана, обогащение которого снижается на 0.08 процента. Если предположить, что уран снова обогащается до 0.72%, и воспользоваться данными по истории анализа обедненного урана (Рис.3), надо будет затратить около 6 миллионов ЕРР и дополнительно загнать 64 тонны урана-235 в обедненный уран в результате повторного обогащения облученного урана от производства 54.5 тонн плутония оружейного качества в Хэнфорде плюс 17.4 тонн, произведенных в Саванне Ривер по 1968 год, до того, как реакторы в Саванне Ривер заработали на ВОУ²⁹.

Что касается производства плутония топливного качества, Кохрен и др. утверждали, что свежее топливо N-реактора имело обогащение около 0.99% урана и при работе в режиме производства плутония топливного качества среднее обогащение отработанного топлива составляло 0.77 процента³⁰. Это соответствует выделению энергии деления 1.9 Мвт-день на килограмм и производству 1.44 грамма плутония на килограмм³¹. Повторное обогащение топлива до уровня 0.99% при среднем содержании урана-235 в обедненном уране около 0.23% приведет к тому, что 0.3 атома урана-235 останутся в обедненном уране в расчете на каждый потребленный атом урана-235 и поэтому всего около 5 тонн урана-235 уйдет в обедненный уран.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Министерство энергетики США, "Высокообогащенный уран: подведение баланса. Доклад об истории производства Соединенными Штатами высокообогащенного урана и деятельности по приобретению и использованию с 1945 года по 30 сентября 1996 года". Черновик, первый вариант, январь 2001 года (опубликован в 2006 году). www.ipfmlibrary.org/doe01.pdf.
2. Министерство энергетики США, "Плутоний: Первые 50 лет: Производство, приобретение и использование Соединенными Штатами с 1944 по 1994 годы", DOE/DP-0137(1966) www.ipfmlibrary.org/doe96.pdf.

3. Роберт Морган, заместитель министра энергетики США по оборонным программам, слушания по распределению финансирования на 1985 год в Палате представителей США, 13 марта 1984 года, стр. 346-347.
4. Фрэнк фон Хиппель, Дэвид Олбрайт и Барбара Леви, "Количества делящихся материалов в арсеналах ядерного оружия США и Советов," Принстонский университет, PU/CEES 168 (1986) <http://www.fissilematerials.org/ipfm/site.down/hip86.pdf>. Thomas B. Cochran, William M. Arkin, Robert S. Norris, and Milton M. Hoenig, *Nuclear Weapons Databook, Vol.2, US Nuclear Warhead Production* (Cambridge, MA, Ballinger, 1987).
5. Третий завод с газовой диффузией, в Падуке, Кентукки, который еще работал в 2010 году, производил только низкообогащенный уран, но был частью комплекса по производству ВОУ, потому что обогащал обедненный уран с двух других заводов. Смотрите ссылку¹, таблицы 5.2, 5.3 и 5.4, а также 6.2, 6.3 и 6.4.
6. Министерство энергетики США, "Запросы в бюджет Конгресса на 2009 финансовый год", том 1, DOE/CF-024, p.550.
7. Основано на работе¹, таблицы 5-1, 5-3, 6-3 и 6-4. США произвели ВОУ, содержащий около 102 тонн урана-235, с обогащением менее 90%. Из этого количества ВОУ, содержащий 60 тонн урана-235, был направлен для повторного обогащения на обогатительные заводы. Сорок восемь тонн плутония оружейного качества (с обогащением свыше 90%) также прошли повторное обогащение. Размер работы по обогащению, требуемой для получения ВОУ, в котором содержится килограмм урана-235, только слегка зависит от степени обогащения ВОУ. Она зависит в большей степени от характера обедненных остатков урана. Для обогащения ВОУ в пределах 20-99 процентов урана-235 требования к количеству ЕРР (на кг урана-235) растут от 192 до 218 для содержания урана-235 в остатках 0.1%, от 229 до 256 при содержании в остатках урана-235 0.2% и от 299 до 325 при обогащении остатков 0.3%.
8. ЕРР – это единица разделительной работы (килограмм). Эквивалент ЕРР для ВОУ рассчитывается отдельно на основе среднего обогащения чистого ВОУ, полученного с обогащением больше или меньше 70% в текущем году. Это приближение не срабатывало с 1968 года – заметнее всего в 1969, 1970, 1971, 1974 и 1976 годах, когда обогащение материала с обогащением свыше 70% считалось, как превышающее 100%. Бывали годы, когда возвращаемый в Портсмут на повторное обогащение ВОУ по своему выходу был сравним с полным выходом свежего ВОУ или даже превышал его. В этом случае требовались более тщательное наблюдение за входами и выходами и регулировка интервалов обогащения. История американского обогатительного комплекса описана в нескольких работах: Джеймс Хилл и Джо Паркс (Администрация США по НИР в области энергетики), "Обогащение урана в США", CONF 750324-7, Рис.1. "1971-1982: Ежегодные отчеты по обогащению урана за 1980 и 1982 годы", МЭ США, Управление по операциям в Окридж. Смотрите работу Кохрена и др.⁴, стр.85 и 184; данные по производству ВОУ США с различным обогащением приведены в работе¹ (таблицы 5.1, 6.2, 6.3 и 6.4).
9. Работа², стр. 25,30 (Таблица 2) и Таблицы 2,3 (Рис.4).
10. В современных конструкциях ядерных боеголовок слияние трития и дейтерия используется для генерации нейтронов во время начального взрыва от деления, чтобы вызвать дополнительную вспышку нейтронов, приводящую к увеличению числа делений и тем самым к возрастанию числа делений в "первичной" компоненте. Раньше при разработке американской водородной бомбы предполагалось, что может понадобиться большое количество трития для инициирования слияния ядер дейтерия на втором термоядерном этапе. Смотрите Richard Rhodes, *Dark Sun: The Making of the Hydrogen Bomb* (New York: Simon and Schuster, 1995). Позднее было понято, что тритий может быть создан во время взрыва при захвате нейтронов в литии-6.
11. Конгресс сократил планы администрации Рейгана и американский арсенал вырос всего примерно на 700 боеголовок между 1982 и 1987 годами. "Увеличение прозрачности американского арсенала ядерного оружия", Министерство обороны США, Информационный бюллетень. 3 мая 2010 года.
12. Тритий для ядерного оружия США сейчас изготавливается на принадлежащих государству энергетических ядерных реакторах, управляемых властями долины Теннесси, Комиссия США по ядерному регулированию, "Информационный бюллетень о производстве трития," май 2003 года, <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/tritium.html>.
13. Внутренняя телеграмма Атомной комиссии от 29 января 1968 года санкционировала производство 640 кг урана-233. <<http://www5.hanford.gov/ddrs/common/findpsge.cfm?AKey=D199020827>>. Производство трития на слегка обогащенном топливе обсуждалось Пикоком и др., "2.1 меморандум о загрузке обогащенным ураном и литием – исполнение топлива и мишени", 24 июля 1967 года, <http://www5.hanford.gov/ddrs/common/findpage.cfm?AKey=D1344939>.
14. Смотрите², стр.30.
15. В 1964 году реакторы в Хэнфорде начали производить плутоний топливного и оружейного качества, но только плутоний топливного качества производился в 1972-82 годах.
16. Международная группа по делящимся материалам (IPFM), Глобальный доклад 2010 года по делящимся материалам, Приведение записей в порядок: Производство и Запасы", Приложение Б, Производство ВОУ и плутония для оружия, стр.145, <<http://www.fissilematerials.org/ipfm/site.down/gfmr10.pdf>>.
17. Ежегодные значения для тепла от деления в производственных реакторах Хэнфорда и Саванны Ривер приведены в статье Кохрена и др.⁴ (таблицы 3.2, 3.3 и 3.4). Ежегодное производство плутония на площадках Хэнфорда и Саванны Ривер взяты из доклада² (таблицы 2 и 3). Огромное количество дополнительного материала об операциях на реакторах в Хэнфорде было рассекречено. <http://www2.hanford.gov/declass/>.
18. Если предположить, что при отсутствии производства других радионуклидов реакторы будут производить 0.87 тонны плутония на тераватт-день, а 1/72 грамма трития получают вместо непроизведенного грамма плутония (смотрите работу Кохрена⁴ (стр. 180, примечание 4), то в среднем около 7.5 кг трития было бы произведено в течение года за период 1970-1984 годов. Допустим, что производство в этот период было сосредоточено на получении трития, чтобы сбалансировать его распад, связанный с периодом полураспада 12.1 года. Тогда это будет соответствовать равновесному запасу около 130 кг трития в начале 80-х годов или в среднем примерно шести граммам на боеголовку в те времена, когда было около 23000 ядерных боеголовок в арсенале США. Смотрите¹¹.
19. Смотрите работу Кохрена и др.⁴ (Табл. 3.17). Данные о закупке Соединенными Штатами естественного урана в период 1956-71 годов можно также найти в *Статистических данных об урановой промышленности* (МЭ США, отделение в штате Колорадо), GJO-100(33).
20. "МЭ говорит, что оно не будет нуждаться в закупках урана", *Nuclear Fuel*. 20 мая 1985 года.
21. Сообщается, что в 1985 году обогатительный завод в Портсмуте (единственный завод, производивший ВОУ в это время) работал с таким уровнем обогащения. Смотрите²⁰.
22. Обогатительная корпорация США (USEC) взяла на себя операцию оставшихся газодиффузионных обогатительных заводов в Портсмуте (штат Кентукки) и Падуке (штат Огайо) в 1998 году. В этом году МЭ перевел в USEC 10800 тонн естественного урана и эквивалент 453 тонн в виде НОУ. "Естественный уран и ВОУ от МЭ", *Nuclear Fuel*, 13 июля 1998 года. Оценка окружающей среды в 1996 году утверждает, что МЭ заявило об избытке для продажи 7800 тонн естественного урана и 450 тонн НОУ с уровнем обогащения 4.5%. Смотрите оценку окружающей среды, проведенную МЭ: "Продажа избыточного урана и низкообогащенного урана", DOE-EA-1172 от октября 1996 года. При получении НОУ с уровнем обогащения остающегося урана 0.3% это будет соответствовать 12400 тоннам естественного урана. В 2008 году МЭ заявило, что имело 5156 тонн избыточного естественного урана в виде гексофторида (заявление МЭ от 16 декабря 2008 года "План управления избыточными запасами урана." Приложение Б http://www.ne.doe.gov/pdfFiles/inventory_plan.unclassified.pdf). Полное содержание упомянутого

урана составило 28800 тонн в естественном виде (200 тонн урана-235). Кроме того, USEC имела запасы, эквивалентные 12145 тоннам естественного урана до передач МЭ (смотрите приведенное выше сообщение *Nuclear Fuel*). Считается, что основная часть этого материала принадлежит заказчикам, но рабочий запас должен поступить от заводов. Объединенные возможности заводов в Падуке и Портсмуте были порядка 20 миллионов ЕРР. Рабочее количество материала в каскадах было порядка 2000 тонн. Смотрите книгу Алана Красса, *Обогащение урана и распространение ядерного оружия* (Нью-Йорк, Служба международной публикации, Тэйлор и Фрэнсис, 1983), стр.127. USEC оценила, что потребуется операционный запас в 5000 тонн. Смотрите также выше заметку от 13 июля 1998 года в *Nuclear Fuel*.

23. "МЭ проявляет интерес к избыточному урану и ЕРР в Фернальде и на площадках Хэнфорда", *Nuclear Fuel*, 13 апреля 1992 года.

24. Для оценки производства плутония оружейного качества мы пользуемся отношением, выведенным на Рис.5. Для получения плутония топливного качества проводим экстраполяцию до значений выгорания, при котором образуется плутоний с содержанием 85% плутония-239. Смотрите статью Александра Глейзера "Изотопные особенности плутония оружейного качества от производственных реакторов с топливом из естественного урана и их отношение к ядерному анализу," *Nuclear Science and Engineering* 163 (2009).

25. Предположив, что содержание плутония-240 составляет 5% и 12% в плутонии оружейного и топливного плутония, соответственно, Кохрен и др. (Таблица 3.4)⁴ показали, что N-реактор, производящий плутоний топливного качества с номинальным содержанием плутония-240 9 и 12 процентов в течение восьми лет в каждом случае. Кроме того, имеется небольшое количество плутония реакторного качества, которое должно увеличить средний процент. Предполагается также, что делится вдвое больше плутония-239 по мере того, как он превращается в плутоний-240. В реакторах Хэнфорда и в реакторе NRX на тяжелой воде отношение нейтронного поперечного сечения деления плутония-239 и его перехода в плутоний-240 равно 2.1 и 2.2, соответственно. Смотрите статью Глейзера²⁴ (Таблица 3).

26. Смотрите работу Кохрена и др.⁴, стр. 185.

27. Смотрите статью Александра Глейзера²⁴.

28. Там же.

29. При 950 тоннах естественного урана на тонну произведенного плутония оружейного качества приходится 52000 тонн переработанного естественного урана из Хэнфорда и 17000 тонн из Саванны Ривер, связанных с производством плутония оружейного качества, а также 6000 тонн, связанных с производством 9 тонн плутония топливного качества, которые были разделены. Эти цифры придется уменьшить на 2159 тонн переработанного урана в Фернальде и 1590 тонн, оставленных в Хэнфорде (смотрите выше). Как сообщают, однако, 86584 тонн переработанного урана с обогащением 0,64% и 3285 тонн переработанного урана из Саванны Ривер с обогащением 0.59% были дополнительно обогащены до 0.73%. Смотрите R.F.Smith, МЭ США, "История воздействия оставшегося урана на каскад в Падуке", март 1984 года (цитируется в работе Питера Даля "Состав запасов обедненного урана МЭ США" (дата не указана). Количество разделительной работы и обедненного урана слегка вырастет, если принять во внимание тот факт, что уран-236 будет накапливаться в переработанном уране и потребует дополнительного обогащения для компенсации своего отравляющего эффекта.

30. Томас Кохрен, Уильям Аркин, Роберт Норрис и Милтон Хениг, *Справочник по ядерному оружию, том 3. Краткие описания предприятий по ядерным боеголовкам* (Кембридж, Массачусеттс. Из-во Беллинджер, 1987), стр. 22-23.

31. Заметим, однако, что среднее количество плутония в сообщении о необработанном топливе из Хэнфорда равно 1.9 грамма на кг урана, МЭ США, "Потоки и учет ядерных материалов на хэнфордовской площадке," HNF-8069 (август 2001 года), таблица 8.