

## ИНТЕГРАЦИЯ УРАНА ИЗ ЯДЕРНОГО ОРУЖИЯ В ГРАЖДАНСКИЙ ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ

*Томас Л. Нефф*

Согласно недавно заключенному соглашению Россия предположительно продаст Министерству энергетики США около 500 тонн высокообогащенного урана, высвобождающегося при демонтаже ядерного оружия в течение ближайших двадцати лет. Этот уран может быть смешан с природным или с обедненным ураном для получения слабообогащенного урана для реакторного топлива. Эта операция позволит сократить очень большое потребление электроэнергии на газодиффузионных заводах по обогащению урана в США. Продажа урана может быть организована таким образом, чтобы минимизировать нарушения рынка урана и принести выгоду как России, так и США.

Вариант этой статьи был впервые представлен на ежегодном симпозиуме Уранового института 10 сентября 1992 года и опубликован в журнале NUKEM в октябре 1992 года. Эта статья печатается с разрешения журнала NUKEM.

Томас Л. Нефф работает в Центре международных исследований Массачусетского технологического института, Кембридж, Массачусетс, США.

### ВВЕДЕНИЕ

С самого начала ядерной эры в странах Запада были предприняты очень большие усилия для установления барьера между использованием атомной энергии в военных и в мирных целях. В последние годы этот барьер был существенно испорчен из-за действий в гражданском коммерческом секторе, которые привели к дальнейшему распространению ядерного оружия и способностей к его созданию. В самое последнее время коллапс бывшего Советского Союза и окончание холодной войны началась эрозия исторического барьера с другой стороны и возникла потенциальная угроза распространения ядерных материалов и технологических знаний из программ создания ядерного оружия.

Задним числом понятно, что разделение между использованием атомной энергии в военных и в мирных целях не имело технических оснований, а представляло собой организационно-геополитическое мероприятие, которое в основном касалось Запада; в Советском Союзе такого разделения не наблюдалось. После эрозии разделяющего барьера на Западе и коллапса Советского Союза потребуются восстановление режима ядерной безопасности. При этом экономические факторы, которые, возможно, станут основной силой в коллапсировавшем Союзе, должны играть решающую роль. Главная задача состоит в том, чтобы направить и технические, и коммерческие возможности

в одну сторону - к нераспространению ядерного оружия и всеобщей безопасности.

Для этой цели мы должны найти такие решения, которые бы до возможного предела придали экономическим инициативам международный характер. Такие инициативы есть: это массивные инвестиции в оборонные отрасли промышленности для их перевода на производство коммерческой продукции. И даже в тех случаях, когда такой перевод невозможен, необходимые затраты на демонтаж и очистку окружающей среды будут более доступны, если проблемы военного и мирного характера будут решаться параллельно. Короче говоря, мы нуждаемся в новой структуре безопасности и коммерческих инициатив, которые должны получать движущий импульс с обеих направлений.

Сокращение ядерных вооружений, которое высвобождает как плутоний, так и высокообогащенный уран, является дорогостоящим процессом. В то же самое время многие страны производят большие затраты на работы по гражданскому топливному циклу атомной энергетики. Можно ли найти такие пути, которые позволили бы уменьшить общие расходы общества на обе эти цели?

Мы постараемся показать в этой статье, что на этот вопрос можно дать положительный ответ, но пути к нему не так просты, и следствия принятых решений не столь очевидны, как это представляется некоторым представителям коммерческих

кругов. Так, например, часто полагают, что действия правительства по демонтажу боеголовок, проводящиеся за счет налогоплательщиков, автоматически приведут к появлению на рынке дешевого (или даже бесплатного) урана (в том числе обогащенного) из запасов высокообогащенного урана, извлеченного из ядерного оружия. Это не так: высокообогащенный уран будет продаваться, и по довольно высокой цене, для того чтобы скомпенсировать затраты по демонтажу ядерных боеголовок. Что следует сделать, так это найти общую стратегию минимизации стоимости, которая удовлетворила бы все стороны.

### ВЫСОКООБОГАЩЕННЫЙ УРАН<sup>1</sup>

Возможный метод решения проблемы с высокообогащенным ураном из ядерного оружия был предложен автором более года назад<sup>2</sup> с целью усиления финансовых и политических механизмов обеспечения безопасного демонтажа ядерных боеголовок бывшего Советского Союза. В последующем этот подход был развит в консультациях между российским и американским правительствами. В самом деле, высокообогащенный уран из ядерных боеголовок США или бывшего Советского Союза может быть использован для снижения электропотребления газодиффузионных заводов, которые до сих пор остаются основным источником поставки ядерного топлива для западных атомных электростанций. Соглашение на основе этой идеи было предварительно одобрено правительствами России и США в сентябре 1992 года. Оно предусматривает использование примерно 500 тонн российского высокообогащенного урана комплексом по обогащению урана Министерства энергетики США (или его преемника) в течение последующих двадцати лет.

На рис. 1 показана общая схема операций американского комплекса обогащения урана (не учитывающая высокообогащенного урана и некоторых других усложнений). Ежегодно, согласно действующим контрактам, компании по производству электроэнергии поставляют Министерству энергетики США 19 500 тонн природного урана. Министерство производит работу по обогащению в размере 11 миллионов единиц SWU и поставляет заказчику около 2 400 тонн слабообогащенного урана (со степенью обогащения 3,6 процента) для изготовления топлива для реакторов, оставляя на своих складах обедненный уран с содержанием урана-235 в 0,3 процента. На самом деле реальная схема несколько сложнее из-за стремления Министерства энергетики к

снижению стоимости процесса, но в целом эта простая схема правильна.

Теперь предположим, что часть продукта, поступающего к производителям электроэнергии, может быть получена при смешивании высокообогащенного урана (с содержанием урана-235 в 93,5 процента) с природным или обедненным ураном. Как показано в верхней части рис. 2, при смешивании 10 тонн высокообогащенного урана с природным ураном можно получить 321 тонну слабообогащенного урана (или 13 процентов от общего объема поставок Министерства энергетики). Это позволит сократить работу разделения на 1,45 миллиона единиц SWU и сократить потребление электроэнергии на 3,6 миллиарда киловатт-часов. Если сэкономленная стоимость работ по разделению для Министерства энергетики составляет 50 долларов на единицу, то общая экономия составит около 70 миллионов долларов, или около 7 тысяч долларов на килограмм высокообогащенного урана.

Из этой суммы следует вычесть затраты на операции по обращению с высокообогащенным ураном и его смешиванию с природным ураном. Оценки этих затрат довольно неопределенны и лежат в пределах от 2 000 до 3 000 долларов на килограмм высокообогащенного урана. Если принять среднюю оценку (2 500 долларов на килограмм), то реальная стоимость высокообогащенного урана для коммерческого использования составит примерно 4 500 долларов за килограмм.

Тем не менее, эта картина не полна. По контрактам с Министерством энергетики производители электроэнергии должны поставить около 2 300 тонн природного урана, который может быть заменен при использовании высокообогащенного урана (за исключением небольшого количества, используемого для разбавления). На схеме рис. 2 предполагается, что этот уран поступает в запасы Министерства энергетики.

Однако, можно представить себе лучшее использование этого дополнительного запаса урана, которое позволит заметно повысить эффективную коммерческую стоимость высокообогащенного урана. Если этот дополнительный уран будет использован в процессе обогащения, то он позволит уменьшить количество работы разделения изотопов и количество потребляемой электроэнергии. В этом случае степень обеднения отходов процесса разделения может быть меньшей (иначе говоря, в обедненном уране после обогащения останется не 0,3 процента урана-235, а больше). Зависимость характеристик процесса разделения изотопов

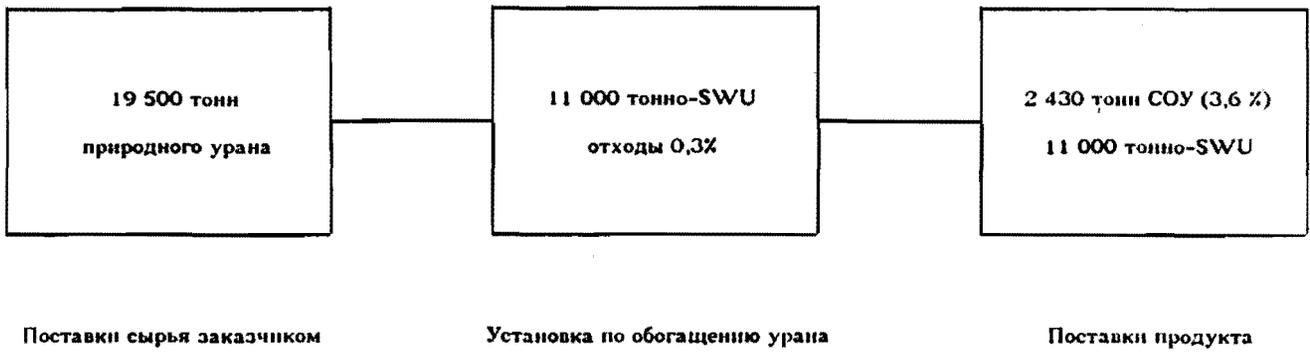


Рисунок 1  
Базовые операции американского комплекса обогащения урана.

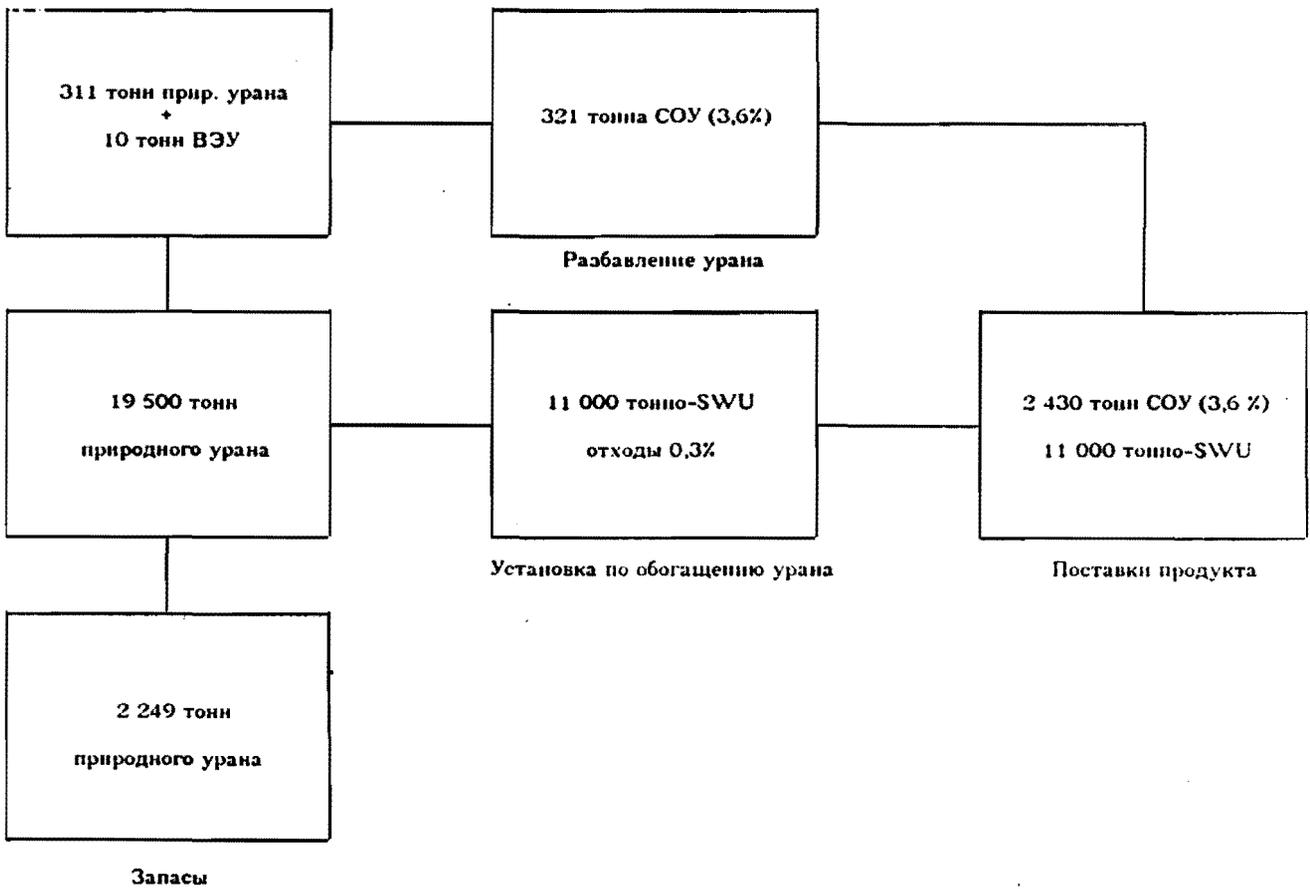


Рисунок 2  
Разбавление высокообогащенного урана природным с заменой 1452 тонн слабообогащенного урана.

от содержания урана-235 в отходах показана на рис. 3. Расчеты показывают, что для утилизации дополнительных запасов урана в процессе разделения следует повысить содержание урана-235 в отходах до 0,355 процента.

Схема такого процесса показана на рис. 4. С ее помощью мы можем оценить дополнительный выигрыш средств и новое значение коммерческой стоимости высокообогащенного урана. В результате этого изменения можно сэкономить еще 2,4 миллиона единиц работы разделения (на миллион больше, чем в результате простого разбавления). При принятой нами стоимости единицы работы разделения в 50 долларов изменение схемы принесет еще 45 миллионов долларов, или по 4 500 долларов на килограмм высокообогащенного урана. Эта величина является чистой прибылью, поскольку стоимость операций с высокообогащенным ураном уже была учтена на предыдущем этапе.

Общая сводка экономии в результате двух процессов приведена в табл. 1. Суммарная экономия от использования 10 тонн высокообогащенного урана превысит 90 миллионов долларов, или более 9 тысяч долларов за килограмм высокообогащенного урана. Эти деньги могут быть использованы Россией для компенсации затрат на демонтаж ядерных боеголовок, или на другие цели (например, на повышение безопасности ядерных энергетических реакторов).

Текущие американские планы связаны с покупкой высокообогащенного урана у России за счет денег, сэкономленных на комплексе по обогащению урана. Следовательно, такая покупка должна не оказывать

влияния на бюджет и должна быть основана на экономии расходов. На практике расчеты экономии расходов неоднозначны и перепутаны с правилами государственного финансового учета и с прямыми затратами на электроэнергию. В зависимости от способа расчета принятая нами цена единицы разделения в 50 долларов может оказаться либо несколько высокой, либо слишком малой. Министерство энергетики или Управление менеджмента и бюджета, может быть, станут применять для расчета экономии несколько иные формулы. Поэтому принятая эффективная стоимость высокообогащенного урана может оказаться либо больше, либо меньше принятой здесь величины.

Тем не менее, участникам рынка ядерного топлива следует понимать, что более половины эффективной стоимости высокообогащенного урана появляется из-за повышения содержания урана-235 в отходах, и что это обстоятельство определяет общую эффективность процесса. Как показано в табл. 1, прямой вклад разбавления урана составляет менее половины эффективной стоимости. Таким образом, указанная сделка не может иметь коммерческого успеха без включения дополнительного количества природного урана в процесс обогащения.

Те, кто смотрит на сделку с высокообогащенным ураном как на высвобождение урана и на увеличение предложения на рынке, ошибаются. Если уран переместится на рынок, то экономические и политические реалии не позволят американско-российской сделке реализоваться в полном объеме.

Как видно из табл. 1, эквивалентная оплата за высокообогащенный уран при принятой нами стоимости единицы работы

Таблица 1

Расчеты эффективной стоимости высокообогащенного урана по экономии средств<sup>1</sup>

Источник средств	Экономия в SWU млн. ед.	Стоимость млн. долл.	Удельная стоимость долларов/кг
Разбавление	1,452	72,6	7 260
Затраты		-25,0	-2 500
Итого	1,452	47,6	4 760
Переполнение	0,910	45,5	4 550
Всего	2,362	93,1	9 310

<sup>1</sup> Предположения: стоимость одной единицы SWU 50 долларов; общий объем работ разделения 11 миллионов единиц; объем высокообогащенного урана 10 тонн с содержанием урана-235 в 93,5 процента; затраты производятся на преобразование, перевозку и смешивание.

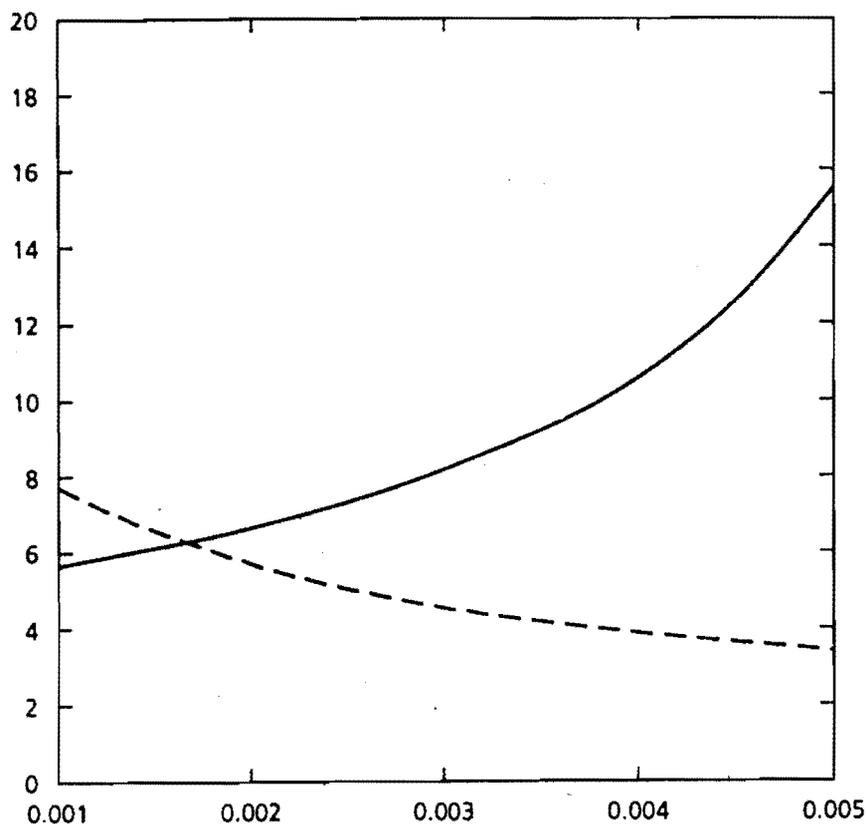


Рисунок 3  
Затраты сырья и работы по разделению изотопов на килограмм слабообогащенного урана при различном содержании урана-235 в отходах.

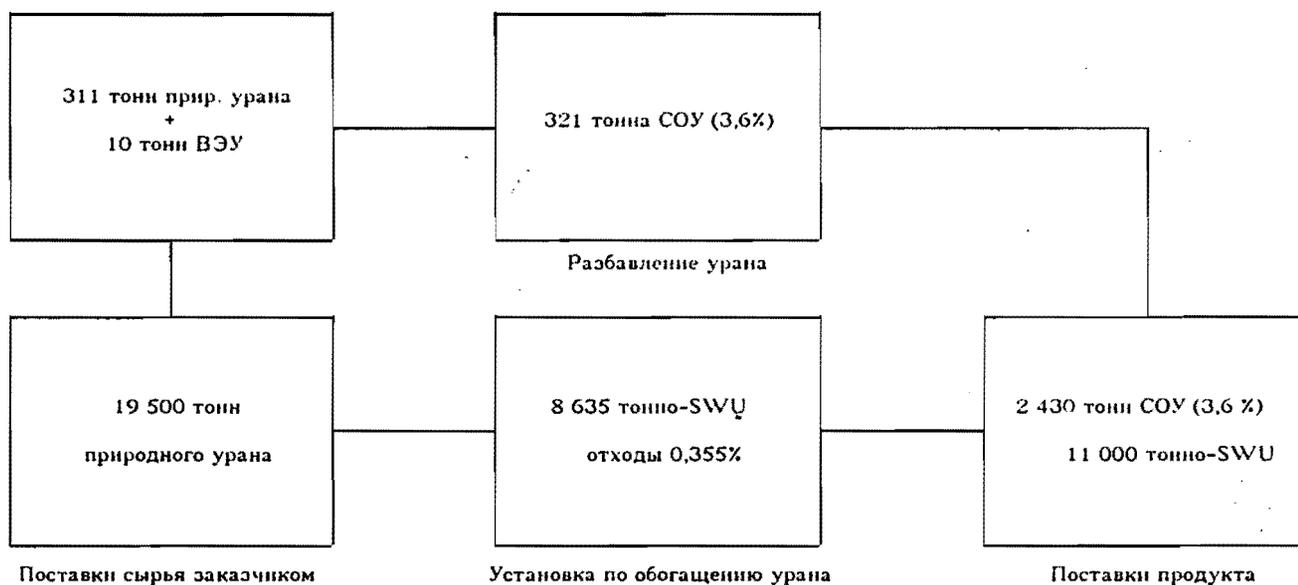


Рисунок 4  
Разбавление высокообогащенного урана природным с высвобождением работ по разделению изотопов в 2362 тонно-SWU.

разделения в 50 долларов будет соответствовать той же величине за единицу работы разделения и примерно 8 долларам за фунт окиси урана (примерно 45 миллионов долларов за 2 300 тонн природного урана). Россия может сама разбавить свой высокообогащенный уран и продавать его на свободном рынке, но влияние большого объема таких продаж (особенно при ограниченном спросе на слабообогащенный уран) может привести к падению цен до уровня, меньшего поучаемого от Министерства энергетики при принятом уровне экономии.

Россия и США одинаково заинтересованы в снижении влияния ядерного разоружения на рыночную ситуацию для того, чтобы не поставить под угрозу их регулярные поставки урана и услуг по разделению изотопов, и сохранить от депрессии и безработицы соответствующие отрасли промышленности.

Наиболее примечательным в сделке по высокообогащенному урану является то, что она позволяет совместить утилизацию российского высокообогащенного урана с коммерческой деятельностью комплекса обогащения урана Министерства энергетики США таким образом, чтобы учесть интересы обеих сторон, а также то, что она может быть реализована без существенного вреда для уранового рынка. Примечательно также то обстоятельство, что использование высокообогащенного урана по ценам, определяемым по принципу экономии

средств, не нарушит конкурентной структуры отрасли услуг по обогащению урана, поскольку цены Министерства энергетики существенным образом не изменятся.

Если объемы поставок высокообогащенного урана увеличатся, то использовать комбинацию указанных методов для понижения стоимости станет сложнее (но не совсем невозможно, как с технической, так и с экономической точек зрения). При объеме поставок в 30 тонн высокообогащенного урана в год нужно будет повысить содержание урана-235 в отходах до 0,46 процента и понизить работу разделения изотопов на 5,5 миллиона единиц в год. В прошлом заводы Министерства энергетики США работали при таких параметрах, но сокращение объемов работ в дальнейшем может привести к закрытию заводов в Портсмуте или в Падьюке. Однако, если Министерство энергетики будет увеличивать объемы работ по разделению изотопов, или будет накапливать запасы природного урана, объемы утилизации высокообогащенного урана могут быть даже увеличены.

#### ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Доклад автора в Урановом институте включал раздел с обсуждением утилизации плутония, который исключен из настоящей статьи.
2. *New York Times*, 24 October 1991 (O; Ed).