

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРЕКРАЩЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫСОКООБОГАЩЕННОГО УРАНА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МЕДИЦИНСКИХ РАДИОИЗОТОПОВ

Фрэнк фон Хиппель и Лаура Кан

Значительные количества высокообогащенного урана (ВОУ), превышающие то, что нужно для создания бомбы хиросимского типа, ежегодно применяются в качестве мишеней для нейтронов в канадских, европейских и южноафриканских реакторах для получения короткоживущих продуктов деления, которые применяются в ядерной медицине. Наиболее важный из продуктов деления - это молибден-99, который распадается в технеций-99, являющийся наиболее распространенным медицинским изотопом.

Соединенные Штаты поставляют уран оружейного качества канадскому производителю радиоизотопов и могли бы в будущем обеспечить им и европейских производителей. В качестве условия получения американского ВОУ поправка Шумера 1992 года к Закону об атомной энергии США требует от иностранного производителя сотрудничества с США при переходе на мишени из низкообогащенного урана (НОУ). Некоторые из не самых крупных производителей уже сделали это. Но канадский производитель заявил, что стоимость конверсии окажется слишком высокой. По этой причине поправка Бура в 2005 году освободила производителей радиоизотопов из Канады и Европы от распространения на них поправки Шумера, но потребовала, чтобы Национальная академия наук изучила возможность конверсии при условии, что стоимость производства не вырастет более, чем на 10%.

Мы покажем, что затраты на конверсию крупнейшей европейской производственной установки увеличат стоимость производства молибдена-99 всего на несколько процентов. Для канадской установки стоимость может вырасти больше, чем на 10%, но цена конечного продукта, содержащего технеций-99, вырастет только на 1%. Отмечается также, что экономия на безопасности также может уменьшить затраты при переходе к НОУ, если ВОУ больше не будет присутствовать на производственной площадке и на площадке для радиоактивных отходов.

Авторы участвуют в Программе по науке и всеобщей безопасности в Принстонском университете, Принстон, Нью Джерси, США.

Почтовый адрес для связи: Frank N. von Hippel, Program on Science and Global Security, Princeton University, 221 Nassau Street, 2nd Floor, Princeton, NJ 08542, USA.

Электронный адрес: fvhippel@princeton.edu

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее важным ядерным материалом, который надо убирать от потенциальных ядерных террористов, является высокообогащенный уран (ВОУ). Если террористы приобретут около 50 кг ВОУ (с содержанием урана-235 не менее 90%), это может привести к ядерному взрыву в результате создания простого устройства ствольного типа, где две подкритические массы соединяются в сверхкритическую. Таким было устройство хиросимской бомбы. Его нельзя использовать для плутония из-за высокого уровня спонтанного нейтронного излучения, которое приводит к началу цепной реакции еще до момента полного формирования сверхкритической массы. В результате мощность взрыва плутониевой бомбы ствольного типа уменьшится в тысячи раз.

В 70-х годах, понимая опасность ядерного распространения и терроризма, связанных с мирным использованием ВОУ, правительства США и СССР начали проводить программу, облегчающую замену ВОУ на неоружейный уран с меньшим обогащением (НОУ), содержащий менее 20% урана-235, в топливе для гражданских исследовательских реакторах и в мишенях для производства радиоизотопов. Эта программа носит теперь международный ха-

рактёр¹. Ее прогресс и ограничения в отношении конверсии топлива для гражданских реакторов широко обсуждались². В нашей статье обсуждаются вопросы, относящиеся к использованию ВОУ для получения медицинских радиоизотопов.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОУ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МЕДИЦИНСКИХ РАДИОИЗОТОПОВ

«Мишени» из ВОУ, помещенные в интенсивные потоки нейтронов вблизи активной зоны мощных исследовательских реакторов, являются основными источниками при получении ряда короткоживущих продуктов деления, ставших важными для современной медицины. В этой статье мы уделяем особое внимание технецию-99, который в настоящее время используется примерно в 80% диагностических процедур ядерной медицины во всем мире³.

Технеций-99 имеет период полураспада 6 часов и испускает гамма-лучи при снятии возбуждения. Если соединять его с различными химикатами, то за ним можно следить по гамма-излучению, проникающему через тело. Поэтому его можно использовать для изучения работы различных органов. Короткое время жизни и отсутствие бета-частиц сводят к минимуму ненужные дозы облучения. Он получается из молибдена-99, обладающего периодом полураспада 2.7 дня и распадающегося в технеций-99. Молибден-99 адсорбируется на поверхности подстилки, содержащей немного алюминиевых частиц, откуда продукт распада (технеций-99) выводится в раствор.

Молибден-99 образуется в 6% всех делений в уране-235⁴. Значительная часть (95%) всего запаса производится при помещении «мишени» ВОУ (обычно оружейного качества) в активную зону реактора или рядом с ней⁵. По очень грубой оценке, 85 кг ВОУ используются для этой цели ежегодно в Канаде, Европе и Южной Африке⁶. Потребляется менее 5% урана-235 из мишени и во многих случаях материал не перерабатывается. Поэтому поступивший в отходы ВОУ еще применим для создания оружия и накопился в странах, изготовляющих молибден-99, в таких количествах, из которых можно изготовить много бомб хиросимского типа⁷. Доза гамма-излучения от отходов ВОУ недостаточна для самозащиты согласно международным стандартам⁸.

Основные реакторы, производящие молибден-99, сейчас расположены в Канаде (прода-

¹ Информацию об исследованиях уменьшенного обогащения и программе испытательных реакторов можно найти на сайте <http://www.rertr.anl.gov>.

² «Всеобщий подход к устранению высокообогащенного урана из топливных циклов всех ядерных реакторов», Фрэнк фон Хиппель, *Наука и всеобщая безопасность*, т.12, вып.3 (2004), и “Global Cleanout: Reducing the Threat of HEU-Fueled Nuclear Terrorism,” Alexander Glaser and Frank von Hippel, *Arms Control Today* (January/February 2006), 1-18.

³ “Production of Mo-99 in Europe: Status and perspectives,” H. Bonet, B. David, and B. Ponsard, 9th *International Topical Meeting in Research Reactor Fuel Management, Budapest, Hungary, April 10-13, 2005* (<http://www.euronuclear.org/pdf/RRFM2005-Session1.pdf>). Другие продукты деления, используемые в медицине: иод-131 (период полураспада 8.0 дней), ксенон-130 (5.2 дня) и стронций-80 (50.5 дней), “Nuclear Medicine Facility Survey, SNM: Survey Reporting on 2002 Cost and Utilization” by Denise Merlino, *Journal of Nuclear Medicine Technology*, 32(4), (December 2004): 215.

⁴ Основная часть Mo-99 образуется при распаде короткоживущих продуктов деления: иттербия-99 (период полураспада 1.47 с) и циркония-99 (2.2 с). *Evaluation and Compilation of Fission Product Yields 1993*, T. R. England and B. F. Rider, Los Alamos National Laboratory, LA-UR-94-3106, ENDF-349 (1994), <http://ie.lbl.gov/fission.html>.

⁵ Смотрите ссылку [3]: “Production of Mo-99 in Europe.....”

⁶ *RERTR program project execution plan*, U.S. Department of Energy, National Nuclear Safety Administration, February 16, 2004, Table B5.

⁷ Переработка ВОУ (включая конверсию в НОУ) серьезно изучалась в Радиохимическом центре компании Mallinckrodt (Петтен, Голландия) в 2000 году, “Production of fission Mo-99 from LEU uranium silicide target materials” by A. A. Sameh, Radiochemical Center Mallinckrodt Medical, presented at *2000 Symposium on Isotope and Radiation Application*, May18-20, Institute of Nuclear Energy Research, Taiwan.

⁸ Стандарт МАГАТЭ на самозащиту равен одному зиверту/час на расстоянии один метр. *The physical protection of material and nuclear facilities*, International Atomic Energy Agency, INFCIRC/225/Rev.4. Пять зивертов – это средняя смертельная доза. Канистры, содержащие отходы ВОУ, отправляются с установки в Петтене в голландское хранилище отходов через два года после облучения мишени. В каждой партии содержится 0.4 кг ВОУ. Доза излучения от незащищенной партии составляет 0.1 Зв/час на расстоянии один метр, частное сообщение, Fred Wijtsma, Director, High-Flux Reactor, Petten, Netherlands, June 1, 2006.

вещ молибдена-99 – фирма MDS-Nordion), в Европе (Тусо-Healthcare / Mallinckrodt в Голландии и Институт радиоэлементов – IRE в Бельгии), а также в Южной Африке (NTP) (смотрите Табл.1). США потребляют примерно половину полного производства⁹, но сейчас не изготавливают молибден-99.

ПОПЫТКИ США УСТРАНИТЬ МИШЕНИ ИЗ ВОУ И ПРОТИВОДЕЙСТВИЕ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

США и Россия – крупнейшие международные поставщики ВОУ для использования в качестве топлива исследовательских реакторов и мишеней для производства изотопов. В 1992 году была добавлена поправка Шумера к Закону США по атомной энергии, чтобы побудить иностранных потребителей американского ВОУ перейти на НОУ.

Одно из требований поправки Шумера заключается в том, что в качестве условия для поставок американского ВОУ на иностранные реакторы, управляющие этими реакторами должны взять на себя обязательство, «что, как только станет возможным применить в данном реакторе альтернативное ядерное топливо (НОУ), такая альтернатива будет использована»¹⁰.

Табл. 1. Реакторы, производившие Мо-99 для крупных международных продавцов в 2005 году¹¹.

Реактор/Страна	Мощность (МВт)	Начало работы (дата закрытия)	Процент работы в течение года	Продавец изотопа	Средняя/пиковая доля продукции (в % от мирового спроса)
NRU/Канада	135	1957	86	MDS-Nordion	40/80
HFR/Голландия	45	1961	79	Mallinckrodt	20/30
BR2/Бельгия	100	1961	31	IRE	10/20
				Mallinckrodt	5/15
Осирис /Франция	70	1964	60	IRE	4/20
				IRE	3/20
FRJ-2/Германия	23	1962 (2006)	57	IRE	3/10
САФАРИ/Южная Африка	20	1965	86	NTP	10/45
Прочие				Прочие	5/10
				Всего	100/250

Небольшие производители Мо-99 в Аргентине и Австралии теперь пользуются мишенями из НОУ, а производитель из Индонезии переходит на такие мишени¹². Но основные производители сопротивлялись конверсии¹³.

Только одна из четырех крупных компаний, поставляющих Мо-99, в настоящее время импортирует американский ВОУ для мишеней – это канадская MDS-Nordion, на долю которой приходится около 40% всеобщего производства Мо-99¹⁴. Она ввозит около 20 кг урана

⁹ Marvin Burns, Bio-Tech Systems Inc, частное сообщение, декабрь 2005 г.

¹⁰ Atomic Energy Act (42 U.S.C. 21 et seq) Chapter 11, Section 134. Другие требования, установленные поправкой Шумера, заключаются в том, что сторона, владеющая реактором, может затребовать ВОУ, только если НОУ-топливо или подходящая мишень отсутствуют или если они находятся в разработке.

¹¹ Смотрите ссылку [5]. Сроки начала работ приведены в *Nuclear Research Reactors in the World* (IAEA, 2000).

¹² "Facts and myths concerning Mo-99 production with HEU and LEU targets," G. F. Vandergriff, Argonne National Laboratory, *Proceedings of the International Conference on Reduced Enrichment and Test Reactors*, Boston, MA, Nov. 7-10, 2005.

¹³ Смотрите, например, *DOE Needs to Take Action to Further Reduce the Use of Weapons-Usable Uranium in Civilian Research Reactors*, U.S. Government Accountability Office Report GAO-04-807(2004), 2.

¹⁴ Смотрите ссылку [5].

оружейного качества из США в год¹⁵. Европейские производители сейчас пользуются ураном оружейного качества, который приобретен ими от других ядерных стран (Франция, Россия или Англия) или экспортировался американцами до введения поправки Шумера¹⁶. ЮАР пользуется ВОУ, который был произведен еще до 1991 года.

В 2005 году лоббистская кампания, финансируемая компаниями NDS-Nordion и Mallinckrodt, привела к поправке Барра в Закон 2005 года о национальной энергетической политике. Эта поправка освободила мишени из ВОУ, используемые производителями медицинских радиоизотопов в Канаде, Бельгии, Франции, Германии и Голландии, от требований поправки Шумера¹⁷. Некоторые группы американских врачей поддержали такое снятие требований, поскольку они были убеждены, что усиление поправки Шумера принесет опасность для снабжения Соединенных Штатов радиационной фармацевтикой¹⁸. Как мы увидим позже, это оказывается вопросом будущей адекватности всемирного производства Мо-99, но только благодаря старению производственных реакторов, а не потенциальному воздействию от перевода мишеней с ВОУ на НОУ.

Те, кто поддерживал поправку Шумера, не смогли остановить поправку Барра, но смогли внести в нее требование на исследование Национальной академией наук вопроса о «возможности обеспечения поставок медицинских изотопов коммерческими источниками, не использующими ВОУ»¹⁷. Определение термина «возможность» включает в себя «среднее ожидаемое возрастание полных затрат от производства медицинских изотопов не более чем на 10%».

В 2004 году средняя цена количества Мо-99, из которого получалась доза технеция-99, составляла около 7.5 долларов¹⁹. Больницы платили в 2002 году за радиационную фармацевтику, содержащую дозу технеция-99, в среднем 87 долларов²⁰. Поэтому, если использовать 10%-ный критерий для стоимости производства этого изотопа, это будет соответствовать требованию, чтобы цена радиационной фармацевтики не выросла более чем на 1%.

СРАВНЕНИЕ МЕЖДУ ПРОЦЕССАМИ ПРОИЗВОДСТВА МО-99 НА ОСНОВЕ ВОУ И НОУ

Похоже, что нет значительных технических вопросов или проблем безопасности, чтобы не мишени из ВОУ на НОУ-мишени. Д-р Вандергрифт из Аргоннской национальной лаборатории, обеспечивший техническую помощь при замене ВОУ-мишеней на мишени из НОУ, изучал воздействие конверсии на производство Мо-99 (в расчете на мишень), на время выделения, на производство твердых отходов и плутония, а также на чистоту Мо-99. Самые важные результаты приведены ниже²¹.

¹⁵ Nuclear Regulatory Commission (NRC), "Briefing on proposed export of high enriched uranium in Canada," June 16, 1999 (<http://www.nrc.gov/reading-rm/doe-collections/commission/tr/1999/19990616a.html>). После 11 сентября ЯРК прекратила публиковать такую информацию, но недавно в ответ на запрос Алана Купермана из Института ядерного контроля сообщила, что Национальная администрация по ядерной безопасности запросила лицензию на экспорт 15.5 кг ВОУ (с обогащением 93 %) в Канаду для применения в мишени по получению Мо-99. Однако, ЯРК отказалась публиковать сведения о ежегодной канадской потребности для таких целей, потому что канадская сторона посчитала такие данные «частными», смотрите письмо Куперману от руководителя ЯРК Диаза. 26 апреля 2006 г.

¹⁶ Как и в начале 1993 года, Евроатом имел 13.7 тонн ВОУ, вывезенного из США. *Plutonium and highly enriched uranium 1996* by David Albright, Frans Berkhout, and William Walker, (Oxford University Press, 1997), Table 8.1. Евроатом не информировал США о передвижениях этого материала внутри ЕЭС после того, как он больше не требовался в качестве топлива для критической установки.

¹⁷ National Energy Policy Act of 2005, Sec. 630.

¹⁸ "Bomb-grade bazaar", Alan J. Kuperman, *Bulletin of the Atomic Scientists*, (March-April 2006).

¹⁹ Всего в 2004 году США продали 20 миллионов доз технеция-99 на 150 миллионов долларов. Частное сообщение [9].

²⁰ Подсчитано на основе табл.4 из "Nuclear Medicine Facility Survey, SNM 2003; Survey Reporting on 2002 Cost and Utilization" (ссылка [3]). Средняя цена за четыре медикамента, содержащих технеций-99, между 1 июля 2003 г. и 30 июня 2004 г. составляла 78 долларов за дозу, *Medicare, Radiopharmaceutical Purchase Prices for CNS Considerations in Hospital Outpatient Rate Setting*, Government Accountability Office, letter report to the Secretary of Health and Human Services, July 14, 2005, Table 1.

²¹ Смотрите ссылку [12].

Производство на мишень

Поскольку в мишени из НОУ доля урана-235 уменьшается по отношению к урану-238 в четыре раза, полный объем урана в мишени возрастает. Типичная мишень содержит только 15 г урана-235 в объеме около 1 см³ при объеме мишени в сотни см³. Количество урана-235 определяется не объемом, а скоростью протекания охлаждающей воды через мишень (или рядом с мишенью). Поэтому к добавлению урана-238 можно легко приспособиться.

Параллельное производство плутония

Добавление урана-238 увеличивает производство плутония из-за захвата нейтронов в ядрах урана-238. Плутоний представляет опасность с точки зрения распространения. Впрочем, количество произведенного плутония еще относительно невелико. Для случая, когда распадется 0.5% урана-235 в мишени, образуется около 1 кг плутония на 1.6 тонны урана оружейного качества, который все равно попал бы в отходы²². При делении 5% урана-235 отношение все еще будет меньше 0.01.

Чистота произведенного Мо-99

При той же степени очистки больше плутония останется в Мо-99, образованном в мишени из НОУ. Впрочем, конечный продукт содержит менее 1.6×10^{-14} грамм плутония-239 на кюри Мо-99²³. Соответствующая доза излучения для пациента окажется меньше 10^{-7} от дозы, вызванной технецием-99²⁴.

СТОИМОСТЬ КОНВЕРСИИ ОТ ВОУ К НОУ

Экономические аргументы, выдвинутые крупными производителями против конверсии к мишеням из НОУ, были сосредоточены, прежде всего, на стоимости самой конверсии, а не на стоимости последующих операций с мишенями из НОУ. Но поскольку, похоже, нет экономических преимуществ от конверсии, до тех пор, пока конверсия не требуется, нельзя ожидать, что крупные производители будут добровольно подвергать себя затратам и другим рискам, которые могут возникнуть у первопроходцев.

Большая часть публичных споров по поводу конверсии касалась канадского производителя MDS Nordion, поскольку он использует поставляемый Соединенными Штатами ВОУ для изготовления мишеней из Мо-99. Ядерная регулятивная комиссия (ЯРК) США выдала лицензию на такой экспорт. В 1999 и 2000 гг. ЯРК провела открытые слушания по поводу этого экспорта, так как возникли вопросы, честно ли сотрудничал MDS-Nordion с Аргоннской национальной лабораторией, чтобы перейти к использованию мишеней из НОУ, то есть, выполнялась ли поправка Шумера.

MDS-Nordion в настоящее время использует реактор *NRU*, принадлежащий Канадскому агентству по атомной энергии (КААЭ) и находящийся в Чок Ривер (штат Онтарио), для облучения мишеней при производстве Мо-99. Это многоцелевой реактор, запущенный в 1957 году. Более старый реактор *NRX* обеспечивал запасные услуги облучения до 1993 года, когда его закрыли навсегда. Со временем *NRU* вызывает все большую тревогу, и MDS-Nor-

²² "Preliminary investigations for technology assessment of Mo-99 production from LEU targets," G. F. Vandergrift et al., *Proceedings of the 1986 International Conference on Reduced Enrichment for Research and Test Reactor*, Gatlinberg, Tennessee, November 3-6, 1988, Table 1.

²³ Один кюри плутония-239 весит 16 граммов.

²⁴ Из-за разных периодов полураспада из одного Ки Мо-99 образуется 11 Ки технеция-99. Впрочем, мы считаем, что из этих 11 Ки используются только 2.4 Ки. Стандартная доза технеция-99 равна 24 мКи. ("Nuclear Medicine Facility Survey, SNM Reporting on 2002 Cost and Utilization [3]). Одна доза технеция-99 связана с менее чем 1.6×10^{-16} граммов плутония-239. Эффективная доза от вдыхания этого количества плутония составляет 2.4×10^{-11} Зв. «Опасность от рассеивания плутония при авариях с ядерными боеголовками», Стив Феттер и Фрэнк фон Хиппель, *Наука и всеобщая безопасность*, т.2, вып.1 (1990). Средние эффективные дозы от процедур с технецием-99 лежат в диапазоне 1-10 мЗв. *Sources and Effects of Ionizing Radiation*, UN Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UN, 2000), Annex D, Table 42.

dion решил построить для надежности два дополнительных реактора *Maple 1* и *Maple 2*, которые целиком будут работать для получения Мо-99 и других продуктов в интересах радиационной фармацевтики.

Впрочем, несмотря на требования поправки Шумера, конструкция новой установки для выделения Мо-99, связанной с реакторами *Maple*, оптимизирована для мишеней из ВОУ.

В 2000 году сотрудники MDS-Nordion заявили ЯРК, что потребуются только одно изменение в конструкции для адаптации своей новой перерабатывающей установки к мишеням из НОУ: увеличение производительности системы кальцинирования отходов (сушка и оксидирование). Впрочем, они сообщили также, что предназначенное для такой установки место в новом помещении мало для размещения кальцинера с более высокой производительностью. MDS-Nordion обещал попытаться приспособить установку для получения изотопа к мишеням из НОУ после ввода ее в операцию или же, если это окажется невозможным, создать новую линию по выделению Мо-99, специально предназначенную для мишеней из НОУ²⁵.

Однако, в 2003 году MDS-Nordion информировал ЯРК, что конверсия окажется невозможной, а новая перерабатывающая установка для мишеней из НОУ будет слишком дорогой: 77 миллионов долларов США²⁶. Не поступило независимого подтверждения этих утверждений, поскольку канадская сторона разорвала сотрудничество с Аргоннской национальной лабораторией по изучению конверсии.

Новые реакторы *Maple* предполагалось ввести в строй в 2000 году, но были обнаружены дефекты безопасности, связанные с их конструкцией и строительством. В ноябре 2005 года канадская комиссия по ядерной безопасности дала КААЭ два дополнительных года для запуска реакторов²⁷. Она также разрешила продлить срок лицензии на работу *NRU* до конца июля 2006 года, чтобы позволить провести подготовку к дальнейшему расширению сроков до 2012 года²⁸.

В дальнейшем КААЭ взяла на себя завершение проекта и операционные расходы по реакторам *Maple* и перерабатывающей установке, освободив MDS-Nordion от обременительного расходования своих корпоративных средств. Поскольку КААЭ является «королевской корпорацией», то есть полностью подчинено правительству Канады и финансируется им, это означает, что фактически канадское правительство берет на себя владение и руководство установками, оставляя MDS-Nordion роль продавца радиоизотопов. Причина этого, как указано в пресс-релизе КААЭ, заключается в том, чтобы «поддержать положение Канады как лидера рынка в высокотехническом медицинском предприятии»²⁹.

А.А. Самех предоставил нам свои оценки затрат на преобразование установок для получения Мо-99 в Радиохимическом центре компании Mallinckrodt (Петтен, Голландия). Самех разработал и запатентовал использованный там процесс выделения Мо-99, а также был директором Центра с 1995 по 2004 г. Он оценил полные затраты на конверсию в размере около 10 миллионов долларов. Значительная часть этих расходов потребовалась для сооружения установки с «горячими камерами», чтобы оптимизировать процесс в промышленном масштабе и получить информацию о продукте для европейского и американского лицензирующих агентств. Использование такой установки с горячими камерами окажется необходимым, чтобы избежать остановок и использовать одну из производственных линий для разра-

²⁵ "Briefing on proposed export of high enriched uranium in Canada", July 10, 2000. NRC <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/commission/tr/2000/200000710b.html>.

²⁶ "Nordion headed for a slowdown with the USA?" Daniel Horner, *Nuclear Fuel*, March 15, 2004.

²⁷ Принципиальная проблема при проектировании безопасности лежит в том, что при положительном коэффициенте реактивности (иными словами, при возрастании мощности растет реактивность) мощность начинает спонтанно нарастать. В ноябре 2005 года причины этой проблемы еще не были понятны, "Application for the renewal of the operating hazard for the MAPLE reactors at the Chalk River Laboratories: Record of proceedings, including reasons for decisions." Canadian Nuclear Safety Commission, November 24, 2005, <http://www.nuclearsafety.gc.ca/eng/commission/pdf/2005-10-18-December-AECL-MAPLE-e.pdf>.

²⁸ "Application to continue operation of the National Research Universal (NRU) reactor beyond December 31, 2005. Record of proceedings, including reasons for decision." Canadian Nuclear Safety Commission, November 24, 2005, <http://www.nuclearsafety.gc.ca/eng/commission/pdf/2005-10-18-decision-AECL-NRU-e.pdf>.

²⁹ "AECL and MDS enter into long-term supply agreement for medical isotopes." AECL news release, February 22, 2006, <http://www.aecl.ca/NewsRoom/News/Press-2006/060222.html>.

боточных и сертификационных испытаний³⁰.

ВЛИЯНИЕ НА ЦЕНЫ РАДИОИЗОТОПОВ И РАДИАЦИОННОЙ ФАРМАЦЕВТИКИ

Во всем мире в 2005 году было проведено около 25 миллионов диагностических процедур с применением технеция-99³¹. Примерно 40% всех продаж было произведено компанией MDS-Nordion - около 10 миллионов доз (см. Табл.1). При цене дозы в 0.5-1.6 долларов инвестиции в новую разделительную установку объемом около 77 миллионов долларов будут выплачены за 30 лет при фиксированной учетной ставке 6-21%³².

Эта оценка совпадает с тем, что можно получить из информации относительно «исключительного увеличения цен», которую сообщило MDS-Nordion в 2000 году с указанием, что его потребители согласились принять такое повышение и помочь оплатить затраты на строительство нового комплекса реакторов *Maple*, стоимость которого поначалу оценивалась в 140 миллионов долларов³³. Это увеличение цены было охарактеризовано как «начальное повышение размером около 40%» для оплаты реакторов *Maple* и связанной с ними установки для выделения Mo-99. В это время технеций-99 использовался для около 10 миллионов процедур в год по всему миру, а MDS-Nordion контролировало около 85% рынка и получало за продажу Mo-99, судя по оценкам, 50 миллионов долларов в год, то есть примерно 5 долларов за дозу³⁴. Поэтому увеличение цены на 40% означало повышение на 2 доллара за дозу. Такое повышение цены, грубо говоря, составляет такую же часть от оцениваемых капитальных затрат в 140 миллионов долларов, что и оцениваемое нами увеличение цены за дозу 0.6-1.5 долларов от затрат на установку для выделения Mo-99 в размере 77 миллионов долларов.

Увеличение на один доллар цены за дозу технеция-99 составит немногим более 10% от текущей стоимости производства связанного с ним Mo-99, но оно будет составлять менее чем 2% от стоимости соответствующей диагностической процедуры. Оцениваемое воздействие затрат в 10 миллионов долларов на конверсию Радиохимического центра Mallinckrodt окажется меньше. Эта установка снабжает примерно четверть всего рынка, что составляет около 6 миллионов доз в год (см. Табл.1). Возрастание цены на 0.12-0.35 долларов окупит инвестиции в течение 30 лет при банковской ставке 6-21%. Возрастание цены составит около 2-5% от стоимости производства Mo-99 и несколько десятых процента от стоимости соответствующей радиационной фармацевтики.

Экономия затрат на безопасность

Может появиться очень большая экономия затрат при использовании мишеней из НОУ из-за устранения очень высоких средств на транспортировку и хранение ВОУ. Странно, что такой фактор не обсуждался во время споров в то время, когда американская Национальная администрация по ядерной безопасности (НЯБА) проводит пересмотр инвентаризации установок, применяющих ВОУ, в связи с резким увеличением бюджета по безопасности после событий 11 сентября. Число террористов (всего их было 19), участвовавших в угоне самолетов, потребовало от НЯБА увеличить размер «базовой угрозы», для защиты от кото-

³⁰ Самех предположил, что мишени из ВОУ (UAl3), применяемые в Петтене, будут заменены на мишени из U₃Si₂ с обогащением 20 % (частное сообщение, январь 2006 г.). Если можно будет использовать горячие камеры в Петтене для отработки процесса с НОУ, затраты на конверсию возможно составят только 1 миллионов долларов.

³¹ Смотрите ссылку [5].

³² Мы использовали следующее приближение к формуле кредитования: ежегодные выплаты равны $iC/[1-\exp(-iT)]$, где i – учетный процент, C – цена установки, а T – длительность выплаты в годах. Диапазон рассмотренных значений фиксированного учетного процента определялся из анализа экономики переработки отработанного топлива, где значение 5.8 % было получено для предприятий, являющихся государственной собственностью, а значение 20.8 % получено на примере частных предприятий. *Nuclear Wastes: Technologies for Separation and Transmutation* (National Academy Press, 1996), Table J-5.

³³ Смотрите [25]. К 2003 году MDS-Nordion затратил 304 миллионов долларов на новый комплекс для производства Mo-99, *MDS Inc, Veritas Investment Research. July 2004, 2.*

³⁴ *Evaluation of medical radionuclide production with the accelerator production of tritium (AFT) facility*, Kenneth M. Spicer *et al.*, Medical University of South Carolina, University of South Carolina and Westinghouse Savannah River Co, 1997, 12, 46.

рой должны быть подготовлены ее силы.

Оценка затрат на одного охранника составляет 125 тысяч долларов в год. Для каждого террориста, добавленного к базовой угрозе, на установке, где применяются материалы, пригодные для использования в ядерном оружии, будет необходимым добавить охранника к каждому из (по крайней мере) трех постов при пяти сменах, то есть, всего 15 охранников на полное время службы. Если следовать такому подходу, то затраты на охрану при базовой угрозе от 19 террористов составят 36 миллионов долларов в год³⁵. Это делает ничтожно малыми все приведенные выше ежегодные затраты на конверсию.

У нас нет достаточной информации для проведения анализа по экономии средств на безопасность в результате замены ВОУ-мишеней на НОУ-мишени, но в будущем следует принимать рентабельность во внимание при таких анализах, как, например, исследование Национальной академии наук по заказу Конгресса.

НАДЕЖНОСТЬ ПОСТАВОК МОЛИБДЕНА-99

Запасы молибдена-99 выросли с тех пор, как сеть его продажи стала глобальной. Если бы все реакторы работали на полную мощность, они могли бы предоставить 250% мировой потребности на 2005 год. С учетом времени года, в течение которого они работают, они могли бы изготовить в среднем 175% мировых потребностей на 2005 год (см. Табл.1).

Но такая избыточная производительность носит хрупкий характер. В 2006 году возраст производственных реакторов доходил до 41-49 лет. Реактор *FRJ-2* закрылся в 2006 году. Если реактор *NRU* будет заглушен, совместное производство оставшихся четырех реакторов, работающих в оптимальном режиме, упадет как раз до 100% мировых потребностей, которые растут ежегодно на 5-10% (см. Табл.1). Может оказаться, что у некоторых из оставшихся реакторов вырастет пиковая производительность. Четкий график производства молибдена-99 может, кстати, войти в конфликт с другими задачами многоцелевых реакторов. Высокий уровень операций реакторов *NRU*, *HFR* и *SAFARI* отражает тот факт, что они обязаны быть доступными для изготовления Мо-99 только с небольшими перерывами. Остальные реакторы работают сейчас как запасные производители.

Если два специализированных реактора *Maple* с мощностью по 10 МВт войдут в строй, они значительно облегчат ситуацию. Было предложено, чтобы Европа также построила, по крайней мере, один новый реактор, предназначенный для получения молибдена-99, в дополнение к новым многоцелевым реакторам, которые сооружаются³⁶. В США прошли обсуждения возможности использовать различные реакторы Министерства энергетики или американских университетов для обеспечения американских источников молибдена-99. Были также выдвинуты предложения о сооружении специализированных реакторов.

Однако, опасения о надежности поставок Мо-99 не должны использоваться как аргумент в пользу задержки конверсии мишеней для производства Мо-99 от ВОУ к НОУ. На основе нашего анализа конверсия кажется возможной как с технической, так и с экономической точки зрения.

ЗАКЛЮЧЕНИЯ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Крупные производители молибдена-99 используют сейчас каждый год больше урана оружейного качества, чем нужно для изготовления бомбы хиросимского типа. Потребляется очень малая часть этого ВОУ, и большие запасы оружейного урана накапливаются в отходах. Все национальные правительства должны беспокоиться по этому поводу. Кража ВОУ в любой стране представляет собой потенциальную угрозу для всех городов мира.

До нынешнего момента только правительство США серьезно занимается тем, чтобы

³⁵ *U.S. Nuclear Weapons Complex: Homeland Security Opportunities*, Project of Government Oversight, May 2005 (<http://www.pogo.org/p/homeland/ho-05-03-01-consolidation.html>, 15). В этом докладе на стр.9 приводится оценка NNSA, что новый DBT потребует добавления около 100 охранников в сутки на каждой из семи установок.

³⁶ Смотрите [5]. Германия ввела в действие исследовательский реактор *FRM-II* на 20 МВт в 2004 году, а Франция сооружает новый реактор *Jules Horowitz* на 100 МВт для испытания материалов, который, как ожидается, начнет действовать в 2014 году. Но производство изотопов станет в лучшем случае запасной программой для этих реакторов.

убедить медицинские компании, работающие с радиационной фармацевтикой, перейти на мишени из НОУ. Канадское правительство, например, предоставляя беспроцентный заем на 100 миллионов долларов для постройки новых реакторов *Maple* и установки для переработки мишени³⁷, могло бы потребовать от MDS-Nordion проектирования установки для переработки, способной работать как с мишенями из НОУ, так и с мишенями из ВОУ, но не сделало этого, несмотря на обмен дипломатическими нотами в 1997 году с США, где оно обещало поступить именно так³⁸. Теперь, когда государственная компания КААЭ купила эти установки, канадское правительство должно иметь возможность потребовать, чтобы установки были переоборудованы для возможности работы с мишенями из НОУ до того, как они включатся в производство. Как только установка начнет работать, переход е НОУ может оказаться значительно более трудным, если нельзя прерывать переработку мишени из ВОУ для испытаний при разработке и сертификации мишеней из НОУ.

Европа не должна повторять ошибки Канады. Евратом – ядерное регулятивное агентство Евросоюза, должен потребовать, чтобы каждая новая установка для получения молибдена-99 в Европе была спроектирована для использования мишеней из НОУ, а также потребовать подготовку рецензируемого исследования о конверсии существующих установок. Южная Африка должна сделать то же самое. Затраты на такие инициативы окажутся тривиальными по сравнению с потенциальными последствиями кражи части ВОУ.

³⁷ MDS-Nordion, *Annual Information Form for the period ending October 31, 2005*. <http://www.mdsinc.com/reports/2005.engaif.pdf>, 15.

³⁸ Процитировано в [18], примечание 13.