

ПОНИМАНИЕ РОССИЙСКОГО КОМПЛЕКСА ОБОГАЩЕНИЯ УРАНА

Олег Бухарин

В течение периода в 50 лет Советский Союз (и теперь Россия) разрабатывал высокоэффективную технологию обогащения урана с помощью центрифуг и создал большой научно-исследовательский и промышленный комплекс для производства обогащенного урана для ядерного оружия (в прошлом) и ядерных реакторов. Комплекс обогащения является важнейшей частью российского ядерного комплекса и будет сохранять свое значение для экономики России. Из-за своей роли в российско-американском соглашении 1993 г. по ВОУ, глобальных ядерных рынках, и усилий по контролю распространения технологии обогащения на центрифугах российские предприятия по обогащению имеют большое значение для международной безопасности.

Статья получена 5 января 2004 г. и принята к публикации 12 января 2004 г.

Автор работает в Принстонском университете.

Посылать корреспонденцию по адресу: Oleg Bukharin, Princeton University, P.O. Box 37, Garrett Park, MD 20896.

ВВЕДЕНИЕ

Российская промышленность по обогащению урана была основана в конце 1940-х г.г. для производства высокообогащенного урана (ВОУ) для советской программы ядерного оружия. В 1950–60 г.г. она начала также производить уран для реакторов морских энергетических установок, исследовательских реакторов, и реакторов атомных электростанций. Производство ВОУ для оружия было прекращено в конце 1980-х г.г. и в настоящее время обогатительные предприятия работают для удовлетворения внутреннего и экспортного спроса на обогащенный уран и оказания услуг по разделению изотопов.

Российские предприятия по обогащению урана управляются Министерством атомной энергии (Минатомом) и состоят из четырех крупных обогатительных комплексов: Уральского электрохимического комбината (УЭХК) в Новоуральске, Электрохимического завода (ЭХЗ) в Зеленогорске, Сибирского химического комбината (СХК) в Северске, и Ангарского электролизного и химического завода (АЭХК) в Ангарске, Иркутская область¹. Все четыре завода первоначально были организованы как газодиффузионные заводы. В настоящее время они используют высокоэффективную технологию разделения изотопов на центрифугах, которая позволяет им производить обогащенный уран и оказывать услуги по обогащению по очень низкой цене. На СХК и АЭХК работают также промышленные предприятия по производству UF₆, которые поставляют обогатительным предприятиям исходное сырье. Основные обогатительные предприятия поддерживаются рядом научно-исследовательских и производственных организаций, многие из которых находятся за пределами системы Минатома (см. табл. 1).

Сектор обогащения имеет важнейшее значение для Минатома и российской атомной промышленности. Доходы в твердой валюте от его экспортных операций сыграли основную роль в выживании Минатома во время постсоветского экономического и социального кризиса 1990-х г.г., периода коллапса многих других советских отраслей промышленности. Обогательное производство остается центральным в деятельности Минатома по получению средств. В качестве элемента топливного цикла Минатома обогатительные предприятия важны для внутренней программы атомной энергетики и российского экспорта технологий атомной энергетики в зарубежные страны.

Российская обогатительная промышленность и ее технологии также важны с точки зрения международной безопасности. Например, обогатительные заводы играют основную

¹ В марте 2004 г., Минатом преобразован в Российское федеральное агентство по атомной энергии.

роль в соглашении России и США по ВОУ, возможно, наиболее важной инициативы между двумя странами для нераспространения, контроля над вооружениями, и ядерной прозрачности после окончания холодной войны. Тем не менее, имеется реальная опасность того, что Россия может стать источником технологий, знаний и оборудования для стран, пытающихся получить ядерное оружие.

Оценка риска и возможностей распространения требует лучшего понимания российского комплекса и технологий обогащения, включая его историю, современное состояние, и направления будущего развития. Эта статья посвящена некоторым из этих вопросов.

РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО ЦЕНТРИФУГ²

Исследования по использованию метода центрифуг в России были начаты в середине 1930-х г.г. Фрицем Ланге, беженцем из гитлеровской Германии. Более целенаправленные исследования были предприняты в конце 1940-х – начале 1950-х г.г. группой немецких и советских ученых. Критический прорыв был достигнут в начале 1952 г., когда российские специалисты предложили концепцию короткой подкритической центрифуги, которая включала элементы, общие с современными газовыми центрифугами: нижний подшипник с тонкой иглой магнитный верхний подшипник, неподвижные лопасти для удаления газа, и корпус, который одновременно служит молекулярным насосом³. Новая центрифуга стала прототипом для серии промышленно изготовленных центрифуг, которые в конце концов включили восемь поколений подкритических машин (обобщенная временная последовательность этих разработок показана на рис. 1. Подкритические центрифуги стали технологией, выбранной для обогащения урана в Советском Союзе, поскольку было решено, что советская промышленность лучше приспособлена для массового производства относительно простых, но высококачественных и надежных устройств⁴.

Промышленное применение технологии центрифуг началось в середине и конце 1950-х г.г. В октябре 1955 г. советское правительство приняло решение построить в Новоуральске опытный завод с 2 435 центрифугами для оценки надежности и качества центрифуги, и контрольно-измерительных приборов и систем. За опытным заводом последовала промышленная установка, которая была создана в одном из зданий газодиффузионного завода в Новоуральске и оборудована центрифугами первого поколения. На основании этого опыта советское правительство 22 августа 1960 г. приняло решение построить в Новоуральске большое производство с центрифугами, которое было введено в строй в 1962-4 г. на нем работали центрифуги 2 и 3 поколения, которые впервые были установлены в несколько ярусов⁵. Впо-

² Более подробное обсуждение советско-российской программы центрифугирования приводится в отчете Oleg Bukharin, *Russia's Gaseous Centrifuge Technology and Enrichment Complex*, Program on Science and Global Security's report (Princeton, 2004).

³ В молекулярном насосе высокая вращательная скорость ротора передает импульс молекулам газа; поэтому действие насоса достигается на молекулярном уровне за счет колебаний молекул газа между ротором и статором. В центрифуге роль статора играет точно подогнанная муфта со спиральными канавками, установленная вокруг верхней части ротора центрифуги (который также служит ротором насоса). Эта система молекулярного насоса отсасывает все вытекающий газ UF_6 в верхнюю часть центрифуги, откуда газ удаляется внешней вакуумной системой.

⁴ Вращение довольно длинной трубки малого диаметра приводит к появлению изгибных (поперечных) резонансов. Эти резонансы появляются при критической скорости, которая определяется конструкцией ротора и характеристиками материалов, из которых изготовлен ротор (плотностью и упругостью). Центрифуга, работающая при скорости ниже первого изгибного резонанса (короткая центрифуга), называется подкритической. Центрифуга, работающая при скоростях выше этого резонанса, называется «сверхкритической». Сверхкритический ротор с высоким отношением длины к диаметру при разгоне до своей проектной скорости должен пройти через несколько критических резонансов. Если ротор недостаточно сбалансирован, или если колебания не контролируются с использованием демпфирующих средств, то при прохождении этих критических частот ротор может разрушиться.

⁵ Vladimir Bazhenov and Yuri Zabelin, "The Creation and Development of the Centrifuge Method for Isotope Separation," *UEKhK Information Newsletter*, No. 3 (18 February 1999).

следствии это расположение позволили советским специалистам установить большое количество центрифуг в цехах бывших газодиффузионных заводов.

Табл. 1. Российский научно-исследовательский и производственный комплекс обогащения на центрифугах.

Организация (расположение)	Функция научно-исследовательских работ или изготовления оборудования
Основные предприятия по обогащению урана	
УЭХК (Новоуральск)	На УЭХК приходится 49% всех производственных мощностей России по обогащению (по оценке, 9,8 миллиона ЕРР в год).
ЭХЗ (Зеленогорск)	На ЭХЗ приходится 29% всех производственных мощностей России по обогащению (по оценке, 5,8 миллиона ЕРР в год).
СХК (Северск)	На СХК приходится 14% всех производственных мощностей России по обогащению (по оценке, 2,8 миллиона ЕРР в год). На нем работает также завод по производству UF ₆ .
АЭХК (Ангарск)	На СХК приходится 8% всех производственных мощностей России по обогащению (по оценке, 1,6 миллиона ЕРР в год). На нем работает также завод по производству UF ₆ .
Комплекс научно-исследовательских организаций по центрифугам	
Центральное конструкторское бюро машиностроения (ЦКБМ, Санкт-Петербург) Отделение технологии центрифуг ЦКБМ, известное как Центротех-ЭХЗ	Ведущее конструкторское бюро Минатома по разработке центрифуг. ЦКБМ разрабатывало шесть первых поколений центрифуг и относящегося к ним оборудования. Оно проводит полный цикл исследований и разработок, изготавливает опытные центрифуги, и производит различные устойчивые изотопы для медицинских и промышленных целей. ЦКБМ производит также турбомолекулярные насосы и другие высоковакуумные системы, используемые в разделении изотопов.
Конструкторское бюро ОКБ-ГАЗ (Нижний Новгород)	ОКБ ГАЗ является одним из трех основных разработчиков центрифуг.
Научно-исследовательские и опытные подразделения основных обогатительных предприятий (Новоуральск, Зеленогорск, Северск, Ангарск)	УЭХК является одним из трех основных разработчиков центрифуг. Другие предприятия также участвуют в исследованиях и разработках центрифуг и их испытаниях.
Институт авиационных моторов (ВИАМ, Москва)	ВИАМ разрабатывает конструкционные материалы для газовых центрифуг.
Институт молекулярной физики Курчатовского института (КИ ИМФ, Москва)	КИ ИМФ работает над новыми конструкциями центрифуг и химическими аспектами разделения изотопов.
Институт химических технологий (ВНИИХТ, Москва)	ВНИИХТ является центром по работам по химии UF ₆ и технологиям его обработки.
Институт энергетических технологий (ВНИПИЭТ, Санкт-Петербург)	ВНИПИЭТ является разработчиком предприятий по центрифужному обогащению, вспомогательного оборудования, и контрольно-измерительных приборов и систем.
Институт химического машиностроения (СвердНИИХимМаш, Екатеринбург)	СвердНИИХимМаш является разработчиком оборудования топливного цикла.

Табл. 1. Российский научно-исследовательский и производственный комплекс обогащения на центрифугах (продолжение).

Производственный комплекс оборудования для центрифуг	
Производственное объединение «Точные машины» (ВПО Точмаш, Владимир)	ВПО Точмаш в настоящее время является одним из двух основных изготовителей центрифуг.
Завод им. Дегтерева (Ковров)	Завод им. Дегтерева в настоящее время является одним из двух основных изготовителей центрифуг.
ГАЗ (возможно, кодовое название Нижегородского машиностроительного завода, Нижний Новгород)	В прошлом ГАЗ был основным производителем центрифуг.
УЭХК (Новоуральск)	УЭХК является основным производителем автоматики и контрольно-измерительного оборудования (датчиков, клапанов, насосов и т.п.).

В течение 1960-х – 1970-х г.г. в атомном комплексе проводились дальнейшие исследования и разработки по центрифугам, оценки надежности центрифуг второго, третьего и четвертого поколений, и стендовые испытания центрифуг пятого поколения⁶. Эта работа включала оптимизацию геометрии центрифуги и увеличение скорости вращения, которое, в свою очередь, требовало более прочных материалов для изготовления роторов центрифуг. В 1970-х г.г. советский атомный комплекс начал модернизацию всех четырех основных обогатительных предприятий для завершения перехода от газодиффузионной к центрифужной технологии⁷. Эти усилия базировались на центрифугах пятого поколения, которые были установлены в массовом порядке в 1971-1975 г.г., и центрифугах пятого поколения, установка которых началась около 1984 г.

Разработка машин пятого и шестого поколений позволила обогатительному комплексу прекратить использование газодиффузионной технологии в конце 1980-х – начале 1990-х г.г. В результате потребление электроэнергии для работ по обогащению сократилось на порядок величины при увеличении производственных мощностей обогащения в 2 – 3 раза⁸. В конце 1980-х г.г. производственные мощности достигли уровня приблизительно в 20 миллионов ЕРР (единиц работы разделения)⁹.

В конце 1990-х г.г. обогатительный комплекс был оборудован примерно одинаковым количеством центрифуг пятого и шестого поколений¹⁰. Машины пятого поколения, большое количество которых было установлено в начале и середине 1970-х г.г., достигли конца срока своей работы и стали ненадежными. (Начальный проектный срок работы машины пятого поколения составлял 12,5 лет, действительный срок работы достиг 25 лет¹¹.) К 2010 г. все ма-

⁶ B. Bazhenov and Yu. Zabelin, "The Creation and Development of the Centrifuge Method for Isotope Separation," *UEKhK Information Bulletin* (18 February 1999).

⁷ Yu. Verbin, "Development of Chemical and Technological Facilities and Environmental Protection," *Atompressa*, 40 (November 1998).

⁸ V. Safutin, Yu. Verbin, and V Tolstoi, "The Status and Perspectives of Separation Production," *Atomnaia Energiia*, vol. 89, No. 4 (October 1, 2000), 338-343.

⁹ Victor Mikhailov, "The Nuclear Industry in Russia," presented at The Twenty-Second International Symposium, The Uranium Institute, London, 1997 (available at: www.world-nuclear.org/sym/1997/mikhail.htm).

¹⁰ В 2000 г. на центрифугах пятого, шестого, и седьмого поколений соответственно производилось 48, 49, и 3 процента от общего производства. На УЭХК работают центрифуги пятого, шестого, и седьмого поколений, на ЭХЗ работают центрифуги пятого, шестого, и седьмого поколений, на СХК работают центрифуги пятого и шестого поколений, и на АЭХК работают центрифуги шестого поколения. V. Safutin, Yu. Verbin, and V. Tolstoi, "The Status and Perspectives of Separation Production," *Atomnaia Energiia*, vol. 89, No. 4 (October 1, 2000), 338-343.

¹¹ V. Shidlovsky, "On the Prospects and Plans for Modernizing Enrichment Facilities," *Atompressa*, 36 (September 2000).

шины пятого поколения будут демонтированы. Без замены общие разделительные производственные мощности комплекса сократились бы на 40 процентов. В 1997 г. и 1998 г., соответственно, Минатом начал новый цикл модернизации комплексов УЭХК и ЭХЗ с заменой машин пятого поколения на машины седьмого поколения¹².

В 1998 г. российские специалисты начали исследования и разработки по центрифугам восьмого поколения¹³. Их установка предварительно намечена на 2003 – 2004 г.г. Замена центрифуг пятого поколения на машины седьмого поколения должна увеличить производственную мощность комплекса к 2010 г. на 25 процентов. Установка машин восьмого поколения (также для замены центрифуг пятого поколения) должна позволить увеличить производительность на 34 процента, или до 26 – 27 миллионов ЕРР в год¹⁴.

Однако, центрифуги восьмого поколения будут последней подкритической моделью, поскольку, как ожидается, потенциал улучшений конструкции и материалов будет уже исчерпан. Будущее расширение производительности поэтому, предполагается, будет включать сверхкритические машины. План, сформулированный программой министерства «Модернизация обогатительного комплекса к 2010 г.» предлагает три варианта конструкции сверхкритической машины: (а) жесткие роторы, соединенные упругими стальными сильфонами, (б) роторы из композитных материалов с композитными сильфонами, и (в) усиленные «жесткие» роторы на металлической основе¹⁵.

Лучшая конструкция будет выбрана в 2004 г. И производство новых центрифуг начнется в 2010 г. Машины девятого поколения будут заменять машины шестого поколения. Машины шестого поколения, которые были введены в действие в середине 1980-х г.г., имеют проектный срок службы в 15 лет, и ожидается, что они будут надежно работать в течение 30 лет, или до 2015 г.

Кроме замены всех центрифуг пятого поколения на машины седьмого и восьмого поколений, и разработки сверхкритической центрифуги девятого поколения, в программе предусматривается модернизация вспомогательного оборудования обогатительных заводов для увеличения безопасности и надежности. В 2000 г. стоимость программы оценивалась в 36,7 миллиарда рублей (1,2 миллиарда долларов) и ее предполагалось финансировать из доходов от экспорта¹⁶.

ПРОИЗВОДСТВО ОБОГАЩЕННОГО УРАНА И УСЛУГИ ПО ОБОГАЩЕНИЮ

Во время холодной войны четыре обогащающих завода работали в едином комплексе. Заводы в Новоуральске, Северске и Зеленогорске производили ВОУ, предприятие в Ангарске производило ВОУ, который, предположительно, направлялся в каскады ВОУ других заводов. Советское правительство осуществляло строгий вертикальный контроль над обогащающими предприятиями, определяя производственные квоты и ресурсы, разрабатывая техническую политику, и координируя отношения с поставщиками, потребителями, и вспомогательными институтами. Комплекс получал щедрое финансирование.

Окончание холодной войны и социальные и экономические неурядицы России после развала Советского Союза в 1991 г. вызвали в атомной промышленности глубокий кризис. Обогательный комплекс и связанные с ним вспомогательные отрасли промышленности не были исключением. Фактически их положение в некоторых аспектах было даже хуже из-за нескольких факторов:

- прекращения производства ВОУ в 1988 г.
- прекращения использования газодиффузионной технологии, которое сопровождалось

¹² Там же [11].

¹³ "To Meet Modern Requirements: Interview with Vladimir Korotkevich," был доступен в сети Интернет www.minatom.ru/presscenter/document/news/PRINT_news344.htm.

¹⁴ V. Safutin, Yu. Verbin, and V Tolstoi, "The Status and Perspectives of Separation Production," *Atomnaia Energiia*, vol. 89, No. 4 (October 1, 2000), 338-343.

¹⁵ V Shidlovsky, "On the Prospects and Plans for Modernizing Enrichment Facilities," *Atompressa*, 36 (September 2000).

¹⁶ V Safutin, Yu. Verbin, and V Tolstoi, "The Status and Perspectives of Separation Production," *Atomnaia Energiia*, vol. 89, No. 4 (October 1, 2000) 338-343.

закрытием связанных вспомогательных предприятий (таких, как завод фильтров для газовой диффузии в Новоуральске); и

- сокращением спроса в атомной энергетике из-за закрытия энергетических реакторов в Чернобыле, в Восточной Германии и Болгарии, а также решением атомных электростанций в Ловисе, Финляндия, и Темелине, Чешская республика, покупать ядерное топливо у западных поставщиков.

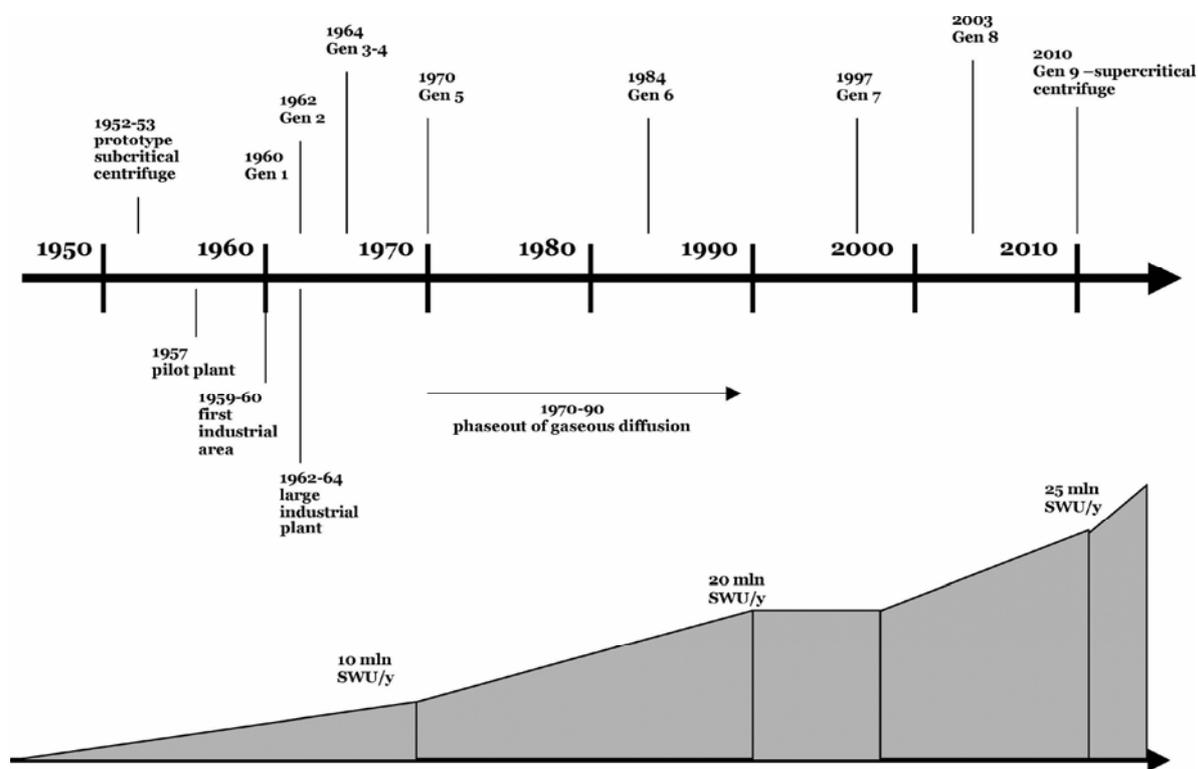


Рис. 1. Временная диаграмма разработки центрифуг и роста производственных мощностей по обогащению в СССР и России. Текст на временной диаграмме разработки центрифуг: 1952-53 – прототип подкритической центрифуги; 1957 – опытный завод; 1959-60 – первая промышленная площадка; 1960 – поколение 1; 1962 – поколение 2; 1962-64 – большой промышленный завод; 1964 – поколения 3,4; 1970 – поколение 5; 1970-1990 – постепенное прекращение газовой диффузии; 1984 - поколение 6; 1997 – поколение 7; 2003 – поколение 8; 2010 – поколение 9 (сверхкритическая центрифуга). Производственные мощности по обогащению в нижней части рисунка показаны в миллионах ЕРР в год.

В результате в начале 1990-х г.г. комплекс обогащения эксплуатировал чуть больше половины своей мощности¹⁷. Производство автоматики и контрольно-измерительных приборов (датчиков, клапанов, насосов и т.п.) в Новоуральском комплексе сократилось примерно до 15-25 процентов от прежнего уровня (конца 1980-х г.г.)¹⁸. Вспомогательные организации в открытых городах испытали значительную потерю персонала, ухудшение состояния исследовательского и производственного оборудования, и понижение уровня научно-исследовательских работ и производства.

Положение начало постепенно изменяться в середине 1990-х г.г., когда комплекс обогащения стал получать преимущества от новых и уникальных возможностей, которые более подробно будут рассмотрены ниже. В результате российская обогащающая промышленность не только выжила в постсоветскую эру, но и стала важным игроком на международном

¹⁷ Например, согласно документу E. Mikerin, V Bazhenov, and G. Solovyev, "Directions in the Development of Uranium Enrichment Technology," (Минатом, без даты) для экспорта в начале 1990-х г.г. для экспорта было доступно по крайней мере 10 миллионов ЕРР в год.

¹⁸ Доклад УЭХК на семинаре по сокращению размеров комплекса ядерного оружия Минатома; Обнинск, 27 – 29 июня 2000 г.

рынке ядерного топлива и важнейшим элементом советской атомной промышленности. В настоящее время она покрывает примерно 40 процентов спроса на обогащение (включая 15 процентов от НОУ, получаемого из ВОУ), включая примерно 100 процентов спроса в странах бывшего Советского Союза и Восточной Европы. Действительно, большие возможности по разделению и малая стоимость производства – возможно, порядка 20 долларов за ЕРР (против примерно 70 долларов за ЕРР в США) – которая стала возможной благодаря высокоэффективной центрифужной технологии, и доступу к дешевой электроэнергии, материалам и рабочей силе, сделали российские обогащающие предприятия весьма конкурентоспособными¹⁹.

Полагают, что российский обогащающий комплекс работает почти на номинальной мощности примерно в 20 миллионов ЕРР в год, которая используется для выполнения следующих основных задач: производство обогащенного урана для поставленных Россией реакторов и западных электростанций, повторное обогащение урана из урановых отвалов, и разбавление ВОУ по российско-американскому соглашению 1993 г. Распределение производственных мощностей для этих задач оценить трудно, и, возможно, оно меняется от года к году: официальные данные Минатома для 2000 г. представлены на рис. 2²⁰.

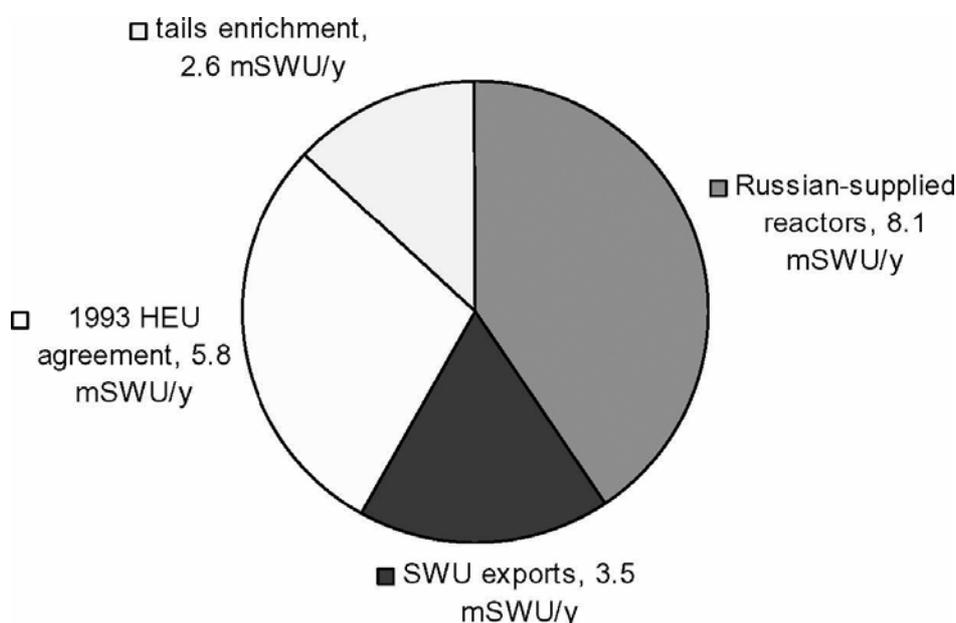


Рис. 2. Использование производственных обогащающих мощностей Минатома в 2000 г. в предположении общих мощностей в 20 миллионов ЕРР в год (на основании V. Shidlovsky "On the Prospects and Plans for Modernizing Enrichment Facilities," *Atompressa*, 36 (September 2000)). Надписи на рисунке (по часовой стрелке снизу): 1 – экспорт ЕРР, 3,5 миллиона ЕРР в год; 2 – соглашение 1993 г. во ВОУ, 5,8 миллиона ЕРР в год; 3 – обогащение отвалов, 2,6 миллиона ЕРР в год; 4 – топливо для поставленных Россией реакторов, 8,1 миллиона ЕРР в год.

Производство НОУ для внутренних потребителей и на экспорт

Российский обогащающий комплекс является основным поставщиком обогащенного урана для реакторов российской конструкции в бывшем Советском Союзе и Восточной Ев-

¹⁹ С анализом стоимости производства можно ознакомиться в работе Matthew Bunn, "The Cost of Rapid Blend-Down of Russian HEU," July 11, 2001. Интересно, что в 2000 г. Ни обогатительные заводы, ни Минатом не знали производственной стоимости ЕРР, см. V Shidlovsky, "On the Prospects and Plans for Modernizing Enrichment Facilities," *Atompressa*, 36 (September 2000).

²⁰ Данные по сокращению мощностей Минатома см., например, в V. Shidlovsky, "On the Prospects and Plans for Modernizing Enrichment Facilities," *Atompressa*, 36 (September 2000).

ропе²¹. Согласно анализу атомной промышленности, годовой спрос на обогащение в реакторах бывшего Советского Союза и Восточной Европы оценивается примерно в 5,3 миллиона ЕРР в год²². Однако, количество работы разделения, которое используется в российском обогащающем комплексе, трудно оценить точно. Две основные переменные включают использование внутренних отвалов (и их оценку) и размеры использования переработанного урана и существующих запасов обогащенного урана. Фактически, по данным Минатома, в 2000 г. Россия использовала 40,8 процента своих мощностей (примерно 8 миллионов ЕРР в год) для производства обогащенного урана для реакторов российской конструкции.

Россия становится также крупным поставщиком услуг по обогащению для Запада. В 1968 г. советское правительство заявило о своей готовности предоставлять услуги по обогащению на экспорт²³. Это заявление было вызвано двумя факторами. Во-первых, в середине 1960-х г.г. требования по производству ВОУ для оружия начали уменьшаться. Во-вторых, в то же самое время, мощности по обогащению стали возрастать из-за внедрения центрифужной технологии. Советское решение о выходе на рынок обогащения совпало с краткосрочным падением мощностей обогащающих предприятий США (управляемых в это время Комиссией по атомной энергии), которая была монопольным поставщиком для западного мира. В 1968 г. КАЭ перестало принимать новые заказы, вызвав образование новых обогатительных компаний в Европе (Eurodif и Urenco), а также повысило интерес к советскому предложению. Советский Союз вышел на рынок в 1971 г., подписав контракт с Францией. Работа по обогащению была поручена Новоуральскому комбинату, который в течение многих лет оставался основной организацией для экспортных операций. Строительство комплекса «Челнок» для перекачки ожиженного низкообогащенного UF₆ в западные контейнеры типа 30-B позволило Новоуральскому комплексу произвести поставки во Францию в 1973 г. (Аналогичные установки впоследствии были построены и на трех других площадках.)

Экспорт услуг по обогащению продолжал расти в 1980-х и 1990-х г.г. В дополнение к использованию поставленных потребителем исходных материалов, Россия начал продавать обогащенный уран, произведенный из собственного урана. Обоганительный завод в Северске стал обогащать переработанный уран для французской компании Cogema. Новые контракты были подписаны с атомными электростанциями Западной Европы, Южной Африки, Южной Кореи и других стран. Уровень экспорта возрос с 1,3 миллиона ЕРР в год в начале 1990-х г.г. до примерно 3,5 миллиона ЕРР в год в 2002 г. (согласно российским данным, в 2000 г. для этой цели использовалось 17,4 процента от всех мощностей, что соответствует 3,48 миллиона ЕРР в год).

В будущем Россия хотела бы увеличить экспорт услуг по обогащению для атомных электростанций в Западной Европе и на Дальнем Востоке. Она также хотела бы продавать услуги по обогащению в США в дополнение к продаже НОУ, полученного из ВОУ. И, наконец, она надеется поставлять обогащенный уран для спроектированных в России реакторов, строящихся в Индии, Иране и Китае.

Несмотря на надежность поставок и низкие цены, предлагаемые Минатомом, значительный рост экспорта в ближайшем будущем представляется маловероятным из-за конкуренции с другими крупными поставщиками, импортными ограничениями агентства по закупкам Евратома и продолжающихся торговых ограничений в Соединенных Штатах²⁴.

²¹ Небольшая часть требований покрывается западными поставщиками и переработкой урана, извлеченного на комплекса «Маяк» из отработанного топлива ВВР-440 с добавлением среднеобогащенного или высокообогащенного урана.

²² Dr. Arthur Max, Nuket, частное сообщение, 2003 г.

²³ A. Novikov "30 Years of Russian Uranium Exports: Interview with A. Knutarev," *Atompressa*, 16 (2003).

²⁴ Основными конкурентами Минатома (в скобках показана их доля на мировом рынке обогащения) являются USEC (18%), Eurodif (23%), и Urenco (15%). Япония также стремится к большей роли на рынке обогащения. (Jean-Jacques Gautrot, "The Harmonious Market for Uranium Enrichment Services," presented at World Nuclear Association Annual Symposium, September 4-6, 2002, London; www.world-nuclear.org/sym/2002/pdf/gautrot.pdf.) Агентство закупок Евратома ограничило в 2002 г. импорт обогащенного урана из России 25%. В 2002 г. российские поставки составляли 14% от европейского спроса на обогащение. ("Euratom Releases Annual Report 2002," *The Ux Weekly* [June 9, 2003]). США запрещают импорт любого россий-

Однако, в будущем российские обогащающие предприятия с их большими и дешевыми производственными мощностями могут сыграть важную роль в обеспечении безопасности поставок обогащенного урана. Безопасность поставок ядерного топлива имеет стратегическое значение для США, Европы и Восточной Азии, сильно зависящих от атомных электростанций для производства энергии. Безопасность поставок включает уверенность в том, что свежее ядерное топливо будет доставляться на ядерные реакторы по графику и по приемлемым ценам. Обогащающая промышленность имеет особую важность, поскольку расходы на обогащение составляют заметную часть стоимости ядерного топлива.

Реальные мировые производственные мощности сегодня довольно близки к спросу (40 против 37 миллионов ЕРР в год)²⁵. Большая часть мирового спроса удовлетворяется четырьмя главными поставщиками: Обогащающей корпорацией США (USEC), Urenco, Eurodiff, и Минатомом. Проблема. Возникшая у одного из них проблема, такая, как крупная авария, приведет к значительному нарушению поставок топлива. Диверсификация поставок, способность обогащающих предприятий резко увеличить производство, и доступность запасов могут понизить этот риск.

Среди четырех основных поставщиков у Минатома имеются наибольшие производственные мощности (около половины от общих). Производственные операции Минатома распределены по четырем площадкам (одна из них – в Новоуральске – состоит из нескольких отдельных обогатительных модулей), так что авария на предприятии не приведет к значительному сокращению поставок. Кроме того, большие производственные мощности Минатома и его доступ к ВОУ позволяют создать стратегические резервы. США и Россия уже договорились использовать 15 т ВОУ (в дополнение к 500 т ВОУ, разбавляемых по соглашению 1993 г., см. ниже) для создания такого стратегического резерва. Однако, Конгресс США отказался предоставить фонды для реализации этого проекта в бюджете 2004 г.²⁶

РОССИЙСКО-АМЕРИКАНСКОЕ СОГЛАШЕНИЕ ПО ВОУ 1993 ГОДА

Разбавление ВОУ из демонтированного оружия в НОУ для поставки в Соединенные Штаты стало основной деятельностью российского обогащающего комплекса, и важным источником доходов для Минатома. Первоначальное предложение было внесено правительству США купить российский уран оружейного качества из демонтированного ядерного оружия в октябре 1991 г. физиком Томасом Неффом из Массачусетского технологического института. Формальные переговоры начались летом 1992 г. и в феврале 1993 г. правительства США и России подписали рамочное соглашение, определяющее задачи и область действия российско-американского соглашения по ВОУ. В соответствии с этим соглашением США приобретут по крайней мере 500 т ВОУ, извлеченного из российского ядерного оружия, в течение 20 лет. Материал будет преобразован в топливо с низкообогащенным ураном и продано коммерческим атомным электростанциям. Основной задачей соглашения было «обеспечение быстрой и безопасной утилизации для мирных целей высокообогащенного урана, освободившегося при сокращении ядерного оружия»²⁷.

Вслед за подписанием рамочного соглашения правительства США и России выбрали исполнительных агентов: обогатительную компанию Соединенных Штатов (USEC, в то время государственное учреждение; сегодня USEC является частной компанией) и предприятие Минатома «Тенекс». Стороны начали обсуждать контракт по начальной реализации и соглашение по прозрачности, определяющие детали реализации межправительственного соглашения. Остаток 1993 г. и почти весь 1994 г. были потрачены на переговоры по этим двум документам и на разрешение множества институциональных, экономических, политических и технических вопросов.

ского обогащенного урана, за исключением НОУ, полученного из ВОУ, поставляемого в рамках соглашения по ВОУ.

²⁵ Jean-Jacques Gautrot, "The Harmonious Market for Uranium Enrichment Services," presented at World Nuclear Association Annual Symposium, September 4—6, 2002, London; www.world-nuclear.org/sym/2002/pdf/gautrot.pdf.

²⁶ Daniel Horner, "Conferees Nix Plan to Fund Downblending of More Russian HEU," *Nuclear Fuel* (10 November 2003), 1, 14.

²⁷ "Russian-US. HEU Agreement," *Nuclear Fuel* (March 1, 1993).

Как только Минатом и его предприятия начали параллельно разрабатывать технологию и инфраструктуру разбавления ВОУ из оружия в НОУ для энергетических реакторов, возникла техническая проблема. Было обнаружено, что российский ВОУ, большая часть которого была произведена из переработанного урана из программы производства плутония, был загрязнен примесями актинидов и другими химическими примесями, представляющими проблемы по охране труда и по качеству, которые строго контролируются международными стандартами²⁸. Другую проблему представляли нежелательные изотопы урана-232 и урана-236, образованные в реакторе, а также высокая концентрация урана-234²⁹.

Решение, предложенное специалистами Минатома, заключалось в понижении концентрации примесей посредством радиохимической обработки ВОУ, и использование для разбавления урана из отвалов с пониженным содержанием урана-234, повторно обогащенного до 1,5 процента³⁰. (Разбавление ВОУ обогащенным ураном увеличивает количество конечной продукции, и, таким способом, увеличивает фактор разбавления).

Первоначальные производственные мощности были созданы в Северске (окисление и очистка) и Новоуральске (фторирование и разбавление) и разбавление промышленного масштаба началось в 1994 г. Первая поставка урана по российско-американскому соглашению по ВОУ была произведена в мае 1995 г. В 1995 г. в USEC было поставлено 156 т НОУ (полученных из 6,1 т ВОУ). В 1996 г. уровень разбавления увеличился до 12 т ВОУ. В 1997 г. Стороны согласовали контракт, в соответствии с которым 18 т ВОУ должно быть разбавлено и поставлено в USEC в 1997 г., 24 т в 1998 г., и 30 т в каждом последующем году. В 2002 г. контракт между USEC и «Тенекс» был продлен с покрытием поставок по 30 т ВОУ в год до 2013 г. для баланса соглашения³¹.

Инфраструктура производства развивалась по мере ускорения графиков поставок. В 1996 г. В Зеленогорске и Северске были введены в строй установки для фторирования и разбавления. В 1997 г. в Озерске были начаты пробные работы по окислению и очистке металлического ВОУ, и установка достигла своей проектной мощности в 15 т ВОУ в год (предположительно, как и в Северске) в 1998 г. В 1998 г. в работах по разбавлению ВОУ было за-

²⁸ Поскольку российский ВОУ изготавливается из переработанного урана, в нем содержатся следы трансурановых элементов (плутония, америция, кюрия) и продуктов деления. Дополнительные количества америция и плутония могли появиться из-за диффузии в металле в составных компонентах боеприпасов из ВОУ и плутония. Первоначально (в 1994 г.) российские эксперты предполагали, что приемлемым уровнем альфа-активности (от Pu-238/239 и Np-237) для НОУ, полученного из ВОУ, будет 0,1 Бк/г урана; предложенный предел для гамма-активности от продуктов деления был равен $1,1 \cdot 10^5$ МэВ/сек·кг урана; Michael Knapik, "ASTM to Develop New Standard for Blended-Down HEU from Weapons," *Nuclear Fuel* (28 March 1994).

²⁹ Образующийся в реакторе изотоп урана-232 представляет проблему для охраны труда, поскольку он распадается на висмут-212 и теллур-208, которые излучают гамма-кванты высоких энергий. В ядерном реакторе также образуется уран-236, который является нейтронным ядом, и его присутствие в ядерном топливе должно быть скомпенсировано более высоким уровнем обогащения ураном-235. Уран-234 является природным изотопом. Его концентрация в ВОУ, однако, относительно высока из-за предпочтительного обогащения легкими изотопами. Поскольку уран-234 является сильным гамма-излучателем, имеются ограничения на его концентрацию в уране. Предложение России заключалось в установлении следующих пределов для разбавленного ВОУ: 0,002 мкг U-232 на грамм урана и 11 000 мкг U-234 на грамм U-235 (предел, накладываемый ASTM C 996-90 для коммерческого урана, равен 10 000 мкг U-234 на грамм U-235), и 10 000 мкг U-236 на грамм U-235; там же.

³⁰ Если только ВОУ не разбавляется ураном, обедненным по урану-234 (таким, как уран, полученный из отвалов обогащения урана), концентрация урана-234 в полученном НОУ будет выше, чем у НОУ, полученного из природного урана.

³¹ Контракт покрывает только обогащенную компоненту продукта НОУ, поставляемого в USEC. Оплата компонента природного урана, содержащегося в НОУ, была серьезной проблемой на протяжении многих лет. Однако, в 2001 г. было достигнуто соглашение, по которому две западные компании (Cameco и Nukem) получают первое право для покупки урана. Кроме того, USEC возвращает использованную часть природного урана в Россию.

действовало примерно 8 000 человек³².

В настоящее время работы, связанные с разбавлением ВОУ, проводятся на каждом из четырех обогащающих предприятиях, а также на комплексе «Маяк» в Озерске (см. Приложение «Технология разбавления ВОУ и меры прозрачности»). Химические и металлургические заводы в Озерске и Северске, ранее построенные для изготовления компонентов ядерного оружия из ВОУ и плутония, проводят механическую резку и термическое окисление деталей из металлического ВОУ. Фторирование порошкового оксида ВОУ производится в Зеленогорске (предположительно из материала Озерска) и в Северске. Разбавление производится в Новоуральске, Зеленогорске и Северске. На каждом из четырех обогащающих предприятий производится также уран для разбавления, обогащенный до 1,5 процента.

Производство разбавителя

8 555 т обедненного урана (0,25%) + 5,34 миллиона ЕРР → 916,6 т 1,5% НОУ (отвалы 0,1%)

Разбавление ВОУ и степень обогащения

30 т 93% ВОУ + 916,6 т 1,5% НОУ → 946,6 т 4,4% НОУ = 5,52 миллиона ЕРР + 9 000 т природного урана

Согласно российским данным, на работы по разбавлению ВОУ приходится примерно 30 процентов работы разделения в России (28,9% в 2000 г.), или примерно 5,78 миллиона ЕРР в год. (Предполагая содержания урана-235 в сырье и в отвалах, равными 0,25% и 0,1%, можно получить произведенную работу примерно в 5,34 миллиона ЕРР в год. Возможно, расхождение связано с использованием сырьевого материала с содержанием урана-235 ниже 0,25%. Примечательно, что этот процесс утилизации, по-видимому, потребляет больше работы разделения, чем понадобится для производства того же количества НОУ из природного урана.) Количество работы разделения, требуемое для поддержки утилизации ВОУ, планируется поддерживать на том же уровне до завершения соглашения в 2013 г.

Возможно, соглашение по ВОУ было одним из наиболее важных двусторонних инициатив по нераспространению после холодной войны. Утилизация 500 т ВОУ – конечная цель соглашения – будет значительным достижением в нераспространении. (Хотя в краткосрочной перспективе обработка и перевозка больших количеств ВОУ создала дополнительный риск кражи материала и его отвлечения.) Соглашение по ВОУ уже принесло важные преимущества для нераспространения. Наиболее важно то, что оно стало источником стабильных и предсказуемых доходов для российского ядерного комплекса³³. Доходы от ВОУ сыграли важнейшую роль в предотвращении коллапса ядерного комплекса в середине 1990-х г.г. (что могло бы быть серьезнейшей угрозой для безопасности.) Они, вместе с другими поступлениями от работ по обогащению, оставались важными для поддержки социальной стабильности комплекса Минатома, российских внутренних усилий по сокращению инфраструктуры производства ядерного оружия, и программ по усилению защиты, контроля и учета ядерных материалов. Американские меры по подтверждению происхождения разбавленного урана из ВОУ были весьма успешными и создали важный прецедент в российско-американской ядерной прозрачности.

США и Россия должны изучить расширение соглашения за пределы согласованного количества в 500 т ВОУ, утилизацию которых планируется завершить в конце 2013 г. Дополни-

³² "Peaceful Atom in Private Hands Could Result in Economic Wars Abroad and a Full Collapse of the Industry at Home," *Rossiyskaya Gazeta* (5 June 1998), 4.

³³ Доходы от продажи НОУ направляются в российский бюджет (министерство финансов). Минатом, министерство финансов, министерство экономического развития и другие элементы российского правительства после этого договариваются о распределении доходов от ВОУ. Сообщают, что примерно 80% доходов остается в Минатоме, который, в свою очередь, возмещает расходы заводов, где производится разбавление, в размере стоимости производства плюс 20-25% премии. Оставшиеся средства Минатома размещаются в специальном фонде Минатома, который используется для покрытия накладных расходов Минатома, а также для поддержки конверсии оборонной конверсии, ядерной безопасности и сохранности, социальной защиты, и программ, оных для отрасли.

тельные количества ВОУ, затрагиваемые новым соглашением, могут лежать в пределах от 200 до 500 т ВОУ (некоторые рыночные аналитики пессимистически относятся к такому дополнительному соглашению из-за видимой нехватки разбавителя и собственных потребностей России в уране³⁴). Согласие России на заявление избытка и его утилизации таких больших количеств ВОУ может потребовать обоюдных мероприятий со стороны Соединенных Штатов. Может также потребоваться обмен данными о запасах ВОУ между двумя странами. Окончательное расширение соглашения по ВОУ, вероятно, потребует двусторонних соглашений по верификации отсутствия производства нового ВОУ для того, чтобы убедиться в том, что ни Россия, ни США не заменяют разбавляемый ВОУ новым материалом.

Повторное обогащение отвалов обедненного урана

Способность Минатома к повторному обогащению отвалов базируется на низкой стоимости производства и больших мощностях обогащения. Однако, повторное обогащение отвалов для Минатома значит больше, чем возможность использования своих недогруженных мощностей обогащения. Специалисты Минатома рассматривают отвалы как стратегический источник урана, который особенно важен из-за потери советского производства урана в Средней Азии и Украине и ожидаемого уменьшения производительности существующих урановых рудников в России. Повторное обогащение отвалов также критично для разбавления ВОУ по соглашению 1993 г.

Повторное обогащение урановых отвалов от прежних работа по обогащению началось в России в 1990-х г.г. Согласно единой программе развития атомной энергетики Минатома на 1993-2000 г.г. и до 2010 г., объем работ по повторному обогащению должен был увеличиться с 1,39 миллиона ЕРР в 1993 г. до 6,44 миллиона ЕРР в 2000 г. и оставаться на этом уровне до 2010 г.³⁵ План предусматривал начало работ с отвалов низкого качества (0,20 – 0,24% U-235) и постепенный переход на отвалы более высокого качества. (Однако, кажется, что еще в 1992 г. Минатом повторно обогащал свои отвалы с 0,36% U-235.) отвалы были использованы как для изготовления урана с 0,7% U-235 (как у природного урана), так и для обогащенного урана для российских реакторов.

Использование собственных отвалов для производства реакторного топлива было, однако, вскоре сокращено. Вместо этого в середине и конце 1990-х г.г. обогащающие предприятия начали повторно обогащать отвалы для производства разбавителя со степенью обогащения 1,5% для соглашения по ВОУ. В конце 1990-х г.г. Минатом подписал также контракты по обогащению отвалов с Urenco и Cogema. По этим контрактам эти компании поставляют в Россию 5 000 – 7 000 т обедненного урана (содержащего 0,3 – 0,35% U-235) в год³⁶. Россия возвращает 1 100 т урана, обогащенного до 0,711%; Cogema получает также 110 т урана, обогащенного до 3,5%. Остатки отвалов, по-видимому, используются Минатомом для поддержки соглашения по ВОУ.

Соглашение с Urenco/Cogema довольно выгодно для Минатома, поскольку оно предоставляет весьма нужные чистые отвалы для разбавителя по соглашению по ВОУ и является очень важным источником урана для Минатома (оцениваемого в 3 300 т эквивалента природного урана в год³⁷). Контракты также позволяют Минатому поддерживать производство на своих обогащающих предприятиях.

Согласно официальным российским данным, в 2000 г. для этой цели использовалось 12,9% российских мощностей по обогащению (2,58 миллиона ЕРР). (По оценкам западных аналитиков, на повторное обогащение отвалов затрачивается примерно 35% российских мощностей, соответствующих 7 миллионам ЕРР³⁸.) Такое широкое использование отвалов драматически уменьшит загрузку заводов, производящих UF₆ (до 10-15 процентов от их мощности)³⁹.

³⁴ См., например, "Top Ten Stories of 2003," *The Ux Weekly* (22 December 2003).

³⁵ "Integrated Nuclear Power Development Program for 1993-2000 and to 2010" (Minatom, 1992).

³⁶ Dr. Arthur Max, Nukem, частное сообщение, 2003 г.

³⁷ Там же.

³⁸ Там же.

³⁹ Nikolai Egorov, Vladimir Novikov, Frank Parker, and Victor Popov, (eds.), *The Radiation Legacy of the Soviet Nuclear Complex* (London: Earthscan Publications Ltd, 2000).

За вторичные отвалы, получающиеся после повторного обогащения импортных отвалов, отвечает Минатом. (На самом деле, основным мотивом для Urenco и Cogema при заключении контрактов на повторное обогащение с Россией, вероятно, было желание избавиться от отвалов.) Они, однако, составят довольно малую долю от собственных отвалов Минатома (которые оцениваются в 500 000 т). В настоящее время отвалы хранятся в стальных резервуарах на каждом из четырех обогащающих предприятий, и, согласно мнению российских специалистов, они могут безопасно сохраняться в течение более 100 лет. В 2000 г. Минатом работал над концепцией утилизации отвалов обедненного урана⁴⁰.

Планируется, что повторное обогащение отвалов (иностраных и собственных) останется одной из основных работ обогатительного комплекса и после 2010 г. и будет использовать большую часть из запланированного роста мощностей.

Доходы от обогащения урана

Работы по обогащению урана ежегодно приносят Минатому сотни миллионов долларов (728 миллионов долларов доходов в 2001 г.⁴¹). соглашение по ВОУ дает примерно 400 миллионов (считая, что Минатом получает только 80% от 450-500 миллионов долларов, уплачиваемых USEC российскому правительству) и является крупнейшим источником доходов (см. табл. 2⁴²). Экспорт услуг по обогащению для Западной Европы, Восточной Азии, и Южной Африки приносит примерно 300 млн. долл. Эта деятельность предположительно составляет наибольшую долю доходов Минатома от обогащения урана.

Повторное обогащение отвалов для Urenco и Cogema, вероятно, менее выгодно с финансовой точки зрения. Эти отвалы, однако, критичны для выполнения соглашения по ВОУ и являются значительным источником урана.

Производство обогащенного урана для изготовления топлива для поставленных Россией реакторов, вероятно, является менее значительным источником дохода для комплекса обогащения. Обогащительные заводы передают этот уран (в виде UF₆) на заводы концерна ТВЭЛ, изготавливающие топливо. Предположительно, ТВЭЛ возмещает обогащительным предприятиям стоимость производства (плюс умеренную прибыль) по ценам, устанавливаемым государством. Доходы ТВЭЛа от продажи реакторного топлива (464 млн. долл. В 2001 г.) учитываются в бюджете Минатома⁴³. Предполагая, что затраты на обогащение составляют 70% от стоимости топливного цикла, стоимость работы по обогащению для производства этого топлива может быть оценена примерно в 325 миллионов.

ЭКСПОРТ ТЕХНОЛОГИИ ЦЕНТРИФУГ

Финансовый кризис и разочарования 1990-х г.г. привели Минатом к проектам, включающим прямой экспорт российской центрифужной технологии. Проект в Китае был относительно успешным. Он был начат 18 декабря 1992 г. межправительственным соглашением «О кооперации при строительстве на территории КНР газового центрифужного завода для обогащения урана для атомной энергетики»⁴⁴. В марте 1993 г. стороны подписали генеральный контракт о сооружении центрифужного завода на 500 000 ЕРР в год на площадке вблизи Ханжонга в провинции Шэньси. В ноябре 1994 г. Минатом ввел в строй опытный центрифужный каскад для подготовки китайских рабочих. В декабре 1996 г. стороны подписали протокол к соглашению 1992 г. Протокол предусматривал расширение поставленных Россией

⁴⁰ Основными участниками этого проекта являются четыре обогатительных завода, центр ТРИНИТИ, Институт энергетических технологий (ВНИПИЭТ, Санкт-Петербург), Институт энергетических проблем. См. *Atompressa*, 44 (November 2000).

⁴¹ Oana Diaconu and Michael Maloney, "Russian Commercial Nuclear Initiatives and U.S. Nonproliferation Interests," *Non-proliferation Review* (Spring 2003): 97-112.

⁴² Контракт 2002 г. между USEC и Tenex устанавливает новую, более низкую цену. Вероятно, что уровень платежей России в результате заметно сократится.

⁴³ Oana Diaconu and Michael Maloney "Russian Commercial Nuclear Initiatives and U.S. Nonproliferation Interests," *Nonproliferation Review* (Spring 2003): 97-112.

⁴⁴ "Russia-PRC Nuclear Power Development Cooperation: Traditions, Real Results, Problems, and Prospects," *Atompressa*, 11 (March 1998).

мощностей до 1-1,5 миллиона ЕРР в год. В нем указывалось также, что предлагаемое увеличение будет реализовано не только за счет расширения завода в Шэньси, но и за счет строительства нового завода на 500 000 ЕРР в год в Ланчжоу. В марте 1997 г. На год раньше срока была введена в строй первая очередь завода в Шэньси (200 000 ЕРР в год). Вторая очередь завода в Шэньси (300 000 ЕРР в год) начала работу в августе 1998 г. Завод в Ланчжоу начал работу в 2001 г.; ожидается, что его мощность в будущем удвоится⁴⁵.

Табл. 2. Оценка доходов Минатома от работ по обогащению урана.

Работы	Продажа* млн. ЕРР/год	Цена, долл./ЕРР	Общий до- ход, млн. долл.	Производ- ство, млн. ЕРР/год	Стоимость производ- ства, млн. долл.**	Общая прибыль, млн. долл.
ВОУ-НОУ	5,5	90	495x0,8=396	5,8	116	280
Экспорт ЕРР	3,5	80***	280	3,5	70	210
Обогащение отвалов	2,6	20	52	2,6	52	0
Экспорт в це- лом	11,6		728	11,9	238	490
Топливо для поставленных Россией ре- акторов	5,3	61	325	8,1	162	163
Всего	16,9		1 023	20	400	653

* Различие между значениями для «продажи» и «производства» может отражать различие между контрактными обязательствами и реальным количеством проведенной работы для производства продукции. В случае соглашения по ВОУ значение для «продажи» является расчетным значением ЕРР для поставок НОУ, в то время как «производство» относится к работе Минатома для изготовления разбавителя.

** Стоимость производства рассчитывается на базе 20 долларов за ЕРР.

*** Рыночная цена за ЕРР при немедленной оплате наличными осенью 2003 г.

Построенные Россией центрифужные заводы в Китае, признанной ядерной державе, не являются значительной проблемой для нераспространения. Кроме того, в соответствии с трехсторонним соглашением между Россией, Китаем и МАГАТЭ, эти предприятия доступны для международного мониторинга. Фактически завод в Шэньси находится под гарантиями МАГАТЭ (см. текст в рамке). В 2001 г., однако, МАГАТЭ не хватило средств для проектирования монитора обогащения и потока, устанавливаемого в трубопроводах продукта и отвалов. Завод в Ланчжоу не находится под гарантиями МАГАТЭ из-за отсутствия средств и ресурсов. Минатом подписал также соглашение с комитетом по ядерной энергии Китая (СНЕС) по обращению с конфиденциальной информацией и защите оборудования и информации проекта и контракта⁴⁶.

Новоуральск и Ангарск являются основными предприятиями, занимающимися строительством китайских заводов. Проект довольно выгоден: в 1995 г. стоимость контракта (фактически стоимость завода в Шэньси) оценивалась в 150 млн. долл. Кроме того, контракт является частью пакетной сделки, по которой Китай согласился купить российские реакторы ВВЭР-1000 и 30% топлива для электростанции, которая строится в Китае Францией⁴⁷.

На китайских заводах используется старая технология центрифуг (возможно, пятого по-

⁴⁵ Platts Nov. 12, 2001; *Nuclear Fuel*, May 17, 1999.

(www.antenna.nl/wise/uranium/eproject.html#LANZHOUCENT).

⁴⁶ "Russia-PRC Nuclear Power Development Cooperation: Traditions, Real Results, Problems, and Prospects," *Atompressa*, 11 (March 1998).

⁴⁷ "Information," *Yaderny Kontrol*, 1 (January 1995).

колени) и она предназначена только для обслуживания внутренних потребителей⁴⁸. Согласно тогдашнему министру атомной энергии Виктору Михайлову, «в конце этого десятилетия (к 2000 г.) мы планируем перевести наши заводы на новое поколение центрифуг, которые будут обладать в 1,5-2 раза большей производительностью, чем те, которые мы поставили в Китай. Этой технологии уже 15 лет⁴⁹.» Некоторое секретное оборудование (не включающее центрифуги) закрыто для защиты проектной информации. Даже при этом передача технологии в Китай может оказать в долгосрочной перспективе отрицательное влияние на конкурентоспособность России на мировом рынке обогащения. Согласно российскому участнику проекта, «Мы делаем это на свой страх и риск; но деньги хорошие.⁵⁰».

ГАРАНТИИ МАГАТЭ ДЛЯ ПОСТРОЕННЫХ РОССИЕЙ ЦЕНТРИФУЖНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ*

Гарантии для поставляемых Россией центрифужных заводов являются значительным вызовом, поскольку «обогащительные заводы с российскими газовыми центрифугами спроектированы с гораздо большей степенью эксплуатационной гибкости по сравнению с другими заводами... Кроме того, гибкое расположение трубопроводов дает возможность обойти любой установленный прибор для мониторинга обогащения». Для того, чтобы создать подходящий режим мониторинга, Россия, Китай и МАГАТЭ организовали трехсторонний проект по обогащению. В подходе к гарантиям, разработанном в этом проекте, описаны три задачи гарантий на поставленных Россией центрифужных предприятиях: а) обнаружение производства ВОУ; б) обнаружение производства НОУ сверх объявленных количеств или степени обогащения; и в) обнаружение отвлечения природного урана или обедненного урана. Он предусматривает инспекции как внутри цеха каскада, так и вне его. Предлагаемые инспекции за пределами цеха включают:

- проверку записей и отчетов;
- учет и контроль UF₆ в баллонах для сырья, продукта, и отвалов;
- верификацию получений и отправок;
- верификацию заявленных передач на станции сублимации и десублимации;
- внезапный сбор образцов за пределами цеха.

Предлагаемые инспекции в цехе включают:

- визуальную проверку оборудования и площадки;
- внезапный сбор образцов в цехе;
- специальный сбор образцов частиц при помощи фильтров для сбора образцов (фильтров Кошелева);
- мониторинг потока продукции;
- непрерывный мониторинг обогащения;
- мониторинг работы разделения;
- применение локализации и наблюдения на станциях сублимации и десублимации и входных и выходных пунктах цеха.

*A. Panasyuk, A. Vlasov, S. Koshelev, T. Shea, D. Perricos, D. Yang, and S. Chen, "Tripartite Enrichment Project: Safeguards at Enrichment Plants Equipped with Russian Centrifuges," IAEA-SM-367/8/02 (IAEA, 2001).

Воодушевленный контрактом с Китаем, Минатом в начале и середине 1990-х г.г. искал аналогичные возможности в других местах. Однако, предлагаемы экспорт технологии в Иран вызвал трудности для Минатома и российского правительства. Намерение начать переговоры по контракту обогащительного завода было записано в протоколе встречи визита министра Минатома Виктора Михайлова в Тегеран в январе 1995 г.⁵¹ Российское правительство прекратило этот проект под давлением Соединенных Штатов и после того, как планы Мина-

⁴⁸ Сообщают, что Минатом продает Китаю свои старые центрифуги из излишних запасов. "Hanzhun Enrichment Facility" (<http://www.nti.org/db/china/hanzhun.htm>).

⁴⁹ Цитируется в "Information," *Yaderny Kontrol*, 1 (January 1995).

⁵⁰ Частное сообщение от российского эксперта по обогащению, июнь 2000 г.

⁵¹ Anton Khlopkov, "The Iranian Nuclear Program in the Russian-American Relations" (PIR Center: Moscow, 2001).

тома стали известны.

В самом деле, центрифужная технология представляет особую проблему для нераспространения. Высокая разделительная способность индивидуальных центрифуг, малые запасы материала в процессе, и низкие требования к потреблению энергии и охлаждению делают ее предпочтительной технологией для небольшой секретной обогатительной установки. Из-за модульной конструкции завода и короткого времени установления равновесия в каскаде центрифужная технология обогащения также подходит для несанкционированного производства ВОУ на формально гражданском обогатительном предприятии. Заводы российской конструкции, как сообщают, могут быть особенно подозрительными из-за относительно простой реконфигурации каскадов, которая может быть достигнута манипуляцией с клапанами.

Имеется опасность того, что Россия, с десятками тысяч специалистов по центрифугам, огромной научно-исследовательской и производственной базой, и большими запасами центрифуг, вспомогательного оборудования, и компонентов, может стать источником оборудования и «ноу-хау» для стран, стремящихся получить ядерное оружие. (Фактически, появились обвинения, которые были опровергнуты Минатомом, в том, что российские организации, вместе с Китаем и Пакистаном, были основными поставщиками для иранской программы по центрифугам⁵².) Российское правительство предпринимает усилия для укрепления своего экспортного контроля. Техническая поддержка в этой области предоставляется Санкт-Петербургским центром Центротех-ЭХЗ, который работает вместе с лабораториями экспортного контроля Минатома в Физико-энергетическом институте (ФЭИ, Обнинск) и Институте технической физики (ВНИИТФ, Снежинск). Российское правительство также стремится предотвратить несанкционированную передачу технологии центрифуг. Например, в 2000 г. оперативники регионального управления ФСБ в Челябинске задержали гражданина Китая, пытавшегося купить документацию и оборудование для центрифуг у работников российского обогатительного предприятия на Урале⁵³.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В течение периода в 50 лет Советский Союз (и теперь Россия) разрабатывал высокоэффективную технологию обогащения урана с помощью центрифуг и создал большой научно-исследовательский и промышленный комплекс для производства обогащенного урана для ядерного оружия (в прошлом) и ядерных реакторов. Комплекс обогащения является важнейшей частью российского ядерного комплекса и будет сохранять свое значение для экономики России. Из-за своей роли в российско-американском соглашении 1993 г. по ВОУ, глобальных ядерных рынках, и усилий по контролю распространения технологии обогащения на центрифугах российские предприятия по обогащению имеют большое значение для международной безопасности. Возможно, наиболее эффективным способом использования его положительного потенциала и обеспечения его прозрачности для Запада, а также прекращения отрицательного развития (такого, как неконтролируемый экспорт технологии центрифуг) является более полная интеграция российского обогатительного комплекса в западный ядерный рынок. Такая интеграция может включать устранение торговых барьеров, стратегическое партнерство с основными западными компаниями по обогащению урана, продление разбавления ВОУ за 2013 г., новые инициативы по прозрачности (такие, как инициатива по отсутствию изготовления ВОУ), и строительство поставленных Россией установок по обогащению с международным управлением в западных странах. Стратегический курс такой интеграции будет служить интересам международного нераспространения и энергетической безопасности и облегчит экономическую и политическую интеграцию России в западный мир.

Приложение ТЕХНОЛОГИЯ РАЗБАВЛЕНИЯ ВОУ И МЕРЫ ПРОЗРАЧНОСТИ

⁵² "Russia ID'd as an Iran Atomic Supplier," Associated Press (20 November 2003); "Minatom Denies Russian Participation in Supplying Iran with Equipment for Enriching Uranium," Interfax (20 November 2003). Статьи доступны по адресу ([www.ransac.org/Projects and Publications/News/NuclearNews/1120200343218PM.html#2G](http://www.ransac.org/Projects_and_Publications/News/NuclearNews/1120200343218PM.html#2G)).

⁵³ "People in the South Urals Phone the FSB," *Chelyabinskii Rabochii* (27 October 2000).

Технология преобразования ВОУ в НОУ

В работах по разбавлению по соглашению 1993 г. по ВОУ используется процесс с UF_6 . Основными этапами этого процесса являются размельчение, очистка, фторирование, и разбавление низкообогащенным UF_6 .

Основными этапами процесса окисления являются следующие. Компоненты оружия размельчаются в стружку, берутся и анализируются образцы материала. Стружка ВОУ окисляется в специальных печах, оксид размалывается и просеивается для получения однородного порошка. Берутся образцы порошка, и, если уровень примесей является неприемлемым, то производится очистка в процессе растворения и экстракции. (Может понадобиться не один цикл растворения и экстракции.) Перед транспортировкой на установку фторирования чистый оксид перегружался в транспортные контейнеры (приблизительно по 6 килограммов в контейнере) и взвешивался. Транспортные контейнеры помещались в дополнительную опечатываемую тару и тяжелые защитные устройства для перевозки по железной дороге.

На установке фторирования порошок оксида ВОУ получается и взвешивается. Проводится анализ качества образцов материала. Оксид ВОУ фторируется в пламенных реакторах и UF_6 конденсируется в 6-литровых сосудах. Жидкий UF_6 переводится в 12-литровые сосуды, взвешивается и анализируется для определения концентрации U-235. Шлаки ВОУ, которые образуются при фторировании, отправляются обратно на установку окисления для извлечения ВОУ.

12-литровые сосуды перевозятся на завод обогащения, где высокообогащенный UF_6 направляется в устройство с Т-образными трубами для смешивания с UF_6 , обогащенным до 1,5%. После смешивания образующийся НОУ в виде UF_6 закачивается в устройство десублимации. После взятия образцов НОУ загружается в стандартные баллоны 30-B для отправки в Соединенные Штаты.

Прозрачность в процессе разбавления ВОУ

Рамочное соглашение 1993 г. потребовало заключения соглашения о прозрачности, которое должно было «установить меры прозрачности для обеспечения выполнения задач соглашения». В частности, эти задачи заключались в том, чтобы обеспечить разбавление ВОУ из оружия до НОУ, и что эта продукция будет переработана в топливо для коммерческих реакторов, а не будет переработана в программе ядерного оружия США.

Процесс установления эффективного режима прозрачности был трудным. В Соединенных Штатах ключевым вопросом было подтверждение того, что (а) материал, входящий в устройство для разбавления, действительно представлял собой ВОУ, и (б) что он произошел из ядерного оружия, а не из других не оружейных запасов. (В настоящее время США согласны покупать любой металлический ВОУ, который не был недавно произведен⁵⁴.) В России основной практический интерес, по-видимому, был связан с изучением деталей процессов, применяемых изготовителями топлива в США.

После того, как в сентябре 1993 г. и марте 1994 г. были подписаны меморандум о взаимопонимании и протокол по прозрачности, был организован комитет по анализу прозрачности (КАП), который впервые собрался в сентябре 1994 г. для обсуждения специфических соглашений. Было решено, что КАП будет предоставлен один год для разрешения имеющихся проблем. Если к этому времени не будет получен результат, то уровень обсуждений будет поднят до политического. Если на политическом уровне не будет принято приемлемого решения, то правительства США и России соответственно укажут USEC и Тенекс не выпускать и не принимать заказы на поставку.

⁵⁴ Одним из предложенных критериев оружейного происхождения ВОУ является его возраст. Указывают, что возраст ВОУ может быть определен по измерениям содержания дочерних продуктов U-234 и U-235, соответственно, Th-230 and Pa-231, сначала химическим отделением и затем их измерением при помощи альфа-спектрометрии. (A. R. Moorthy and W. Y. Kato, "HEU Age Determination," paper presented at the 35th Institute of Nuclear Material Management Annual Symposium, Naples, FL, July 17—20, 1994.)

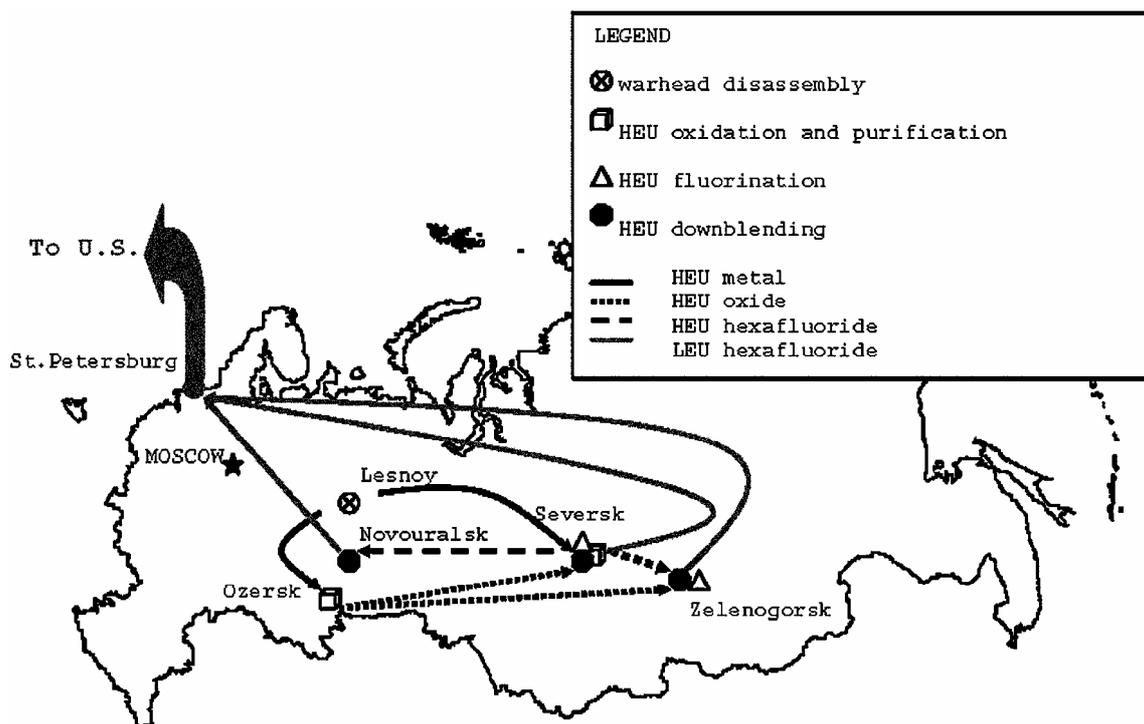


Рис. 3. Карта потоков продукции при переработке ВОУ в НОУ в России. Надписи на карте (сверху вниз): 1 – в США; 2 – Санкт-Петербург; 3 – Москва; 4 – Лесной; 5 – Северск; 6 – Новоуральск; 7 – Озерск; 8 – Зеленогорск. Текст на легенде (сверху вниз): 1 – легенда; 2 – демонтаж боеприпасов; 3 – окисление и очистка ВОУ; 4 - фторирование ВОУ; 5 – разбавление ВОУ; 6 – металлический ВОУ; 7 – оксид ВОУ; 8 – гексафторид ВОУ; 9 - гексафторид НОУ.

Реализация эффективных мер по прозрачности оставалась практически заторможенной до июня 1995 г., когда на пятой встрече Гора-Черномырдина не было подписано совместное заявление о мерах прозрачности (многие аналитики полагают, что нуждавшийся в деньгах Минатом принял некоторые из предлагаемых мер по прозрачности в обмен на аванс в 100 млн. долл. по соглашению по ВОУ). Заявление позволило сторонам допуск на предприятия, участвующие в работах по соглашению. На четвертом совещании КАП в апреле 1996 г. стороны разрешили оставшиеся разногласия, относящиеся к измерениям ВОУ и доступу, и согласовали 14 приложений к протоколу по прозрачности, в которых было представлено детальное описание режима прозрачности (впоследствии количество приложений было увеличено из-за подключения к процессу разбавления новых российских предприятий).

Основными компонентами режима были ознакомительные визиты, посещения для специального мониторинга, постоянные инспекторы на российских предприятиях и на заводе в Портсмуте, штат Огайо. Ознакомительные визиты служили для обмена и подтверждения информации по технологии переработки и процедурам учета на принимающей площадке, и для определения специфических мер по прозрачности и требований к ним. Ознакомительные визиты на российские и американские предприятия начались в 1993 г.

Посещения для специального мониторинга конкретного предприятия происходят каждые несколько месяцев. Первый такой визит состоялся в 1996 г. В том же году были организованы постоянные представительства в Новоуральске и Портсмуте. Впоследствии постоянные представительства были организованы и на других российских предприятиях, участвующих в работах по разбавлению.

Согласно специалисту из Ливерморской лаборатории, во время специального мониторинга на установке окисления инспекторы США «могут наблюдать за всей процедурой окисления, от начала, когда металлический уран анализируется портативными гамма-

спектрометрами для подтверждения его оружейного качества, при его загрузке и выгрузке из установки окисления, до окончательного анализа выгружаемого оксида»⁵⁵. Инспекторы также прикрепляют метки на контейнеры с оксидом ВОУ перед его отправкой на предприятие для разбавления⁵⁶.

На предприятиях, занимающихся разбавлением, как специальные, так и постоянные инспекторы «имеют право проверять и опечатывать контейнеры с оксидом ВОУ..., запас хранящихся контейнеров с оксидом ВОУ и гексафторидом ВОУ, посещать пункт разбавления, наблюдать взятие и анализ образцов из пункта разбавления, записывать показания давления для измерения потока урана в пункте разбавления, и наблюдать за наложением американских меток и печатей на измерительных диафрагмах в трубопроводах пункта разбавления»⁵⁷. Как специальные, так и постоянные инспекторы имеют доступ к данным учета материалов, относящихся к реализации соглашения по ВОУ 1993 г. Кроме того, с 1999 г. США установили на российских предприятиях, занимающихся разбавлением, приборы для неразрушающего анализа без вмешательства. Система мониторинга разбавления устанавливается на каждом из трех каналов устройства разбавления и измеряет степень обогащения газообразного UF₆. Система основана на активации потока расщепляющихся материалов нейтронами с последующей регистрацией излучения, образующегося в продуктах деления.

⁵⁵ P. Herman et al. "Sharing the Challenges of Nonproliferation," *Science and Technology Review* (September 1997): 14-23.

⁵⁶ В Портсмуте российские мониторы подтверждают получение контейнеров 30-B с низкообогащенным UF₆, хранение контейнеров, извлечение и анализ образцов, и данные MC&A. См. Wilson Dizard III, "Enrichment News," *Nuclear Fuel* (18 November 1996): 4.

⁵⁷ Andrew Bieniawski and Vladislav Balamutov, "HEU Purchase Agreement," *Journal of Nuclear Materials Management* (February 1997): 7—8.