

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ИЗОТОПНЫХ ОТНОШЕНИЙ ПРИМЕСЕЙ В ГРАФИТЕ ДЛЯ ПОДТВЕРЖДЕНИЯ ДЕКЛАРАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА ПЛУТОНИЯ В КНДР

Юнмин Канг

Метод изотопных отношений графита может дать точную оценку общего производства плутония в реакторе с графитовым замедлителем без подробной информации об эксплуатационной истории реактора. Трансмутация следов примесей в графите непосредственно относится к кумулятивному производству плутония в ядерном топливе. Это исследование объясняет, как можно оценить общее количество плутония, произведенного в реакторе с графитовым замедлителем в Ионгбене (с электрической мощностью пять мегаватт), используя технику метода изотопных отношений графита (МИОГ), если будут доступны несколько образцов из графитового замедлителя, взятых из стратегически расположенных мест.

Юнмин Канг работает независимым аналитиком по ядерным вопросам (МакЛин, штат Виргиния, США).

Статья получена редакцией 24 июня 2009 года и принята к опубликованию 11 марта 2011 года.

Автор желает поблагодарить Александра Глэзера и Зиа Миана из Принстонского университета за их очень полезные комментарии.

Почтовый адрес для корреспонденций: Jungmin Kang, 1350 Beverly Rd., Apt. 811, McLean, VA 22101, USA.

Электронный адрес: jungminkang64@gmail.com

ВВЕДЕНИЕ

26 июня 2008 года Корейская народно-демократическая республика (КНДР) представила Китаю декларацию о своей деятельности по производству плутония. Согласно Гленну Кесслеру из *Washington Post*, она заявила, что она обладает 37 килограммами плутония¹. Однако, согласно *Global Security Newswire*, КНДР заявила, что она извлекла 30,8 килограмма плутония из отработанного ядерного топлива, используя свое предприятие по переработке, и использовала 2 килограмма из этого количества в своем ядерном испытании в октябре 2006 года². В дополнение к противоречию в отношении количества выделенного плутония, у КНДР до апреля 2009 года имелся невыделенный плутоний в 8000 стержнях отработанного топлива в бассейне охлаждения в Ионгбене.

Метод изотопных отношений графита (МИОГ) может дать точную оценку общего производства плутония в реакторе с графитовым замедлителем без подробной информации об эксплуатационной истории реактора. Основная идея метода МИОГ состоит в том, что трансмутация следов примесей в графите непосредственно относится к кумулятивному производству плутония в ядерном топливе³.

Это исследование объясняет, как можно оценить общее количество плутония, произведенного в реакторе с графитовым замедлителем в Ионгбене с электрической мощностью пять мегаватт (в дальнейшем называемом реактором в 5 МВт-эл.), используя технику метода МИОГ.

МЕТОД ИЗОТОПНЫХ ОТНОШЕНИЙ ГРАФИТА

Метод МИОГ был первоначально предложен Стивом Феттером. В своей статье 1993 года в журнале *Science & Global Security* Феттер указал, что:

Небольшая часть нейтронов, образующихся в реакциях деления, будет поглощаться в замедлителе и стационарных элементах конструкции активной зоны реактора, обычно образуя радиоактивные ядра. Если у этих радиоактивных ядер будут большие периоды полураспада (значительно большие срока службы реактора), то будет происходить сравнительно небольшой радиоактивный распад, и концентрация таких ядер будет пропорциональна полному количеству нейтронов, прошедших через материал ("флюэнс" нейтронов). Таким образом, долгоживущие радионуклиды, образующиеся при поглощении нейтронов в естественно встречающихся ядрах в стационарных элементах конструкции активной зоны реактора предоставляют оценку флюэнса нейтронов в данной точке. Вместе с обоснованными предположениями о конструкции и эксплуатации реактора измерения образующихся под действием нейтронов в нескольких точках активной зоны могут быть использованы для оценки флюэнсов нейтронов и производства плутония⁴.

В начале 1990-х годов Тихоокеанская северо-

западная национальная лаборатория (PNNL) разработала концепцию метода МИОГ в практическом средстве верификации производства плутония для реакторов с графитовым замедлителем⁵. При испытании на реакторах для производства плутония в Хэнфорде было обнаружено, что метод МИОГ в самом деле предоставляет точную оценку производства плутония в реакторе с графитовым замедлителем за все время его эксплуатации.

Первый этап метода МИОГ заключается в определении подходящих элементов-индикаторов, которые присутствуют в графите в количествах, достаточных для проведения точных измерений. Согласно отчету PNNL, отношение B^{10}/B^{11} является прекрасным индикатором для реакторов с низким флюэнсом, а отношение Ti^{48}/Ti^{49} успешно использовалось для реакторов с высоким флюэнсом⁶. Это исследование направлено на использование отношения B^{10}/B^{11} . Бор-10 и бор-11 являются стабильными изотопами, соответственно составляющими 19,9 и 80,1 процента в природном боре.

Второй этап метода МИОГ состоит в заборе образцов облученного в реакторе графита и измерении отношения концентраций выбранных изотопов после облучения⁷. Для того, чтобы максимизировать точность оценки общего производства плутония, количество образцов и местоположения их забора должны быть оптимизированы. До тех пор, пока не будут доступны образцы графита из реактора в 5 МВт-эл., для демонстрации метода должны быть использованы расчетные отношения B^{10}/B^{11} для образцов графита.

Третий этап метода МИОГ заключается в оценке совокупного количества произведенного плутония по изотопным отношениям в топливе вблизи точек забора образцов. В этом исследовании для получения такой корреляции использовалась программа MCNPX[®] расчета переноса излучения на базе метода Монте-Карло, которая также выполняет расчет выработки ядерного топлива⁸.

На завершающем этапе с помощью метода регрессии производится оценка совокупного производства плутония во всей активной зоне на основании оцененных значений производства плутония вблизи точек забора образцов. Метод регрессии дает трехмерную карту, которая близко аппроксимирует значения локального совокупного производства плутония. В этом исследовании для проведения регрессионного анализа использовалась программа Wolfram Mathematica 7^{®9}.

РЕАКТОР В 5 МВТ-ЭЛ.

Характеристики активной зоны

Реактор в 5 МВт-эл. представляет собой реактор с графитовым замедлителем с топливом из металлического природного урана в оболочке из магниевого сплава "Магнокс"¹⁰. Топливные стержни помещены в каналы в графитовом замедлителе, и они охлаждаются углекислым газом, протекающим через каналы. В табл. 1 показаны характеристики реактора в 5 МВт-эл. Горизонтальное

поперечное сечение реактора показано на рис. 1.

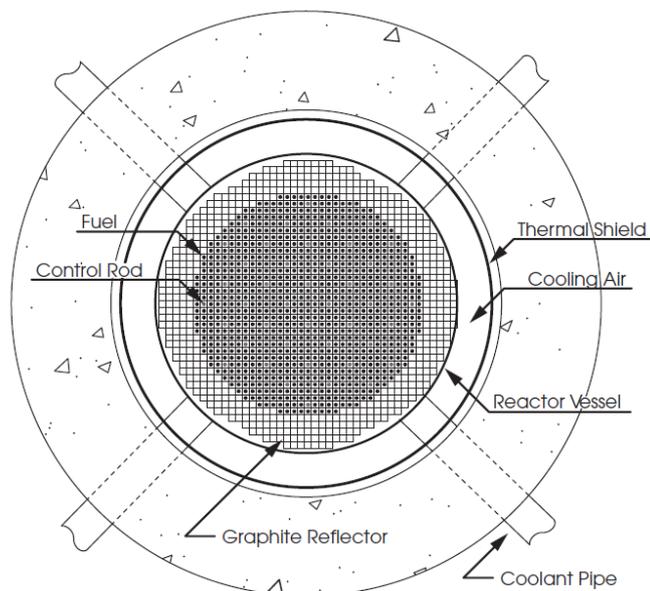


Рис. 1. Поперечное сечение реактора в 5 МВт-эл. Источник: KAERI. Надписи на рисунке (сверху вниз): 1 - топливо; 2 - тепловой экран; 3 - управляющий стержень; 4 - охлаждающий воздух; 5 - резервуар реактора; 6 - графитовый рефлектор; 7 - труба охлаждения.

Табл. 1. Оцениваемые физические характеристики реактора в 5 МВт-эл¹.

Тепловая мощность	25 МВт
Электрическая мощность	5 МВт
Удельная мощность	0,5 МВт/т
Загрузка урана	50 т
Графитовый замедлитель	300 т
Графитовый отражатель	300 т
Количество каналов	812 - 877
Количество топливных каналов	801
Количество каналов для управляющих стержней	44
Количество топливных стержней в канале	10
Расстояние между каналами	20 см
Радиус канала	6,50 см
Эффективный радиус активной зоны	643 см
Эффективная высота активной зоны	592 см
Верхний рефлектор	77,50 см
Нижний рефлектор	66,50 см
Состав топлива	U (0,5% Al)
Диаметр топливного элемента	2,90 см
Длина топливного элемента	52 см
Длина топливного стержня	60 см
Уран в топливном стержне	6,24 кг
Состав оболочки	Mg (1% Al)
Толщина оболочки	0,05 см

¹David Albright and Kevin O'Neill, eds., op. cit., 161.B.D. Murphy, "ORIGEN-ARP Cross-Section Libraries for Magnox, Advanced Gas-Cooled, and VVER Reactor Designs," Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-2003/263(2004). Частное сообщение KAERI, ноябрь 2008 года.

Эксплуатационная история

Реактор в 5 МВт-эл. работал с 1985 года до апреля 1994 года и с февраля 2003 года до июля 2007 года¹.

Реактор был выключен в 1994 году в соответствии с Рамочным соглашением между США и КНДР до разрыва соглашения в декабре 2002 года. КНДР возобновила работу реактора в феврале 2003 года и затем снова выключила его в середине июля 2007 года для его остановки в соответствии с соглашением шестисторонних переговоров от 13 февраля 2007 года. Реактор остановивался между апрелем и июнем 2005 года для выгрузки топ-

лива для переработки¹³. 14 апреля 2009 года после того, как Совет Безопасности ООН осудил испытание КНДР баллистической ракеты дальнего действия 5 апреля, КНДР объявила, что она возобновит эксплуатацию реактора в 5 МВт-эл.¹⁴ Однако, до весны 2011 года она так и не сделала этого.

Среднее выгорание облученного топлива в реакторе в 5 МВт-эл. в 1994 году оценивалось как 600 - 700 МВт-сутки/т¹⁵. Если топливо не выгружалось и не перерабатывалось, даже после дополнительных четырех лет работы на полной мощности между февралем 2003 года и июлем 2007 года его среднее выгорание составит примерно 1100 МВтсутки/т в предположении коэффициента использования в 70 процентов¹⁶. Такое выгорание предполагалось в последующих вычислениях.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗОТОПНЫХ ОТНОШЕНИЙ БОРА

Поскольку активная зона симметрична, будет достаточно забирать образцы в одном угловом секторе. Мы предполагаем, что графитовые образцы забираются в 200 местах в 1/4 активной зоны, как показано на рис. 2. Модельные отношения B^{10}/B^{11} в образцах графита прямо за алюминиевыми оболочками каналов приведены в табл. 2¹⁷.

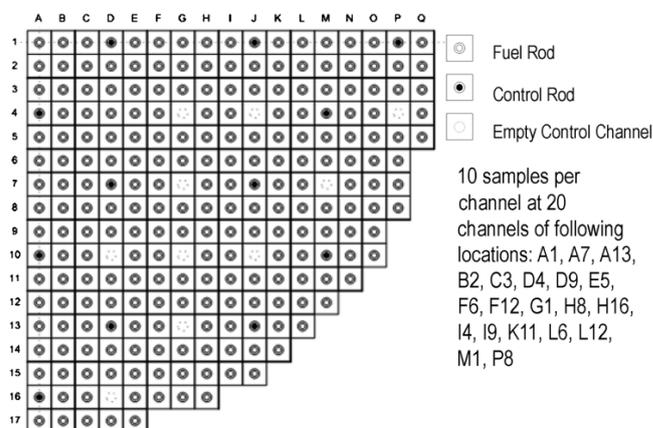


Рис. 2. Расположение 1/4 активной зоны реактора в 5 МВт-эл. и точек забора. Источник: KAERI. Надписи на рисунке (сверху вниз): 1 - топливный стержень; 2 - управляющий стержень; 3 - пустой канал для управляющего стержня; 4 - 10 образцов на канал в 20 каналах в следующих местоположениях.

Табл. 2. Модельные отношения графитовых образцов в расположении A1 на рис. 2.

Слой от дна графитового замедлителя	B^{10}/B^{11} (x 1000)
Слой 1 (0 - 60 см)	50,7
Слой 2 (0 - 60 см)	19,2
Слой 3 (0 - 60 см)	8,32
Слой 4 (0 - 60 см)	4,50
Слой 5 (0 - 60 см)	3,28
Слой 6 (0 - 60 см)	3,29
Слой 7 (0 - 60 см)	4,43
Слой 8 (0 - 60 см)	8,07
Слой 9 (0 - 60 см)	18,7
Слой 10 (540 - 600 см)	48,6

ЛОКАЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ СОВОКУПНОГО ПРОИЗВОДСТВА ПЛУТОНИЯ

На рис. 3 показано поперечное сечение модели трехмерной ячейки топлива, оболочки канала и графита, окружающего топливный канал, основанное на физических характеристиках, приведенных в табл. 1. Предполагаются граничные условия отражения нейтронов. Это эквивалентно предположению бесконечной активной зоны.

Используя геометрию модели стержня и ячейки, и спецификации материалов в табл. 1, была рассчитана зависимость отношения B^{10}/B^{11} от совокупного производства плутония на 1 см³ топлива, показанная на рис. 4.

С использованием результатов расчетов по программе MCNPX[®], показанных на рис. 4, модельные отношения B^{10}/B^{11} , которые предполагались взятыми для анализа в 200 точках в 1/4 активной зоны реактора в 5 МВт-эл., соотносятся с локальным производством плутония в топливных стержнях, прилегающих к точкам забора образцов¹⁸.

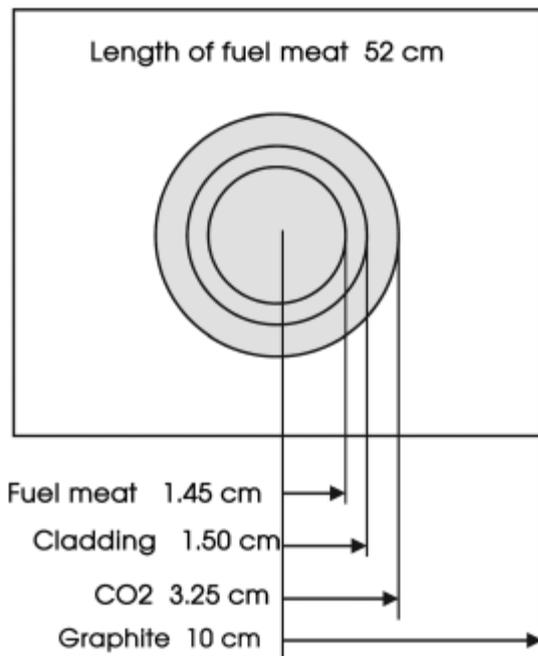


Рис. 3. Трехмерная модель ячейки и стержня топливного стержня реактора в 5 МВт-эл. (с отражательными граничными условиями). Надписи на рисунке (сверху вниз): 1 - длина топлива 52 см; 2 - радиус топлива 1,45 см; 3 - радиус оболочки 1,50 см; 4 - радиус CO₂ 3,25 см; 5 - размеры графита 10 см.

ОЦЕНКА ОБЩЕГО СОВОКУПНОГО ПРОИЗВОДСТВА ПЛУТОНИЯ

Локальные значения совокупного производства плутония используются для фиксирования параметров аппроксимирующей функции, которая зависит от вертикального и радиального положения в активной зоне для оценки общего совокупного производства плутония в активной зоне реактора в 5 МВт-эл. Метод регрессии реализуется в программе Mathematica 7[®] 19.

Полученная оценка, основанная на определенной в модели стержня корреляции, показанной на рис. 4, составляет 42,84 кг, что на 1,1 процента отличается от оценки в 42,39 кг, полученной в аналогичной независимой модели 1/4 активной зоны, который выдал модельные отношения изотопов бора для среднего выгорания топлива в 1100 МВт-сутки/т²⁰.

ВЫВОДЫ

Используя метод МИОГ, можно точно оценить совокупное производство плутония на графитовом реакторе КНДР с электрической мощностью 5 МВт без знания эксплуатационной истории, если будут доступны несколько образцов из графитового замедлителя, взятых из стратегически расположенных мест.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Glenn Kessler, "Message to U.S. Preceded Nuclear Declaration by North Korea," *The Washington Post*, 2 July 2008, A7. Декларация КНДР не включает информацию по ее деятельности в области ядерного оружия и обогащения урана.
2. Nuclear Threat Initiative (NTI), "North Korea Declares 31 Kilograms of Plutonium," *Global Security Newswire*, 24 October 2008; Согласно Селигу С. Харрисону, который посе-

тил Пхеньян в начале января 2009 года, КНДР заявило, что она выделила для производства ядерного оружия почти 31 килограмм плутония. Choe Sang-Hun, "North Korea Says It Has 'Weaponized' Plutonium," *New York Times*, 18 January 2009, A8.

3. C. J. Gesh, "A Graphite Isotope Ratio Method Primer—A Method for Estimating Plutonium Production in Graphite Moderated Reactors," PNNL-14568, Pacific Northwest National Laboratory (February 2004).

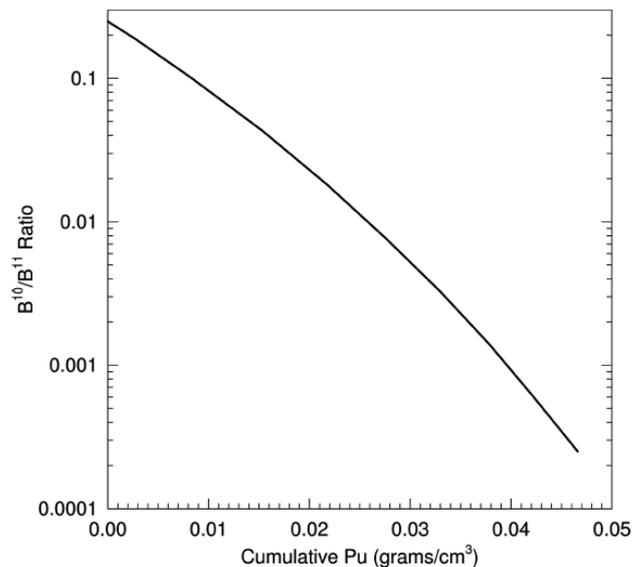


Рис. 4. Отношение B^{10}/B^{11} в зависимости от совокупного производства плутония (в г/см³) в трехмерной модели ячейки и стержня для топливного стержня реактора в 5 МВт-эл. По вертикальной оси отложено соотношение B^{10}/B^{11} , а по горизонтальной оси - совокупное производство плутония (в г/см³).

4. Steve Fetter, "Nuclear Archaeology: Verifying Declarations of Fissile-Material Production," *Science & Global Security* 3 (1993): 237–259.

5. Thomas W. Wood, Matthew D. Milazzo, Barbara A. Reichmuth, and Jeffrey Bedell, "Establishing Confident Accounting for Russian Weapons Plutonium," *The Non-proliferation Review* (Summer 2002): 126–137. B.D. Reid et al., "Graphite Isotope Ratio Method Development Report: Irradiation Test Demonstration of Uranium as a Low Fluence Indicator," PNNL-13056, Pacific Northwest National Laboratory (September 1999).

6. См. ссылку [3].

7. Графитовые образцы диаметром примерно 1 см и длиной 2 см могут быть извлечены из любого места в активной зоне с помощью коммерчески доступных автоматических машин для забора образцов в графитовых реакторах. Для измерения ключевых изотопных отношений в образцах используются измерительные методы масс-спектрометрии. Для анализа изотопных соотношений бора применяется масс-спектрометрия с вторичной ионизацией, а для анализа отношений для титана, урана и плутония используется масс-спектрометрия с тепловой ионизацией. См. ссылку [3].

8. MCNPX[®] (расширенный MCNP) представляет собой компьютерную программу переноса излучения на базе метода Монте-Карло, которая рассчитывает перенос почти всех частиц с почти всеми энергиями и выполняет расчет выработки ядерного топлива. John S. Hendricks et al., "MCNPX[®] 2.6.0 Extensions," Los Alamos National Laboratory, LA-UR-08-2216 (April 2008).

9. Wolfram Mathematica 7[®] <<http://www.wolfram.com/products/mathematica/index.html>>.

10. Предполагается, что модель реактора с электрической мощностью в 5 МВт был британский реактор Колдер Холл с электрической мощностью 50 МВт. David Albright and Kevin O'Neill, eds., *Solving the North Korean Nuclear Puzzle* (Washington, DC: The Institute for Science and International Security, 2000), p. 146.

11. Частное сообщение Корейского исследовательского института по атомной энергии (KAERI), ноябрь 2008 г.
12. См. ссылку [10], стр. 119.
13. Дополнительную информацию по Ядерному научно-исследовательскому центру в Йонгбене смотрите, например, на сайте <[http://en.wikipedia.org/wiki/Yongbyon Nuclear Scientific Research Center](http://en.wikipedia.org/wiki/Yongbyon_Nuclear_Scientific_Research_Center)>.
14. КНДР объявило, что она восстанавливает предприятие по производству ядерного топлива и предприятие по его переработке. "Timeline of North Korea's Nuclear, Missile Programs," *Fox News*, 25 April 2009 <http://www.foxnews.com/story/0,2933,517880,00.html>.
15. См. ссылку [10], стр. 118.
16. Совокупное среднее выгорание в активной зоне реактора с электрической мощностью 5 МВт между февралем 2003 года и апрелем 2005 года, и между июнем 2005 года и серединой июля 2007 года соответственно равнялось примерно 220 МВт-сутки/т и 210 МВт-сутки/т, в предположении тепловой мощности в 20 МВт и коэффициента использования в 70 процентов.
17. На базе модели 1/4 активной зоны реактора с электрической мощностью 5 МВт, содержащей отработанное топливо со средним выгоранием 1100 МВт-сутки/т, экспертом из KAERI с использованием трехмерной программы Монте-Карло для расчета выгорания, разработанной Сеульским национальным университетом и KAERI, были рассчитаны модельные отношения B^{10}/B^{11} в образцах графита. Частное сообщение KAERI, июнь 2009 года.
18. Для расчета ожидаемого совокупного производства плутония (в г/см³) для любого заданного значения B^{10}/B^{11} использовалось следующее уравнение для аппроксимации кривой на рис. 4 (с использованием Wolfram Mathematica 7[®]): $= -13,2 - 23,3x - 1,87x^2$, где $x = \log(B^{10}/B^{11})$.
19. Wolfram Mathematica 7[®]. Функциональная форма аппроксимирующей функции в этом исследовании такова: $F(x, y, z) = 0,0307848 - 1,74155 \cdot 10^{-7}x^2 - 1,75037 \cdot 10^{-7}y^2 - 5,13598 \cdot 10^{-7}z - 1,83897 \cdot 10^{-7}z^2$.
20. Частное сообщение KAERI, июнь 2009 года.