

СКОЛЬКО ПЛУТОНИЯ МОЖНО БЫЛО ПРОИЗВЕСТИ НА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ РЕАКТОРЕ В КНДР?

Джаред С.Драйсер

В предыдущей работе¹ автор изучал максимальное количество плутония, которое можно было бы получить на исследовательских реакторах (работающих на тепловых нейтронах) стран – потенциальных владельцев ядерного оружия (включая Северную Корею), основываясь на заявленных уровнях мощности. Ряд последующих работ^{2,3} были сосредоточены на оценках и пересмотру верхних пределов полного количества плутония, которое могло бы быть произведено на исследовательском северно-корейском реакторе. Олбрайт независимо подсчитал количество плутония, которое Северная Корея могла произвести с 1986 г. в “энергетическом” реакторе мощностью 5 МВт, расположенном в Йонбене, а также дал верхнюю границу оценок полного количества плутония оружейного качества в том случае, если газово-графитовый реактор достигнет скважности 0.8. Полный оценки Олбрайта не содержали потенциального производства плутония на исследовательском реакторе на 8 МВт (работал на тепловых нейтронах), который в МАГАТЭ называют ИРТ-КНДР. Для более лучшей количественной оценки полного производства плутония в Северной Корее в данной статье исследуется содержание плутония в облученном материале. Расчеты ориентированы на то, что можно было бы получить на исследовательском реакторе ИРТ-КНДР, проработавшем на заявленном уровне мощности, в течение всего периода его работы, включая и то время, когда он не находился под гарантиями.

Автор работает в Лос Аламосской национальной лаборатории, Лос Аламос, Нью Мехико, США.

ВВЕДЕНИЕ

Дэвид Олбрайт опубликовал свои оценки и предположения относительно производства плутония Северной Кореей в “Бюллетене ученых-атомщиков” (октябрь 1994 г.) в статье “Сколько плутония есть у Северной Кореи?”⁴ Олбрайт представил оценки содержания плутония в облученном (но не разделенном) топливе, извлеченном в 1989 г. из “энергетического” реактора, и эти оценки лежат в пределах 7-14 кг⁵. Оценка Олбрайта относится к вопросу, сколько плутония можно было произвести в энергетическом реакторе мощностью 5 МВт(э) с 1986 г.⁶

В Северной Корее (Народно-Демократической Республике Корея – КНДР) имеется другой потенциальный источник плутония, не рассмотренный Олбрайтом. Это исследовательский реактор ИРТ-КНДР. У КНДР могло на быть технических возможностей и установок, чтобы использовать ИРТ для производства плутония за 31 год его работы. Но в начале 90-х гг. КНДР признала, что ИРТ был источником небольших количеств плутония, выделенных в 1975 г. Несмотря на эту историю, опубликованные оценки производства плутония в КНДР учитывали только производство энергетического реактора на 5 МВт и не принимали во внимание ИРТ. Чтобы определить, сколько плутония могла произвести Северная Корея, необходимо также оценить содержание плутония в облученном материале, потенциально произведенном в исследовательском реакторе ИРТ на 8 Мвт(тепл). Поскольку ИРТ был источником плутония при извлечении топлива в 1975 г., следует поставить следующий вопрос: *Какое количество плутония могло содержаться в облученном материале, который находился в ИРТ в течение всего периода его работы?* Данное исследование было предпринято как естественное продолжение предыдущей работы.⁷

Если КНДР пыталась получать плутоний в ИРТ, то в этом реакторе можно было произвести всего 4 кг плутония в облученном материале (в невыделенном виде). Это основано на предположении, что ИРТ работал на заявленном уровне мощности со скважностью 0.22⁸ в течение всего операционного периода, включая те 12 лет, когда он не находился под гаран-

тиями. Такая оценка предполагает, что у ИРТ было достаточно топлива для использования. Подобное потенциальное производство плутония потребует хранилища для облученного материала.

История проблемы

Начиная с 60-х гг., ученые КНДР обучались советскими экспертами на ядерных исследовательских установках в Дубне, а также китайцами. Корейские инженеры, вероятно, во время этого обучения получали знания по химии переработки и по соответствующей технологии. Советский Союз поставил КНДР в 60-е гг. исследовательский реактор (ИРТ-КНДР) и лабораторное оборудование для переработки облученного топлива ("горячие камеры"). Реактор ИРТ расположен в Йонбене, а горячие камеры лабораторного типа – в Пхеньяне. Кроме того, в Йонбене была создана небольшая лабораторная критическая установка с мощностью 0.1 МВт, включая горячие камеры. Реактор ИРТ бассейнового типа с начальной мощностью 2 МВт(тепл) впервые стал критичным в августе 1965 г., но не был поставлен под гарантии до 1977 г. ИРТ был поставлен под гарантии МАГАТЭ после заключения тройственного соглашения (СССР, КНДР и МАГАТЭ) о гарантиях 20 июля 1977 г. Соглашения такого типа относятся к установкам, материалу и к конкретному оборудованию. Соглашение вступило в действие фактически спустя 12 лет после того, как ИРТ стал критичным.

КНДР подписала Договор о ядерном нераспространении в 1985 г., но не ратифицировала соглашение о всеобъемлющих гарантиях, связанных с режимом нераспространения, до 9 апреля 1992 г. В рамках своего заявления о гарантиях в мае 1992 г. КНДР представила МАГАТЭ заявление о ядерных материалах и установках. В результате процесса проверок со стороны МАГАТЭ были обнаружены несоответствия в заявлениях КНДР о производстве плутония. Затем КНДР подтвердила использование горячих камер в Пхеньяне и Йонбене для выделения плутония^{10,11,12} еще в 1975 г.^{13,14}, до заключения соглашения о гарантиях 1977 г. КНДР также подтвердила, что реактор ИРТ был источником небольших количеств плутония, выделенных в 1975 г. КНДР перерабатывала плутоний в течение, по крайней мере, четырех разных сроков. Она подтвердила выделение в 1975 г. и в 1990 г.¹⁶, а МАГАТЭ получила образцы, содержащие америций-241, которые указывают, что плутоний выделялся также в 1989 г. и в 1991 г. Очевидно, что КНДР занималась широким изучением этого процесса и технологии к 90-м гг.

Уже в 1965 г. КНДР имела собственную ядерную инфраструктуру, включая обученных ученых и инженеров, исследовательский реактор ИРТ, критические и подкритические установки, а также качественный источник урана в Пеньсане.

Производство плутония в исследовательском реакторе ИРТ-КНДР

Действительная скорость производства плутония в реакторе зависит от ряда конкретных производственных факторов, включая степень обогащения топлива, конфигурации мишеней и работу реактора. Очень точные нейтронные расчеты возможны при наличии детальной информации. Данные о работе реактора ИРТ непосредственно не доступны, что делает невозможным точные нейтронные расчеты. Скорость получения плутония в реакторе соответствует уровню мощности, который пропорционален потоку нейтронов. Поскольку скорость производства плутония пропорциональна уровню мощности, можно *оценить* количество произведенного плутония на основе только уровня мощности реактора и скважности за определенный период времени. Если опираться на эти параметры, то потребуются знание об уровне рабочей тепловой мощности и количестве МВт-дней за год использования реактора. МАГАТЭ выпускает справочник по исследовательским ядерным реакторам⁸, где приводятся заявленные сведения о максимальном рабочем уровне мощности и количестве МВт-дней за год работы для исследовательских реакторов.

Представленные здесь расчеты – это оценки максимального потенциального содержания плутония в облученном материале (ПОМ) на основе заявленного уровня мощности и скважности – как заявленной, так и возможной. Можно воспользоваться аналитическим выражением¹⁸ для оценки количества плутония, потенциально производимого в течение года с использованием "размножающих" (производящих плутоний) мишеней из урана-238 или ес-

тественного урана. Использованное аналитическое уравнение¹⁹ основано на предположении, что у КНДР достаточно топлива и материала для мишеней, что реактор работает при заданной скважности и что возможные темпы производства плутония составляют 0.30-0.40 г плутония на МВт(тепл)-день²⁰.

В 1988 г. было заявлено, что ИРТ обладает мощностью 8МВт(тепл); впрочем, поначалу он был спроектирован на 2 МВт (тепл), а затем в 1974 г. был переделан на уровень мощности 4 МВт (тепл)²¹. В оценке предполагается, что реактор работал примерно 9 лет на уровне 2 МВт(тепл), 14 лет – при 4 МВт(тепл) и 8 лет – при 8 МВт(тепл). Длительность работы при трех заявленных уровнях мощности соответствует информации, представленной в МАГАТЭ.

В табл.1 суммированы оценки МТПП –максимальных темпов производства плутония (содержащегося в облученном топливе ИРТ), то есть, производство ПОМ за год работы на основе сведений о заявленном уровне мощности реактора и заявленной скважности (0.22), а также указаны сроки, необходимые для получения 8 кг ПОМ. Например, при уровне мощности 8 МВт(тепл) МТПП равен 0.23 кг/год и потребуется 34.8 года для получения 8 кг ПОМ.

Табл.1: Оценки максимального содержания плутония в облученном топливе при заявленном уровне мощности и скважности 0.22.

В столбце А указан заявленный уровень мощности (МВт); в столбце Б – оценка максимальных темпов производства плутония – МТПП (кг/год); в столбце В – количество лет, требуемое для производства 8 кг ПОМ (плутония, содержащегося в облученном материале).

А	Б	В
2	0.06	133.3
4	0.11	72.7
8	0.23	34.8

Общее максимальное производство ПОМ отражает полное количество плутония, которое можно иметь в облученном материале, с учетом сроков работы ИРТ-КНДР на трех заявленных уровнях мощности с августа 1965 г. по август 1996 г. Есть две возможные комбинации работы ИРТ-КНДР при заявленных уровнях мощности: или с гарантиями, начавшимися с августа 1977 г., или без гарантий. Поскольку ИРТ – это маломощный реактор согласно критериям МАГАТЭ по гарантиям²², которые не требуются анализов реакторов с тепловой мощностью не выше 25 МВт^{7,22}, не очевидно, стали ли гарантии на ИРТ адекватными после их ввода в 1977 г.

Заявленный рабочий уровень мощности – без гарантий

В первых двух столбцах табл.2 приведены заявленная мощность и количество лет работы при этой мощности. Третий столбец – это суммарное количество ПОМ (кг) в предположении, что за весь период работы ИРТ-КНДР гарантии не были введены. Приведенные значения ПОМ предполагают *неограниченное* производство плутония в облучаемом материале при заявленном уровне мощности. Реактор ИРТ-КНДР мог бы произвести 3.8 кг ПОМ за весь период работы (31 год) при скважности 0.22.

Заявленный рабочий уровень мощности и продолжительность гарантий

Последние два столбца табл.2 суммируют количество лет фактической работы ИРТ-КНДР на конкретном уровне мощности без введения гарантий и итоговое количество ПОМ (12 лет без гарантий и 19 лет с гарантиями). В этих столбцах использованы заявленные уровни мощности и предполагается, что гарантии введены с августа 1977 г. Приведенные значения ПОМ предполагают *ограниченные* возможности производства плутония после ввода гарантий. В лучшем случае, ИРТ-КНДР мог произвести 0.8 кг ПОМ за эти 12 лет, если считать, что он работал при 2 МВт(тепл) в течение 9 лет со скважностью 0.22.

Табл.2: Общее максимальное содержание плутония в облученном материале при заявленном уровне мощности и скважности 0.22 без гарантий в течение всего периода работы и с учетом длительности гарантий для ИРТ-КНДР.

В столбце А приводится заявленный уровень мощности в МВт(тепл); в столбце Б - количество лет работы (до августа 1996 г.); в столбце В – полное количество ПОМ без гарантий (кг); в столбце Г – количество лет работы без гарантий и в столбце Д- полное количество ПОМ с гарантиями (кг).

А	Б	В	Г	Д
2	9.0	.5	9.0	0.5
4	14.0	1.5	3.0	0.3
6	8.0	1.8	0.0	0.0
Итого	31.0	3.8	12.0	0.8

Оценки производства плутония при повышенной мощности

Удаление избыточного тепла является основным фактором при выборе конструкции реактора. Следовательно, основным тепловым критерием для реактора данного типа является требование предотвратить появление очагов закипания в топливе, что рассматривается как режим безопасной работы. Предотвращение закипания требует, чтобы поверхностная температура топлива не превышала температуру насыщения в среднем более, чем на 10 °С. Уровень мощности, при котором данный тип реактора может работать при скоррелированной тепловой нагрузке ограничен этим тепловым принципом. Достаточное рассеивание избыточного тепла поддерживает температуру поверхности топлива слегка выше температуры насыщения при максимальном потоке нейтронов, соответствующем уровню мощности. Такие реакторы были спроектированы и управлялись так, чтобы не переступать тепловой критерий безопасности. Работа может идти при появлении очагов закипания, но этого порога нельзя превосходить. Таким образом, заявленный рабочий уровень мощности часто лежит значительно ниже того, что позволено максимальной скоростью рассеяния тепла. Это приводит к фундаментальной проблеме с точки зрения перспектив нераспространения : конкретный порог относится только к *заявленной* рабочей мощности, а не к допустимому *избыточному* максимальному уровню мощности. С небольшими инженерными исправлениями (или даже без них) можно работать при повышении мощности реактора до 50% свыше номинального значения, поскольку, как правило, с тепловой точки зрения конструкции реакторов достаточно консервативны. В число переменных, которые можно использовать для влияния на уровень мощности, входят скорость протекания охладителя, мощность вторичной охлаждающей системы, температура первичного охладителя, материал мишени и давление в реакторе. Уменьшение температуры первичного охладителя на входе в контур, увеличение площади теплообмена материала мишени, увеличение скорости протока охладителя или увеличение мощности вторичного контура охлаждения позволяют увеличить уровень мощности реактора из-за более высокой диссипации тепла. Повышение давления в реакторе увеличивает температуру насыщения материала мишени (для реакторов бассейнового типа с замкнутым первичным контуром охлаждения), что позволяет увеличить уровень мощности. Сообщаемый МАГАТЭ уровень относится только к *заявленной* рабочей мощности реактора.

Было оценено производство плутония при использовании повышенных (на 50% по сравнению с заявленными) уровней мощности. Соответствующие этому уровни мощности составляют 3, 6 и 12 МВт(тепл). В табл.3 дана сводка избыточного МТПП в реакторе за один год, вычисленного на основе уровня мощности реактора при скважности 0.22, и времени, требуемого для получения 8 кг ПОМ. Например, при повышенном уровне 12 МВт (тепл), что на 50% выше заявленного уровня 8 Мвт, МТПП составляет 0.34 кг/год и потребуются 23.5 года для получения 8 кг плутония в облученном топливе.

Табл.3: Оцениваемое максимальное содержание плутония в облученном топливе при повышенном уровне мощности и заявленной скважности 0.22 для ИРТ-КНДР. Повышенная мощность на 50% превосходит заявленную.

В столбце А приведен повышенный уровень мощности в МВт(тепл); в столбце Б – оцениваемый максимальный темп производство плутония МТПП (кг/год); в столбце В – количество лет, требуемое для производства 8 кг ПОМ - плутония, содержащегося в облученном материале.

А	Б	В
3	0.08	100.0
6	0.17	47.1
12	0.34	23.5

Работа при повышенной мощности – без гарантий

Первые два столбца в табл.4 показывают повышенный рабочий уровень мощности и сроки работы при такой мощности. Величины максимального производства плутония в третьем столбце предполагают отсутствие гарантий за весь период работы ИРТ-КНДР. Эти значения соответствуют *неограниченным* возможностям производства плутония. Такое допущение привело бы к тому, что ИРТ произвел менее 6 кг ПОМ. Если бы ИРТ-КНДР работал без гарантий 9 лет при уровне мощности 3 Мвт(тепл), 14 лет при 6 МВт(тепл) и оставшиеся 8 лет при 12 МВт(тепл) он смог бы всего произвести 5.8 кг ПОМ.

Повышенный рабочий уровень и продолжительность гарантий

В последних двух столбцах табл.4 подведены итоги возможных сроков работы ИРТ-КНДР на повышенном уровне без гарантий и реальных количествах ПОМ (без гарантий в течение 12 лет и с гарантиями в течение 19 лет). При составлении этих столбцов использовались повышенные рабочие уровни мощности и считалось, что гарантии вступили в действие с августа 1977 г. Это значение ОМПП предполагает *ограниченную* возможность производства плутония после введения гарантий. В самом оптимальном случае за 12 лет работы без гарантий ИРТ-КНДР смог бы произвести около 1.2 кг ПОМ, работая 9 лет при 3 МВт(тепл) и 3 года при 6 МВт(тепл).

Табл.4: Общее максимальное количество плутония в облученном материале при повышенном уровне мощности и заявленной скважности 0.22 без гарантий за полное время работы ИРТ-КНДР и с учетом сроков гарантий.

В столбце А приведен повышенный уровень мощности в МВт(тепл); в столбце Б - продолжительность работы в каждом режиме до августа 1996 г. ; в столбце В - значения ПОМ (кг) при повышенной мощности без гарантий; в столбце Г – реальное число лет работы без гарантий и в столбце Д – значения ПОМ (кг) с гарантиями.

А	Б	В	Г	Д
3	9.0	0.7	9.0	0.7
6	14.0	2.4	3.0	0.5
12	8.0	2.7	0.0	0.0
Итого	31.0	5.8	12.0	1.2

Потенциальное производство плутония в ИРТ-КНДР

Скважность реактора и повышение мощности с 2 до 4 МВт(тепл), а затем до 8 МВт(тепл) влияют на получение максимального количества плутония в ИРТ-КНДР. Поскольку за 31 год работы действительная скважность могла изменяться, в этом исследовании оценивалась степень производства в зависимости от сроков работы при заданной заявленной мощности и меняющихся значений скважности. В справочнике МАГАТЭ по исследовательским ядерным реакторам сообщается заявленный максимальный уровень рабочей мощности и коли-

чество МВт-дней за год работы для пяти реакторов ИРТ, аналогичных ИРТ-КНДР – эта информация подытожена в табл.5. Значения скважности для этих пяти реакторов ИРТ соответствуют реальному диапазону возможных скважностей 0.1-0.55.

Табл.5: Названия реакторов (по справочнику МАГАТЭ), заявленная мощность, заявленная степень использования и подсчитанная скважность для реакторов типа ИРТ, аналогичных реактору ИРТ-КНДР.

В столбце А указано название реактора в соответствии с документами МАГАТЭ; в столбце Б – заявленный уровень мощности (МВт); в столбце В – заявленная степень использования (МВт-день/год) и в столбце Г – скважность (%).

А	Б	В	Г
ИРТ-КНДР	8	640	.22
ИРТ-М Тбилиси	8	400	.14
ИРТ-5000 (Ирак)	5	480	.26
ИРТ-8 Москва	8	800	.27
ИРТ-С Рига	5	585	.32
ИРТ-М Минск	4	800	.55
Среднее без КНДР	6		.31
Среднее с КНДР	6.3		.29

На рис.1 показано потенциальное общее значение ПОМ, которое можно было бы иметь в облученном топливе, если считать, что ИРТ-КНДР работал при заявленном уровне мощности 2 МВт(тепл) в течение 9 лет, при 4 МВт(тепл) в течение 14 лет и затем при 8 МВт(тепл) в течение оставшихся восьми лет со скважностью, меняющейся в диапазоне 0.1-0.55. Значение ПОМ при заявленных уровнях мощности и при скважности 0.22 слегка меньше 4 кг. *Верхний* предел ПОМ 9.7 кг соответствует скважности 0.55.

На рис.2 показано потенциальное общее значение ПОМ, которое можно было бы иметь в облученном топливе, если считать, что реактор работал при повышенных уровнях мощности: 9 лет при 3 МВт(тепл), 14 лет при 6 МВт(тепл) и 8 лет при 12 МВт(тепл). Значение ПОМ при повышенных уровнях мощности со скважностью 0.22 составляет около 5.8 кг. *Верхний* предел ПОМ 14.6 кг соответствует скважности 0.55.

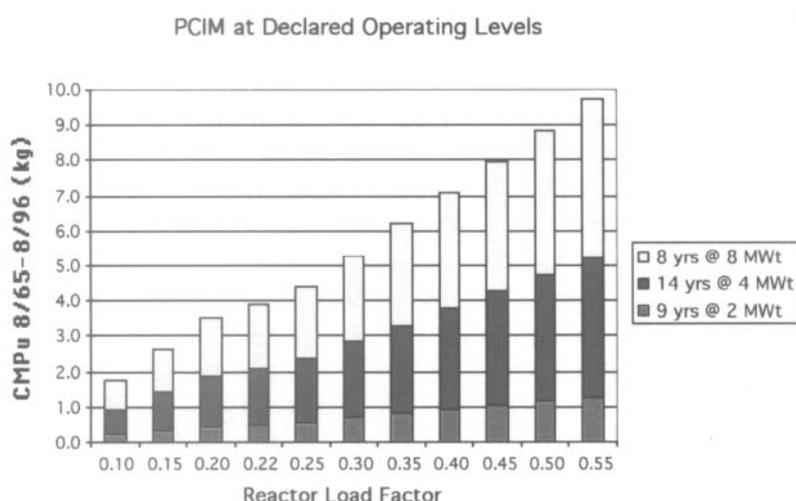


Рис.1: Общее максимальное производство ПОМ при заявленных уровнях мощности в предположении, что реактор имел скважность в диапазоне 0.1-0.55 (включая 0.22) в течение всего срока в 31 год.

По оси абсцисс отложена скважность, по оси ординат – полное значение ПОМ с августа 1965 г. по август 1996 г. (кг). Нижняя часть каждого столбца соответствует первому периоду работы реактора (9 лет при 2 МВт), средняя – второму (14 лет при 4 МВт) и верхняя – последнему (8 лет при 8 МВт).

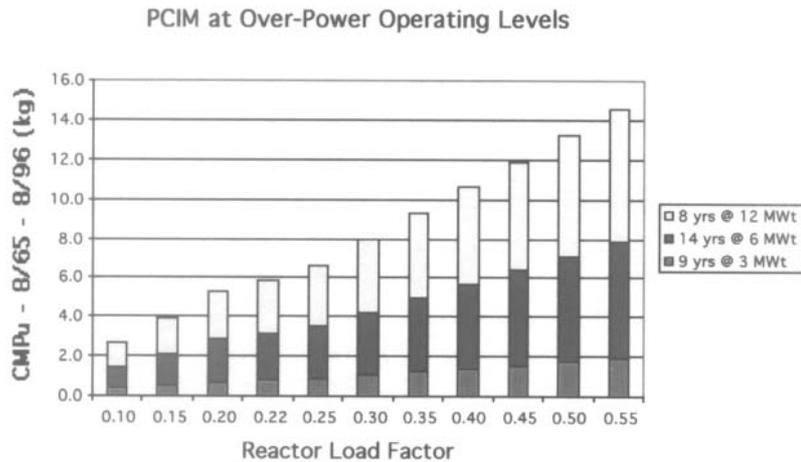


Рис.2: Общее максимальное производство ПОМ при повышенных уровнях мощности в предположении, что реактор имел скважность в диапазоне 0.1-0.55 (включая 0.22) в течение всего срока в 31 год.

Обозначения те же, что на рис.1.

На рис.3 показаны сценарии производства при разных значениях скважности. Первый предполагает работу при заявленном уровне мощности. Второй предполагает работу на повышенных уровнях мощности до введения гарантий в августе 1977 г., а затем работу на заявленных уровнях в течении оставшихся 19 лет. Третий предполагает работу на повышенных уровнях мощности в течении всего срока в 31 год. Потенциальное общее значение ПОМ получено при работе ИРТ-КНДР в смешанном режиме: 9 лет при 3 МВт(тепл), 3 года при 6 МВт(тепл), 11 лет при 4 МВт(тепл) и затем оставшиеся 8 лет при 8 МВт(тепл). Значение ПОМ при скважности 0.22 составляет около 4.3 кг. *Верхний* предел ПОМ 10.8 кг соответствует скважности 0.55.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

КНДР могла не иметь технической возможности и желания применить ИРТ-КНДР для производства плутония с 1965 г.; действительно, реактор мог не использоваться для такой цели в течение всего периода его работы. Но КНДР выделила плутоний в 1975 г., имела источник из размножающего материала и обладала иной требуемой технической инфраструктурой. Поэтому необходимо понять, что могло быть произведено в исследовательском реакторе ИРТ-КНДР в добавление к тому, что могло быть произведено (или было произведено) в энергетическом реакторе на 5 МВт(э). Повторим еще раз, эти подсчеты представляют из себя оценки максимального количества ПОМ (полученного в материале мишени) в предположении, что КНДР имела достаточно топлива и материала мишени и что потенциальные темпы производства плутония составляют 0.3-0.4 г/МВт(тепл)-день.

Разумный верхний предел полного производства ПОМ, который потенциально достижим в ИРТ-КНДР, можно оценить при использовании значения скважности 0.55 и в предположении, что реактор работает на заявленной мощности, а скважность, полученная на ИРТ-Минск, может быть достигнута и на ИРТ-КНДР. Этот маловероятно, поскольку требует последовательной работы ИРТ-КНДР при такой скважности в течение всего срока в 31 год. Возможно, хотя и маловероятно, что ИРТ-КНДР смог бы произвести около 5.8 кг ПОМ в течение предполагаемых рабочих сроков, работая на повышенной мощности со скважностью 0.22. Для этого надо было бы работать при повышенной мощности полностью 31 год. Если быть более реалистичным, то *не более* 4 кг ПОМ можно было бы получить в ИРТ-КНДР при работе на заявленных уровнях мощности и при заявленной скважности.

От эффективности работы ИРТ-КНДР значительно зависит количество произведенного плутония – это было изучено путем рассмотрения разных значений скважности. Эффективность гарантий за то время, когда реактор работал в режиме гарантий, также влияет на ко-

личество плутония, которое можно было произвести. ИРТ-КНДР не находился под гарантиями с 1965 г. по 1977 г. и только затем попал под надзор МАГАТЭ. Поскольку критерии МАГАТЭ на гарантии до 1996 г. не были строгими для исследовательских реакторов с мощностью менее 25 МВт(тепл), может оказаться возможным, что гарантии на ИРТ-КНДР были недостаточными в период с 1977 г. до 1996 г. с точки зрения работы в режиме повышенной мощности. Неясно, работал ли ИРТ-КНДР когда-нибудь в таком режиме. Впрочем, если ИРТ-КНДР работал на повышенной мощности, могло быть произведено до 14.6 кг плутония (в составе облученного топлива).

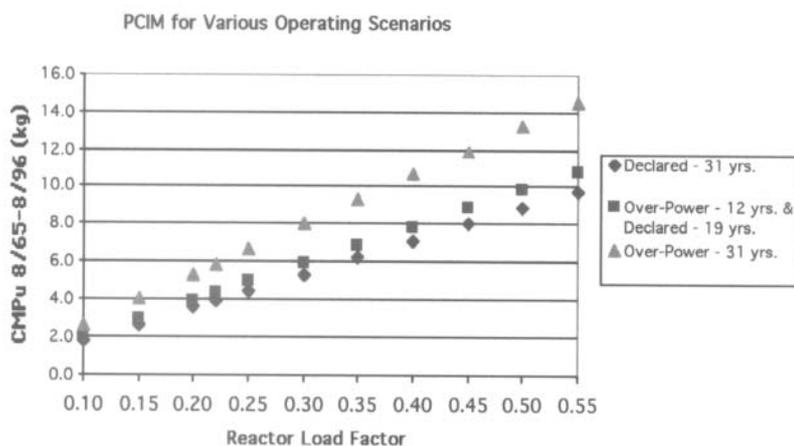


Рис.3: Сценарии производства при заявленных, смешанных и повышенных уровнях мощности в предположении, что реактор имел скважность в диапазоне 0.1-0.5 в течение всего срока в 31 год.

По осям координат отложены те же переменные, что и на рис.1. Ромбики соответствуют заявленной мощности в течение всего срока в 31 год, квадратики – повышенной мощности за 12 лет и заявленной за 19 лет, треугольники – повышенной мощности за весь срок в 31 год.

Для получения лучших количественных оценок полного потенциального производства плутония в Северной Корее необходимо объединить оценки производства плутония в исследовательском реакторе ИРТ-КНДР и в “энергетическом” реакторе на 5 МВт(э).

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. J.S.Dreicer, “Estimation of Feasible Unreported Plutonium Production in Thermal Research Reactors in the Potentially Nuclear Weapon States,” Los Alamos National Laboratory report LA-13209-MS (January 1997).
2. J.S.Dreicer, “How Much Plutonium Could An IRT Reactor Like North Korea’s Produce?”, *Nucl. Mater. Manage.* XXXI, (1997)/
3. J.S.Dreicer, “So How Much Plutonium Do The North Korean’s Really Have?”, Los Alamos National Laboratory report LA-UR-97-842 (1997).
4. D.Albright, “How much Plutonium Does North Korea Have?”, *Bulletin of the Atomic Scientists* (Sept/Oct. 1994):46-53.
5. Ibidum, p.53.
6. Ibidum, pp.50-51.
7. J.S.Dreicer and D.A.Rutherford, “Global Estimation of Potential Unreported Plutonium Production in Thermal Research Reactors,” *Nucl. Mater. Manage.* XXX,(1996): 1156-1160.
8. International Atomic Energy Agency, Directory of Nuclear Research Reactors, STI/PUB/853 (IAEA, Vienna, 1989),100.
9. M.Mazzar, *North Korea and The Bomb – A Case Study in Nonproliferation* (New York, New York: St. Martin’s Press, 1995), 25.
10. См. [4], p.52.

11. ACT editor, "North Korea at the Crossroads: Nuclear Renegade or Regional Partner?", *Arms Control Today*, 4, (May 1993).
12. D.Albright and M.Hibbs, "North Korea's Plutonium Puzzle," *Bulletin of the Atomic Scientists*, 39 (Nov. 1992).
13. См. [11].
14. D.Albright, "North Korea Drops Out", *Bulletin of the Atomic Scientists*, 10 (May 1993).
15. См. [12], p.52.
16. См. [12], p.47.
17. Америций-241 является продуктом распада плутония-241; его можно использовать для определения сроков выделения плутония.
18. T.F.Moriarty and V.N.Bragin, "Unreported Plutonium Production At Large Research Reactors," *Nucl. Mater. Manage.* XXIII (1994): 1173-1178.
19. Для оценки максимальной скорости производства плутония (кг/год) надо коэффициент 0.128 (кг/МВт-год) умножить на скважность и на рабочую мощность реактора (МВт). Всюду подразумевается тепловая мощность.
20. Частное сообщение, J.Mcneese, PNNL, July 25, 1997.
21. IAEA, Nuclear Research Reactors In the World, Reference Data Series #3, IAEA-RDS-3/7 (IAEA, Vienna, 1993), 93.
22. IAEA, Safeguards Criteria, 1990-11-21, (IAEA, Vienna, 1990).