

3. ОБОГАЩЕНИЕ УРАНА

Комплекс производственных процессов, производимых для повышения процента ^{235}U в установленном количестве урана называется «обогащением урана». Здесь термин «обогащение» означает повышение процента расщепляющегося изотопа ^{235}U .

Как уже упоминалось, природный уран содержит всего 0,7% ^{235}U – единственного изотопа, делящегося нейтронами любых энергий. Существуют атомные реакторы, работающие на природном уране, но даже они в последнее время переводятся на обогащенный уран. В легководных ядерных реакторах обычно используют от 3 – 5% обогащение урана, т.е. доля ^{235}U в топливе составляет 3 - 5%, а остальная часть состоит из ^{238}U . Вещество с таким уровнем содержания ^{235}U называется «низкообогащенным ураном» или НОУ. В реакторах на быстрых нейтронах обогащение урана достигает 40%. Для создания атомной бомбы содержание ^{235}U в уране должно быть выше 20%. Однако бомба из урана, обогащенного в такой минимальной степени, слишком объемна для доставки, поскольку требуется огромное количество урана и еще большее количество обычных взрывчатых веществ для его сжатия в сверхкритическую массу. В развитых странах для создания ядерного оружия применяется уран, в котором содержится не менее 90% ^{235}U . Такой уран называется высокообогащенным ураном или ВОУ. Атомная бомба, уничтожившая Хиросиму 6 августа 1945 года, была создана из 60 кг ВОУ. Высокообогащенный уран также применяется в исследовательских и морских ядерных реакторах - на авианосцах и подводных лодках.

В связи с потребностью в обогащенном уране, разделение изотопов урана и обогащение топлива по урану-235 является важным этапом уранового варианта ЯТЦ.

Разделение изотопов различных элементов (в том числе – урана) мы подробно рассмотрели в лекции 7. Здесь мы остановимся деталях промышленного производства.

3.1. Оборудование и устройства для разделения изотопов

Оборудование по разделению каких-либо изотопов представляет собой все механические, тепловые или электрические устройства и установки, специально предназначенные для обогащения химических элементов или соединений этих элементов в один из их изотопов или для полного разделения образующих изотопов. К важнейшим из них относятся установки по производству тяжелой воды (оксид дейтерия) или для обогащения урана в уран 235.

Устройства и установки для производства тяжелой воды путем обогащения природной воды включают в себя:

- (1) Специальную установку для фракционной перегонки и ректификации, содержащую очень большое количество пластин, размещенных группами и каскадно, и в которой используется небольшое различие в точках кипения тяжелой воды и нормальной воды для получения головных фракций, которые последовательно все более обедняются тяжелой водой, и хвостовых фракций, все более обогащенных ею.
- (2) Установку, которая путем низкотемпературной фракционной перегонки жидкого водорода, отделяет дейтерий, который затем сжигается для получения тяжелой воды.
- (3) Устройство для производства тяжелой воды или соединений дейтерия на основе изотопного обмена, иногда в присутствии каталитического агента, например, методом "двойной температуры" или путем контакта различных жидких или газовых водородных фаз.
- (4) Электролитические ячейки, предназначенные для производства тяжелой воды путем электролиза воды, и устройство, соединяющее электролиз с изотопным обменом между полученным водородом и самой исходной водой.

Для обогащения урана в уран 235 часто используются следующие устройства:

- (1) Специальные центрифуги, называемые "газовыми" (по гексафториду урана) центрифугами, чей цилиндрический ротор ("корзина"), выполненный из пластмассы или стали, вращается с очень высокой скоростью. Внутренние поверхности этих центрифуг подвергаются специально обработке для повышения сопротивляемости коррозионному воздействию гексафторида урана. На практике используется очень большое количество блоков, расположенных каскадно и работающих в противоток или по потоку.
- (2) Сепараторы изотопов урана (газового диффузионного типа). В этих устройствах газообразный гексафторид урана делится на две фракции с несколько различным содержанием урана 235, по сравнению с исходным газом, посредством диффузии через пористую мембрану ("барьер") внутри диффузионной камеры (которая может иметь трубчатую форму). Путем многократного повторения этой операции можно получить чистый гексафторид урана 235.
- (3) "Сопловое" устройство (процесс Беккера), в котором поток газа (гексафторид урана и гелий или водород) инжектируется с высокой скоростью в сопло, имеющее большую кривизну. "Снимающая" трубка на выходе отделяет обогащенную фракцию гексафторида урана. Сюда же относятся калютроны для электромагнитной сепарации.

К обогатительному оборудованию относятся также электролитные ячейки для производства фтора производительностью более 10 г фтора в час и специально предназначенные для них части и приспособления.

Конверсия обогащённого UF_4 в металлический уран осуществляется посредством его восстановления магнием (крупные партии) или кальцием (малые партии). Реакция осуществляется при температурах выше точки плавления урана ($1130^\circ C$).

Конверсия UF_6 в UO_2 может осуществляться посредством одного из трех процессов. В первом процессе UF_6 восстанавливается и гидролизуется в UO_2 с использованием водорода и пара. Во втором процессе UF_6 гидролизуется растворением в воде, для осаждения диураната аммония добавляется аммиак, а диуранат восстанавливается в UO_2 водородом при температуре $820^\circ C$. При третьем процессе газообразные UF_6 , CO_2 и NH_3 смешиваются в воде, осажая уранилкарбонат аммония. Уранилкарбонат аммония смешивается с паром и водородом при температуре $500-600^\circ C$ для производства UO_2 . Конверсия UF_6 в UO_2 часто осуществляется на первой ступени установки по изготовлению топлива.

Конверсия UF_6 в UF_4 осуществляется посредством восстановления водородом.

Конверсия UO_2 в UCl_4 может осуществляться посредством одного из двух процессов. В первом процессе UO_2 реагирует с четыреххлористым углеродом (CCl_4) приблизительно при температуре $400^\circ C$. Во втором процессе UO_2 реагирует приблизительно при температуре $700^\circ C$ в присутствии газовой сажи, окиси углерода и хлора для производства UCl_4 .

3.2. Обогащительные заводы

На практике разделение изотопов урана и обогащение урана изотопом ^{235}U поводится на специальных обогащительных заводах.

У всех пяти ядерных держав-участниц Договора о нераспространении ядерного оружия (ДНЯО) - США, России, Великобритании, Франции и Китая - есть заводы по обогащению урана, которые когда-то использовались (местами используются и сейчас) для производства оружейного высокообогащённого урана (ВОУ). Кроме того, все эти государства обладают полномасштабными обогащительными производствами низкообогащённого урана (НОУ), применяемого в качестве топлива для промышленных ядерных реакторов. Помимо указанных государств, еще только у трех стран есть урановые обогащительные предприятия, по производству топлива для промышленных ядерных реакторов. Существует ещё ряд стран, которые занимались технологиями обогащения. Некоторые из них замечены или подозреваются в использовании обогащительного потенциала в военных целях. В Пакистане, одном из тех государств, которые создали ядерное оружие, не будучи участниками ДНЯО, есть комбинаты, где обогатили ВОУ в военных целях. Как известно, Южная Африка также произвела ядерное оружие с помощью обогащённого урана, полученного на собственных производствах. С другой стороны, Индия и Израиль создали атомные бомбы из плутония-239. Северная Корея, произвела небольшого количества ядерного оружия с применением плутония. Возможно эта страна обладает ещё и заводом по обогащению урана.

Информация о положении дел на урановых обогащительных производствах в различных странах мира представлена в Табл. 1 (2004 г.). Указаны тип применяемого процесса, мощность обогащения, рабочее состояние на настоящий момент и прочие сведения. Таблица составлена по каждой стране отдельно и по группам стран. В группы включены: государства, заявившие о наличии ядерного оружия (Китай, Франция, Россия, Великобритания, США); обладающие ядерным потенциалом, но не подписавшие Договор о нераспространении ядерного оружия (Индия Израиль, Пакистан); станы возможно обладающие ядерного оружия (Иран, Ирак, Северная Корея), а также страны, которые на данный момент не вызывают подозрений с точки зрения ядерных амбиций (Аргентина, Австралия, Бразилия, Германия, Япония, Нидерланды, Южная Африка, Южная Корея).

Табл. 1. Обогащительные производства в разных странах.

Кол-во объектов	Процесс / Масштаб ¹	Текущее состояние/Номинальная мощность (в метрических тоннах ЕРР в год)
Государства, заявившие о наличии ядерного оружия: Китай, Франция, Россия, Великобритания, США		
Китай ²		
3	Газовая диффузия / Промышленный	Один завод выводится из эксплуатации. Возведение другого завода закончилось в 1970-х гг. / мощность >200 МТЕРР/г.
3	Центрифугирование/Промышленный	Строительство одного завода / мощность 500 МТЕРР/г. На следующем этапе строительства будет построен еще один завод. Два завода, действующие с 1996 и 1998 гг., производят НОУ под гарантии МАГАТЭ / мощность 500 МТЕРР/г.

1	Газовая Лабораторный	диффузия	/	Данных нет.
1	CRISLA			Данных нет.
1	Предполагаемый комбинат оружейного урана	обогачительный		Данных нет.

Франция

2	Газовая Промышленный	диффузия	/	Один завод, действующий с 1979 г. / мощность 10 800 МТЕРР/г. Другой завод выводится из эксплуатации / мощность 0 МТЕРР/г - по данным МАГАТЭ.
1	Центрифугирование Промышленный		/	Завод запланирован / мощность 7 500 МТЕРР/г.
1	Химическое Опытная установка	обогащение/		Завод закрыта в 1988 г. / 0 МТЕРР/г. - по данным МАГАТЭ.
2	Лазерный Лабораторный	(SILVA)	/	Один завод закрыта в 2003 г. / 0 МТЕРР/г. - по данным МАГАТЭ. Другой завод возможно закрыт, возможно исследуется / 0 МТЕРР/г - по данным МАГАТЭ.

Россия³

4	Центрифугирование Промышленный ⁴		/	Завод, действующий с 1949 / мощность 7 000 МТЕРР/г. Завод, действующий с 1950 / мощность 4 000 МТЕРР/г. Завод, действующий с 1954 / мощность 1 000 МТЕРР/г. Завод, действующий с 1964 / мощность 3 000 МТЕРР/г.
---	------------------------------------------------	--	---	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Великобритания

1	Центрифугирование Промышленный		/	Действует с 1972 г. / 2,300 МТЕРР/г.
1	Газовая Промышленный	диффузия	/	Установка выведена из эксплуатации.

США

3	Газовая Промышленный	диффузия	/	Один завод действует с 1954 года, был модернизирован в 1970-х гг. / 11 300 МТЕРР/г. Другой завод действует с 1956 года, была модернизирована в 1970-х гг., закрыт в 2001г., сегодня находится в резерве / 7 400 МТЕРР/г. Третий завод действует с 1945 г., закрыт в 1985 г.
3	Центрифугирование Промышленный		/	Планируется создание завода к 2010 г. / 3 500 МТЕРР/г. Другой завод планируется, завершение строительства намечено к 2010 или 2011 г. / 3 000 МТЕРР/г. Строительство третьего отсрочено (заявка на получение разрешения отозвана).
1	AVLIS / Лабораторный			Завод действовал с 1991г., закрыт в 1999 году.
1	Центрифугирование Опытный Завод			Завод начнет действовать в 2005 г. / мощность 0 МТЕРР/г по данным МАГАТЭ.

Ядерные державы, не подписавшие ДНЯО:
Индия, Израиль, Пакистан

Индия

2	Центрифугирование Опытный завод		/	Один завод действует с 1990 г. / мощность <3 МТЕРР/г. Возведение другой установки завершено в 1985 г. / мощность не указана.
1	Лазерный/ Лабораторный			Действует с начала 1980-х гг. / мощность не указана.
1	Лазерный Опытный завод		/	Действует с 1993 г. / мощность не указана.

Израиль

1	Лазер центрифугирование	и газовое	/	Данных нет.
---	----------------------------	--------------	---	-------------

	Лабораторный и опытный завод	
Пакистан		
1	Центрифугирование Промышленный	/ Действует с 1984 г. / мощность 5 МТЭРР/г. (как сообщает МАГАТЭ, мощность будет увеличена примерно до 15 МТЭРР/г.).
2	Центрифугирование Лабораторный	/ Данных нет. Один завод действующий. Рабочее состояние другого неизвестно.
1	Данных нет	Строится с конца 1990-х гг.?
Государства, подозреваемые правительством США в наличии ядерного оружия: Иран, Ирак и Северная Корея		
Иран		
1	Центрифугирование Промышленный	/ Завод должен начать действовать с начала 2005 г. / мощность 250 МТЭРР/г.
1	Центрифугирование Опытный завод	/ Действует с августа 2003 г. / мощность не указана, будет вмещать 1 000 центрифуг.
1	?	Данных нет. Предположительно обогатительный объект.
2	Центрифугирование?	Данных нет. Один - предположительно обогатительный объект. Другой объект предположительно выполняет программу исследований обогащения урана в центрифугах.
1	Лазер или центрифугирование?	Данных нет. Предположительно обогатительный объект.
Ирак⁵		
1	EMIS / Опытный образец	"Действовал до 1991 года, разрушен войсками Коалиции в ходе воздушной атаки " / мощность 0 МТЭРР/г.
2	Центрифугирование Опытный образец	/ Одна установка была перемещена в 1987 г.; работа другой была прекращена в начале войны в Персидском Заливе в 1991 году / мощность 0 МТЭРР/г.
1	Метод разделения Лабораторный	химического изотопов/ "Действовал до 1991 года, разрушен войсками Коалиции в ходе воздушной атаки " / мощность 0 МТЭРР/г.
2	EMIS / Промышленный	Один завод "частично действовал до 1991 года, затем был разрушен войсками Коалиции в ходе воздушной атаки; установки, работавшие по методу EMIS, а также оборудование позднее уничтожены МАГАТЭ". Другой завод "до 1991 года строился, затем была разрушен войсками Коалиции в ходе воздушной атаки; установки, работавшие по методу EMIS, а также оборудование позднее уничтожены МАГАТЭ". Мощность 0 МТЭРР/г.
Северная Корея⁶		
1	Урановый обогатительный завод и предполагаемый урановый обогатительный завод	Данных нет.
2	Предполагаемое подземное ядерное производство	Данных нет.
1	Лазерный научно-исследовательский институт	Данных нет.
1	Предполагаемый урановый обогатительный комбинат	Данных нет.
Другие государства, осуществляющие промышленные или исследовательские программы: Аргентина, Австралия, Бразилия, Германия, Япония, Нидерланды, Южная Африка, Южная Корея		
Аргентина		
1	Газовая диффузия Опытный завод	/ Начала работать до 1983 года, находится в резерве с 1990 г. / мощность 20 МТЭРР/г.
1	Газовая диффузия	/ Строящийся завод (проектирование или возведение возможно)

	Промышленный		началось в 1997 г.) / мощность 100 МТЕРР/г.
Австралия			
1	Лазерный Лабораторный	(SILEX)	/ Действует с 1992 г. (завершение 2 стадии намечено на конец 2004 - начало 2005 г.; стадия 3 включает строительство и функционирование опытного завода, возможно в США) / мощность 0 МТЕРР/г. по данным МАГАТЭ.
Бразилия			
1	Центрифугирование Лабораторный		/ Действует с 1992 г. / мощность 5 МТЕРР/г.
2	Центрифугирование Опытная установка		/ Один завод действует с 1998 г./ 4 МТЕРР/г. Другой функционирует с 1982 г./ мощность не указана.
1	Центрифугирование Промышленный		/ Строящаяся "ультрацентрифуга", запуск планировался в 2004 г./ мощность 120 МТЕРР/г. (в конечном счете, она составит 200 МТЕРР/г.).
1	Лазерный Лабораторный	(AVLIS)	/ Действует с 1981 г. / мощность 0 МТЕРР/г. по данным МАГАТЭ.
2	Форсунка / Опытный завод		Один завод введен в строй с 1979 г., закрыт в 1989 г., выводится из эксплуатации / мощность 0 МТЕРР/г. по данным МАГАТЭ. Другой закрыт.
1	Центрифугирование		Предполагается / мощность не указана.
Германия			
1	Центрифугирование Промышленный		/ Действует с 1985 г./ мощность 1800 МТЕРР/г.
1	Центрифугирование Лазерный		/ Действует с 1964 г. / мощность 0 МТЕРР/г.
1	Форсунка Опытный завод		/ Выведен из эксплуатации.
Япония			
1	Центрифугирование Промышленный		/ Действует с 1992 г./ мощность 1050 МТЕРР/г.
2	Центрифугирование Опытный завод		/ Один завод открылся в 1989 г., другой - в 1979 г., оба закрыты в 2004 году и демонтируются.
1	Химическое Опытный завод	обогащение	/ Действовал с 1986 г., закрыт в 1991 г.
1	Лазерный Лабораторный	(MLIS)	/ Действовал с 1991, закрыт в 2003 г./ мощность 0 МТЕРР/г, по данным МАГАТЭ.
1	Лазерный Лабораторный	(AVLIS)	/ Действовал с 1987 г., закрытие запланировано на 2005 год, ожидает вывода из эксплуатации/ мощность 0 МТЕРР/г, по данным МАГАТЭ.
Нидерланды			
1	Центрифугирование Промышленный		/ Действует с 1973 г./ мощность 2 200 МТЕРР/г.
Южная Африка			
1	Лазерный Опытный завод	(MLIS)	/ Действовал с 1995 г., закрыт в 1998 г.
1	Форсунка Опытный завод		/ Действовал с 1978 г., закрыт в 1990 г., ожидает вывода из эксплуатации.
1	Спиральная Промышленный	волна	/ Действовал с 1986 г., закрыт в 1996 г., ожидает вывода из эксплуатации.
Южная Корея			
1	Лазерный Лабораторный	(AVLIS)	/ Эксперименты проводились в начале 2000 ⁷ г./ мощность не указана.

Все российские обогатительные заводы, сначала функционировавшие как газодиффузионные, с 1960-х гг. были модернизированы газогенераторными центрифугами. Первые три завода, перечисленные в таблице, участвуют в переработке БОУ в НОУ для реализации российско-американской сделки по БОУ.

Сокращения:

AVLIS - технология лазерного разделения изотопов в атомарной форме, известна как SILVA во Франции CRISLA - химическая реакция через избирательную изотопную лазерную активацию EMIS - электромагнитный метод разделения радиоактивных изотопов урана HEU - высокообогащенный уран IAEA - МАГАТЭ (Международное агентство по атомной энергии) LEU - низкообогащенный уран MLIS - молекулярный метод лазерного разделения изотопов MTSWU/a - метрическая тонна Единицы раздельной работы в год SILEX - технология лазерного разделения изотопов SILVA - французская аббревиатура, аналогичная AVLIS

Исходным продуктом, поступающим на обогатительный завод, является природный уран, изотопный состав которого представлен в Табл. 2.

Табл. 2. Краткая информация об изотопах урана

Изотоп	Содержание в природном уране (в %)	Процент радиоактивности в природном уране	Период полураспада
Уран-238 (U-238)	99,284	47,9	4,46 миллиарда лет
Уран-235 (U-235)	0,711	2,3	704 миллиона лет
Уран-234 (U-234)	0,0055	49,8	245 000 лет

В начале 21-го века в России высокообогащенный уран производился на четырех заводах: в Екатеринбургe-44, Красноярске-45, Ангарске и Томске-7.

3.3 Разделительная способность обогатительного завода

В ходе обычного процесса обогащения, поток преобразованного в газ природного урана, содержащего ^{235}U и ^{238}U , делится на два потока благодаря небольшой разнице в массах этих двух изотопов. Один поток становится богаче ^{235}U («обогащенный» поток урана), при этом другой становится беднее этим изотопом («обедненный» поток урана). Здесь термин «обедненный» означает более низкий процент ^{235}U по отношению к природному урану).

Разделительная способность обогатительного завода измеряется в единицах массы переработанного вещества (МПП) за единицу времени, например МПП-кг/год или МПП-тонн/год. Выход обогащенного продукта с предприятия заданной мощности зависит от концентрации нужного изотопа во входной породе, выходных отходах и конечном продукте. Исходное содержание полезного изотопа определено природным его содержанием. Зато два остальных параметра можно изменять. Если уменьшить степень извлечения изотопа из исходного вещества, можно увеличить скорость его выхода, но платой за это будет увеличение требуемой массы сырья. Это подчиняется отношению:

$$P = \frac{U}{V(N_P) + \frac{N_P - N_F}{N_F - N_W} V(N_W) - (1 + \frac{N_P - N_F}{N_F - N_W}) \cdot V(N_F)}$$

где P - выход продукта, U - разделительная способность, N_P , N_F , N_W - молярные концентрации изотопа в конечном продукте, сырье и отходах. $V(N_P)$, $V(N_W)$, $V(N_F)$ разделительные потенциальные функции для каждой концентрации. Они определяются как:

$$V(N) = (2N - 1) \ln\left(\frac{N}{1 - N}\right)$$

Принимая остаточную концентрацию в 0.25%, завод с производительностью 3100 МПП-кг/год произведет 15 кг 90% U-235 ежегодно из натурального урана. Если взять в качестве сырья трехпроцентный U-235 (топливо для АЭС) и концентрацию 0.7% в отходах производства, тогда достаточно мощности 886 МПП-кг/год для того же выхода.

При описании работы промышленных обогатительных установок используются следующие понятия и определения.

Степень обогащения:

$$\alpha = \frac{M^{235}}{M^{238} + M^{235}}$$

Степень обогащения природного урана $\alpha_f = 0,0071$; α_p и α_f степени обогащения обогащённого урана и отходов, соответственно; масса исходного урана – M_f , масса обогащенного урана – M_p , масса отходов – M_t

Коэффициент обогащения за один цикл - K

$$K = \frac{\frac{\alpha_p}{1 - \alpha_p}}{\frac{\alpha_t}{1 - \alpha_t}}$$

Баланс массы:

$$M_f = M_p + M_t \quad (1)$$

$$\alpha_f M_f = \alpha_p M_p + \alpha_t M_t \quad (2)$$

Мощность урановой обогатительной установки по повышению процента ^{235}U измеряется в единицах, которые называются **Единица разделительной работы (ЕРР)** (Separative Work Units - SWU, по-английски произносятся «свуз»). Единица измерения – кг.

Мощности промышленных установок составляют от нескольких сот до нескольких тысяч метрических тонн ЕРР (МТЕРР) в год. (1 МТЕРР = 1000 ЕРР.) Единица разделительной работы - это комплексная единица, которая зависит как от доли ^{235}U , которую хотят получить в обогащенном потоке, так и от того, сколько ^{235}U из исходного вещества остается в потоке, обедненном данным изотопом. Единицу ЕРР (SWU) можно рассматривать как количество усилий, которые необходимо приложить для достижения установленной степени обогащения. Чем меньше ^{235}U из исходного вещества следует оставить в обедненном уране, тем больше ЕРР необходимо для достижения желаемой степени обогащения. Количество ЕРР, обеспечиваемое обогатительной установкой, напрямую зависит от объема энергии, потребляемой этой установкой.

Замечание. Единицы разделения работы (ЕРР) измеряются в килограммах, хотя на самом деле они определяют усилие, которое необходимо для повышения процента ^{235}U в урановом потоке установленных уровней.

Единицу разделительной работы (ЕРР) можно найти по уравнениям:

$$V(\alpha) = (1 - 2\alpha) * \ln \frac{1 - \alpha}{\alpha} \quad (3)$$

$$\text{ЕРР} = M_p V(\alpha_p) + M_t V(\alpha_t) + M_f V(\alpha_f) \quad [\text{кг}] \quad (4)$$

Теперь можно оценить необходимое количество исходного количества урана и количество единиц разделительной работы. С помощью уравнений (1) и (2) получаем:

$$M_f = \frac{\alpha_p - \alpha_t}{\alpha_f - \alpha_t} M_p$$

Очевидно, что $M_p^{235} = \alpha_p M_p$

Тогда

$$M_f = \frac{\alpha_p - \alpha_t}{\alpha_f - \alpha_t} \frac{M_p^{235}}{\alpha_p}$$

Для случая высокого обогащения $\alpha_p \gg \alpha_t$, $\alpha_p - \alpha_t \approx \alpha_p$ и, следовательно

$$M_f = \frac{1}{\alpha_f - \alpha_t} M_p^{235}$$

Если $\alpha_f = 0,0071$ и $\alpha_t = 0,002$

$$M_f \sim 200 M_p^{235}$$

Оценим количество ЕРР, необходимого для производства 1 кг урана с 90% обогащением. Полагаем, что $\alpha_t = 0,002$; $M_p = 1$ кг, $M_f = 180$ кг, $M_t = 179$ кг.

Тогда

$$V_t(0,002) = (1 - 0,004) \ln ((1-0,002)/0,002) \approx 6,2$$

$$V_f(0,007) = (1 - 0,014) \ln ((1-0,007)/0,007) \approx 4,88$$

$$V_p(0,9) = (1 - 1,8) \ln ((1-0,9)/0,9) \approx 0,42$$

В результате получаем необходимое количество ЕРР = 230 кг

Для создания одного заряда атомной бомбы необходимо затратить

$$1000 - 1200 \text{ ЕРР}$$

Две самые распространенные технологии обогащения на сегодняшний день значительно отличаются в своем энергопотреблении. Для современных газодиффузионных установок, как правило, требуется от 2400 до 2500 киловатт-час (кВ-ч) электроэнергии на ЕРР, тогда как газогенераторные центрифужные установки потребляют только 50-60 кВ-ч электроэнергии на ЕРР. Для того чтобы обеспечить типовой легководный ядерный реактор мощностью 1000 мегаватт электроэнергии, использующий обогащенный уран в качестве топлива, потребуется примерно от 100000 до 120000 объема услуг по обогащению урана в ЕРР в год. Если бы такое обогащение было обеспечено за счет газодиффузионной установки, тогда на процесс обогащения ушло бы 3-4% от объема электроэнергии, генерированного данным реактором. С другой стороны, если бы обогащение топливного урана было проведено в газогенераторных центрифугах, тогда на процесс обогащения ушло бы менее 0,1% от объема электроэнергии, генерированного ядерной установкой за год.

Помимо килограмма ЕРР важную роль играет еще один параметр. Это масса природного урана, которая необходима для получения желаемой массы обогащенного урана. Как и с количеством ЕРР требуемое количество исходного материала также будет зависеть от желаемой степени обогащения, а также от количества ^{235}U , которое остается в обедненном уране. Требуемое количество природного урана будет сокращаться при уменьшении доли ^{235}U , которую необходимо оставить в обедненном уране.

В **Табл. 3** представлена краткая информация о затратах (на природный уран и услуги по его обогащению), которые требуются для получения одного килограмма НОУ и одного килограмма ВОУ с долей ^{235}U , составляющей 0,2% и 0,3% в обедненном урановом потоке.

Табл. 3. Затраты на получение одного килограмма низкообогащенного урана и одного килограмма высокообогащенного урана

	Низкообогащенный уран (НОУ)		Высокообогащенный уран (ВОУ)	
	Природный уран	Услуги по обогащению	Природный уран	Услуги по обогащению
Доля U-235 в обедненном потоке составляет 0,3 %	8,2 кг	4,5 ЕРР	219 кг	193 ЕРР
Доля U-235 в обедненном потоке составляет 0,2 %	6,7 кг	5,7 ЕРР	176 кг	228 ЕРР

НОУ = уран, содержащий 3,6% ^{235}U , обычно используется в легководном реакторе. ВОУ = уран, содержащий 90% ^{235}U , обычно используется для создания ядерного оружия. ЕРР = Единица разделительной работы кг = килограмм.

С учетом того, что требуемый объем природного урана и ЕРР в процессе обогащения меняются в противоположном направлении для установленной степени обогащения, природный уран дешев, а услуги по его обогащению дороги, владельцы обогатительных установок согласятся на "выброс" большей доли U-235 в обедненный поток (то есть, им будет выгоднее использовать больше природного урана и меньше ЕРР). С другой стороны, если природный уран дороже услуг по его обогащению, тогда владельцы установок выберут обратный вариант. Для того чтобы обогатить уран для атомной бомбы, эквивалентной той, что США сбросили на Хиросиму (это примерно 60 кг ВОУ), требуется от 10,6 до 13,1 метрических тонн природного урана, а также от 11600 до 13700 ЕРР для обогащения. Однако для создания современных более совершенных видов ядерного оружия требуется уже намного меньшее количество. Для современной урановой бомбы достаточно 20-25 кг ВОУ.

Если вместо природного урана в качестве исходного вещества для выработки ВОУ использовать бы низкообогащенный уран (содержащий 3,6% ^{235}U), то для получения 1 кг высокообогащенного урана требуется лишь 70-78 ЕРР и 26-27 кг исходного вещества. Это значит, что для получения ВОУ, необходимого для создания эквивалента бомбы, сброшенной на Хиросиму, нужно обогатить всего 1,6 тонны НОУ, т. е. меньше одной десятой от общего количества НОУ, необходимого для ежегодного снабжения топливом одного ядерного реактора мощностью 1000 МВт. Таким образом, примерно две трети совокупного объема услуг по обогащению урана, необходимого для получения оружейного ВОУ, участвует в обогащении урана из природного урана (0,7% ^{235}U) в НОУ (3,6% ^{235}U). При этом только около одной трети совокупного объема услуг участвует в обогащении НОУ с окончательной переработкой его в ВОУ (90% ^{235}U), как показано на схеме. Поэтому запасы низкообогащенного урана, если их поддерживать в состоянии, удобном для обогащения (например, в виде гексафторида урана), могут стать исходным веществом для простого и быстрого получения высокообогащенного урана, применяемого для создания ядерного оружия. Это одна из самых опасных сторон широкого распространения технологий обогащения в рамках распространения ядерной энергетики.

Табл. 4. Услуги по обогащению, необходимые для получения высокообогащенного урана из природного урана

<p>ПРИРОДНЫЙ УРАН</p>	<p>Две трети совокупного объема услуг по обогащению урана, необходимого для получения оружейного высокообогащенного урана (ВОУ), участвует в обогащении урана из природного урана (0,7% ^{235}U) в низкообогащенный уран, НОУ (3,6% ^{235}U).</p>	<p>Около одной трети совокупного объема услуг участвует в обогащении НОУ с окончательной переработкой его в ВОУ (90% ^{235}U).</p>
------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

США. Фирма USEC владеет двумя газодиффузионными заводами в США, один из которых расположен в городе Пайктон, штат Огайо (который прекратил промышленное обогащение урана), а другой находится в городе Падьюка, штат Кентукки и строит газодиффузионное производство в Пайктоне. Имеет лицензию на строительство и эксплуатацию объекта, так называемого Ведущего каскада в Пайктоне, на базе газового центрифугирования на рынке США. Другая компания - "Louisiana Energy Services" (LES) - хочет построить в США промышленный газогенераторный центрифужный завод.

Табл.5. Обогащительные заводы США.

Город	Тип	Мощность (кг ЕРР)
Oak Ridge (Tennessee) (остановлен)	Диффуз.	$6,4 \cdot 10^6$
Paducash (Kentuki)	Диффуз.	$1,13 \cdot 10^7$
Portsmouth (Ohio) (остановлен)	Диффуз.	$7,3 \cdot 10^6$
(в стадии строительства)	Центриф.	$3 \cdot 10^6$

Европа. Азия и Латинская Америка.**Табл.6.** Обогащительные заводы Европы и некоторых других стран.

Город	Тип	Мощность (кг ЕРР)
Tricastin, Франция	Диффуз.	$1,1 \cdot 10^7$
Франция, планируется	Центриф.	$7,5 \cdot 10^6$
Capenhurst, Англия	Центриф.	$2,3 \cdot 10^6$
Gronau, Germany	Центриф.	$1,8 \cdot 10^6$
Almelo, Нидерланды	Центриф.	$2,2 \cdot 10^6$
Lanchow, Китай	Центриф.	$1 \cdot 10^6$
Ningyo-Toge, Япония	Центриф.	$1 \cdot 10^6$
Пакистан	Центриф.	$1,5 \cdot 10^5$
Индия	Центриф.	$3 \cdot 10^3$
Бразилия	Центриф.	$5 \cdot 10^3$
Аргентина	Диффуз.	$2 \cdot 10^4$

Россия.**Табл.7.** Обогащительные заводы России

Город	Тип	Мощность (кг ЕРР)
УЭМК, Новоуральск	Центриф.	$6 \cdot 10^6$
ЭХЗ, Зеленогорск	Центриф.	$4 \cdot 10^6$
СХК, Северск	Центриф.	$1 \cdot 10^6$
ЭХК, Ангарск	Центриф.	$4 \cdot 10^6$