

ВЛИЯНИЕ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ НА НЕЗНАЧИТЕЛЬНЫЕ ИЗОТОПЫ УРАНА В ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ КАСКАДАХ

Хьюстон Вуд

В естественном уране существуют следы “незначительного изотопа” U-234 вдобавок к более распространенным U-235 и U-238. Уран, облученный в реакторе и отделенный от отработанного реакторного топлива при переработке, будет содержать дополнительные незначительные изотопы. При обогащении урана каскады обогатительных блоков настроены на получение желаемого уровня изотопа U-235, но содержание других изотопов также изменится. Измерение проб U-235 в потоках исходного и конечного продукта, а также в отходах на каждом этапе позволяют рассчитать коэффициент разделения U-235 для каждого этапа. Можно подсчитать коэффициенты разделения и для других изотопов. В этой статье изучаются два метода получения коэффициентов разделения такими путями, которые соответствуют физике двух процессов обогащения – газовой центрифуге и газовой диффузии. Такая методика может оказаться ценным орудием при ядерном разбирательстве. Например, может оказаться важным знать происхождение образца урана с высоким обогащением, полученного либо при перехвате материала, либо среди обломков от взрыва. Анализ, способный определить, на каком обогатительном предприятии произведен уран, сможет немедленно указать на слабости в системах охраны или физической безопасности.

Автор работает на факультете машиностроения и аэрокосмической техники Университета Вирджинии, Шарлоттесвилл. Вирджиния, США.

Статья получена редакцией 7 апреля 2008 года и принята к опубликованию 22 июня 2008 года.

Автор признателен поддержке со стороны Программы по науке и всеобщей безопасности в Принстонском университете, где он провел полгода отпуска для научной работы. В это время Александр Глезер и Скотт Кемп предложили идею использовать коэффициенты разделения, основанные на физике процесса. Автор высоко оценивает их поддержку. Автор благодарит также Эда фон Халле, любезно внесшего изменения в свою M*-программу и предоставившего ее для выполнения расчетов, представленных в этой статье.

Почтовый адрес для корреспонденций: Houston G. Wood, University of Virginia, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, 122 Engineer’s Way, P.O.Box 400746, Charlottesville, VA 22904-4746, USA.

Электронный адрес: hgw9p@virginia.edu

ВВЕДЕНИЕ

Существующий в природе уран имеет три изотопа: U-234, U-235 и U-238. Содержание каждого изотопа приведено в Таблице 1.

Таблица 1: Изотопная концентрация природного урана.^{1,2}

U-234	0.0055 %
U-235	0.7200 %
U-238	99.2745 %

Уран, обогащенный изотопом U-235, может применяться как топливо для ядерных реакторов или же при обогащении до более высокого уровня – в качестве ядерного взрывного материала для ядерного оружия. Существуют несколько разных методов обогащения урана. Для крупномасштабного обогащения наиболее распространены газовая диффузия и газовые центрифуги. В настоящее время газодиффузионные заводы существуют в Аргентине, Китае, Франции, России и Соединенных Штатах. Имеются предприятия с центрифугами (о которых известно, что они работают или сооружаются) во многих странах, включая Бразилию, Китай, Францию, Германию, Великобританию, Индию, Иран, Японию, Голландию, Пакистан, Россию и Соединенные Штаты.

В обоих процессах обогащения одного разделительного элемента недостаточно для получения желаемых уровня обогащения или количества материала. По этой причине разделительные

элементы соединяются параллельно, образуя *ступени* (см. Рис.1) для получения большего выхода продукта. Ступени затем соединяются последовательно, чтобы добиться более высоких уровней обогащения. Такие конфигурации называются *каскадами* (см. Рис.2).

Уран в ядерном реакторе приобретает дополнительные, незначительные изотопы при работе реактора. В их число входят U-232, U-233 и U-236 в добавление к изотопу U-234, уже имевшемуся в наличии. Некоторые из этих изотопов обладают нежелательными свойствами, так что если уран подлежит повторному применению, важно понять, насколько их концентрации вырастут при дальнейшем обогащении. Более того, эти изотопы могут сыграть роль при анализе спорных вопросов, где речь пойдет о выяснении источника урана или метода обогащения. Концентрации этих малых изотопов в потоке обогащенного продукта могут быть подсчитаны при определении их индивидуальных коэффициентов разделения, которые просто служат мерой того, насколько обогащается каждый изотоп простой ступенью.

Когда проектируются каскады для обогащения многокомпонентных смесей урана, различие в количественных анализах малых изотопов может быть неважным. Но бывают обстоятельства, при которых понимание этих различий может оказаться полезным при отождествлении процесса разделения, предоставляя "решение для приговора".

Эта статья рассматривает различные методы представления коэффициентов разделения различных ступеней в многокомпонентной смеси изотопов. Выполнены оценки каскадов для изучения малых изотопов в НОУ и ВОУ от естественного урана и урана, переработанного методами газовых центрифуг и газовой диффузии.

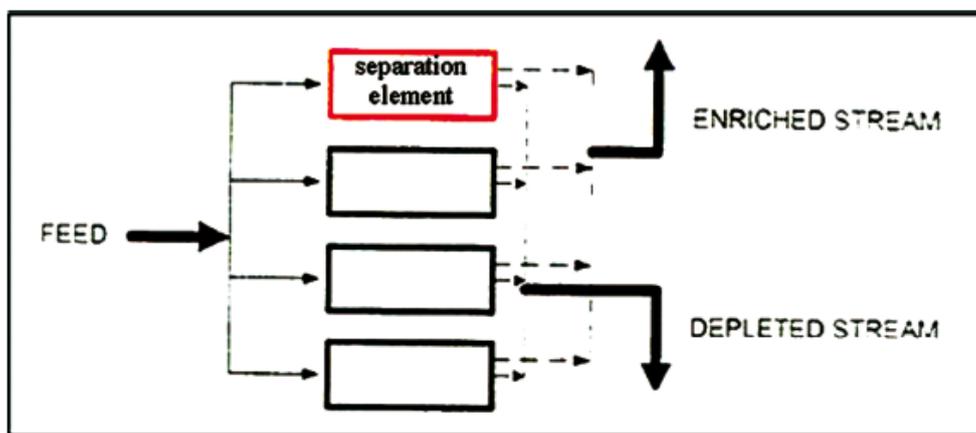


Рис. 1: Диаграмма обогатительной ступени. Надписи на рисунке (слева направо и сверху вниз): исходный материал; разделительный элемент; обогащенный поток; обедненный поток.

АНАЛИЗЫ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА КАСКАДОВ С УСТАНОВЛЕННЫМИ ДОЛЯМИ СОДЕРЖАНИЯ

Коэффициент разделения ячейки в методе газовой диффузии является функцией квадратного корня *отношения* молекулярных весов подлежащих разделению изотопных компонентов. Коэффициент разделения ячейки для газовой центрифуги является функцией *разницы* молекулярных весов.³ При анализе каскадов, питаемых переработанным ураном, для получения низко обогащенного урана (НОУ), содержащего менее 20% U-235, эта разница мала, но когда процесс продолжается до высоко обогащенного урана (больше 20% U-235), два указанные выше процесса дадут заметно различающиеся концентрации малых изотопов.

Последующий анализ использует установленную долю содержания или M^* - каскадную теорию, впервые предложенную де ля Гарза.^{4,5} В каскаде, разделяющем двойную смесь изотопов, количество желаемого изотопа в текущем вверх потоке от конкретной ступени выравнивается с его содержанием в потоке, идущем вниз. Это так называемый каскад *без смешивания* или *идеальный* каскад, обладающий также желаемой особенностью минимального течения между ступенями. В многокомпонентной смеси идеальный каскад сводится в общем случае к каскаду с установленными долями содержания, который становится идеальным каскадом для двойной смеси.

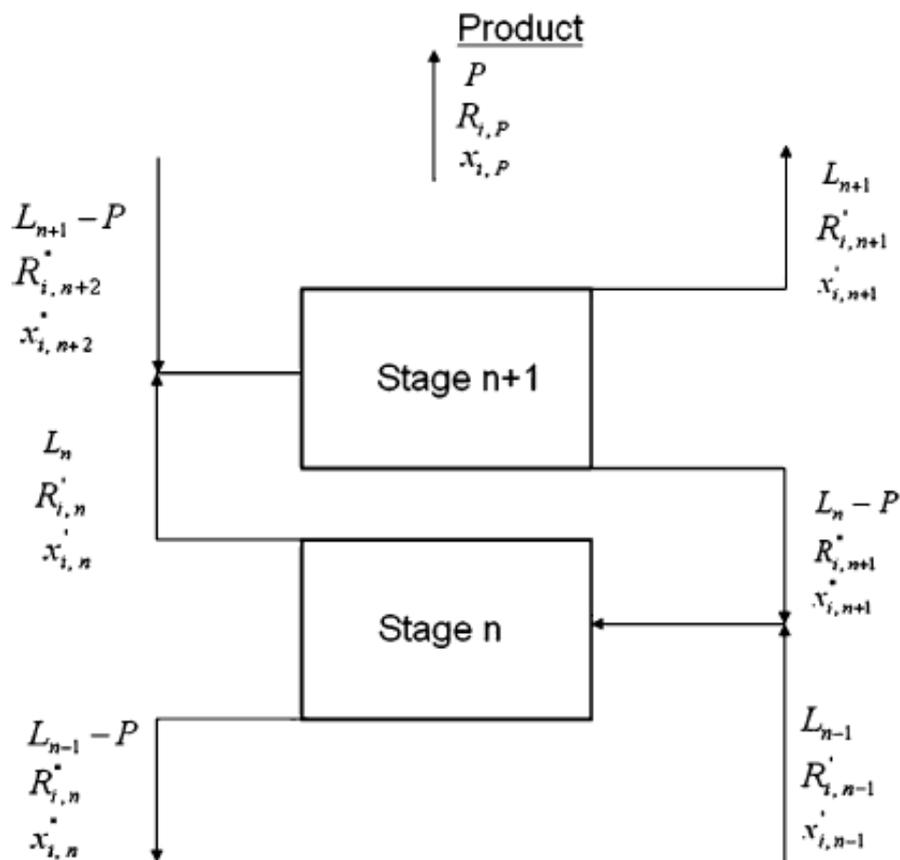


Рис. 2: Две соседние ступени в обогащающей секции каскада. Надписи (сверху вниз): продукт, ступень (n + 1), ступень (n). Остальные обозначения поясняются в тексте

Следуя фон Халле,⁶ обозначим в многокомпонентной смеси из i компонентов k -ый компонент как “ключевой” и определим содержание каждого компонента в единицах этого ключевого компонента

$$R_i = x_i/x_k; i = 1, 2, \dots, J \quad (1)$$

где R_i означает относительное содержание i -го компонента, а x_i - молярную часть i -компонента в смеси. Полный коэффициент разделения для ступени определяется как

$$\alpha_i = R'_i/R''_i = 1, 2, \dots, J \quad (2)$$

где индекс (') означает количество компонента в направленном вверх потоке от ступени, а индекс (") – в направленном вниз потоке от ступени. Эта концепция иллюстрируется на Рис. 2, где показаны две соседние ступени в обогащающей секции каскада. На этом рисунке L_n означает поток вверх от ступени номер n . Согласно определению полный коэффициент разделения для ключевого компонента (α_k) равен единице. На заводах с газовыми центрифугами принято, чтобы каскады составлялись из центрифуг одинаковой конструкции и работали с одинаковой скоростью подачи сырьевого материала, чтобы обеспечить один и тот же коэффициент обогащения. В этом анализе принято, что общие коэффициенты обогащения ступеней постоянны по всему каскаду. Это значит, что все значения α_i не зависят от номера ступени.

Обогащающая секция каскада состоит из всех ступеней, расположенных выше точки подачи сырья, а все ступени обедняющей секции находятся ниже этой точки. Рассматриваются балансы материала для обогащающей и обедняющей секций, чтобы определить их характеристики. Полученные уравнения используются для определения характеристики всего каскада.

Компьютерная программа, написанная на языке Visual Basic, была разработана фон Халле⁷ для решения уравнений M^* каскада. Требуются следующие входные данные: 1) концентрации всех изотопов в потоке сырья, 2) концентрация U-235 в потоке продукта и отходов, 3) скорость подачи сырья или выхода продукта, 4) полный коэффициент разделения ступени для каждого изотопа. Затем программа подсчитывает количество требуемых ступеней в каждой секции и скорость

потока между ступенями.

В оригинальной версии M^* - программы полный коэффициент разделения ступени α для U-235 считается исходным, а коэффициент разделения ступени в расчете на единицу разности масс рассчитывался как

$$\alpha_o = \alpha^{1/(238 - 235)} \quad (3)$$

Тогда полный коэффициент разделения ступени для i -го компонента вычисляется в виде

$$\alpha_i = \alpha_o^{(M_k - M_i)} \quad (4)$$

Для газовой диффузии и газовой центрифуги рабочим газом является UF_6 , а молекулярный вес его составляет 349 (для U-235) и 352 (для U-238). Для газовой диффузии полный коэффициент раздел разделения ступени равен

$$\alpha = (352/349)^{1/2} = 1.004289 \quad (5)$$

Для газовой центрифуги основное разделение, вызываемое центробежной силой, дается выражением

$$\exp[\Delta MV^2/2RT] = \exp [(\Delta M/M)A^2] \quad (6)$$

где $A^2 = MV^2/2RT$ – параметр стратификации, M – молекулярный вес, T – абсолютная температура, ΔM – разница молекулярных весов образцов, R – универсальная газовая постоянная (8314.4 Дж/(кг.моль.К)). Для гипотетической центрифуги “Игуасу”^{6,8} скорость вращения на периферии ротора равна 600 м/с, а $T = 300$ К. В соответствии с (6) получаем, что $A^2 = 25.4$ для UF_6 . Общий коэффициент разделения газовой центрифуги определяется не только из уравнения (6), но скоростью подачи сырья, длиной центрифуги, а также другими параметрами противотокового течения в центрифуге. Типичные центрифуги, доложенные в литературе, имеют общие коэффициенты разделения порядка 1.6, что значительно выше, чем для газовой диффузии.

Однако, если два эти значения полного коэффициента разделения используются в классической M^* -программе, концентрации продукта и отходов для всех изотопов совпадают. Единственная разница в количестве требуемых ступеней для этих двух каскадов. Это результат вызван вычислением полного коэффициента разделения ступени для малых изотопов с помощью уравнения (4). Поэтому M^* - программа была изменена так, чтобы пользователь мог предписать все α таким образом, который совместим с моделируемым процессом.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦЕНТОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ДЛЯ ГАЗОВОЙ ЦЕНТРИФУГИ

Сообщалось⁹, что был проведено обогащение отработанного реакторного топлива газовой центрифугой, где использовались параметры центрифуги “Игуасу”. В этом исследовании единственная центрифуга была численно оптимизирована для обогащения ураном-235 двойной смеси естественного урана.

Затем было проведено численное моделирование с отработанным реакторным топливом, игравшим роль исходного материала с концентрацией изотопов, представленной в Табл. 2.

Коэффициенты разделения были подсчитаны в виде функции от темпов подачи исходного материала, где концентрация U-235 была максимизирована по отношению к градиенту температуры на стенках ротора и торможению удаляющихся отходов. Используя концентрации изотопов, рассчитанные в удаляющих потоках, мы получили следующие результаты:

$$\begin{aligned} (\alpha_{232} - 1) / (\alpha_{235} - 1) &= 1.97 \\ (\alpha_{234} - 1) / (\alpha_{235} - 1) &= 1.32 \\ (\alpha_{236} - 1) / (\alpha_{235} - 1) &= 0.66 \end{aligned} \quad (7)$$

Было найдено, что эти отношения меняются не более, чем на 1%, когда скорость подачи сырья менялась от 1 до 100 мг/с.

Раскладывая правую часть уравнения (6) в ряд Тэйлора и сохраняя только два первых члена, получаем

$$\alpha_i - 1 = [1 + \Delta M_i / M(A^2)] - 1 = (\Delta M_i / M)A^2 \quad (8)$$

где ΔM_i - разница молекулярных весов между изотопом i и ключевым изотопом (в нашем случае это U-238).

$$(\alpha_{232} - 1) / (\alpha_{235} - 1) = (M_i - M_k) / (M_{235} - M_k) = \Delta M_i / 3, i=1,2,\dots,5$$

В разложении Тэйлора можно взять больше членов, но уже это уравнение предсказывает значения 2, 4/3 и 2/3, которые совпадают очень хорошо с результатами численного счета, представленного в уравнении (7). Если задан коэффициент разделения для U-235, коэффициенты разделения для других компонентов могут быть определены из соотношения

$$\alpha_i = 1 + (\alpha_{235} - 1)\Delta M / 3, i = 1, 2, \dots, 6 \quad (9)$$

Таблица 2: Концентрация изотопов отработанного урана.¹⁰

U-232	1.E-9%
U-234	0.02%
U-235	0.90%
U-236	0,40%
U-238	98.88%

Коэффициенты разделения для газовых центрифуг пропорциональны разности масс, что совместимо с теоретическими результатами, опубликованными в других источниках.¹¹ Уравнение (9) можно также вывести, если раскрыть уравнение (4) для случая значения полного коэффициента разделения порядка единицы.

В Таблице 3 представлены результаты, полученные уравнениями (4) и (9), для сравнения результатов от каждого способа подсчета коэффициентов разделения для случая, где для удобства выбрано $\alpha_{235} = 1.6$. Коэффициенты разделения для изотопов, более легких, чем U-235, оказываются больше, если рассчитывать их по уравнению (4), а не по уравнению (9). Картина становится противоположной для изотопов тяжелее U-235.

Таблица 3: Коэффициенты разделения для малых изотопов в газовой центрифуге, полученные в уравнениях (4) и (9) для $\alpha_{235} = 1.6$.

Изотоп	α_i из (9)	α_i из (4)
U-232	2.2	2.5600
U-233	2.0	2.1888
U-234	1.8	1.8714
U-235	1.6	1.6
U-236	1.4	1.3680

Таблица 4: Концентрации продукта в каскадах газовых центрифуг, производящих НОУ из естественного урана в зависимости от разных значений α_i .

Изотоп	Концентрация продукта α_i из (9)	Концентрация продукта α_i из (4)	Разница %
U-234	0.00045739	0.00047747	-4.2
U-235	0.05	0.05	0

Были проведены вычисления M^* -каскада с измененной программой для обогащения естественного урана до уровней НОУ и ВОУ, а затем для обогащения отработанного урана до уровней НОУ и ВОУ. Концентрации сырья для естественного и отработанного урана, использованные для этих расчетов, приведены в Таблице 1 и 2, соответственно. Во всех расчетах концентрация U-235 в отходах принималась равной 0.3%.

Результаты обогащения естественного урана до 5%-ного содержания U-235 приведены в таблице 4. Концентрация U-234 в продукте на 4.2% меньше, когда значение α_i вычисляется по уравнению (9), а не по уравнению (4).

Результаты по обогащению естественного урана до 93%-ного U-235 показаны в Таблице 5. Различие в концентрациях U-234 в этом случае равно 4.7% , что примерно составляет такой же

процент разницы, как и в случае с НОУ (Таблица 4).

Таблица 5: Концентрации продукта в каскадах газовых центрифуг, производящих ВОУ из естественного урана с использованием различных α_i .

Изотоп	Концентрация продукта α_i из (9)	Концентрация продукта α_i из (4)	Разница %
U-234	0.00889859	0.00933759	-4.7
U-235	0.93	0.93	0

Таблица 6: Концентрация продукта в каскадах газовых центрифуг, производящих НОУ из отработанного урана с использованием различных α_i .

Изотоп	Концентрация продукта α_i из (9)	Концентрация продукта α_i из (4)	Разница %
U-232	7.2635E-09	7.5514E-09	-3.8
U-234	0.000128628	0.00132990	-3,3
U-235	0.05	0.05	0
U-236	0.01673063	0.01567094	+6,8

Таблица 7: Концентрация продукта в каскадах газовых центрифуг, производящих ВОУ из отработанного урана с использованием различных α_i .

Изотоп	Концентрация продукта α_i из (9)	Концентрация продукта α_i из (4)	Разница %
U-232	1.1531E-09	1.1999E-09	-3.9
U-234	0.0201983	0.02095960	-3.8
U-235	0.75	0.75	0
U-236	0.119342117	0.16406253	+17,9

Далее, отработанный уран, как указано в Таблице 2, использовался в качестве потока исходного сырья для получения НОУ и ВОУ. Результаты для случая НОУ представлены в Таблице 6. Отличия в концентрациях более легкого изотопа составляют 3.8% и 3.3%, что составляет примерно такую же процентную разницу, что и в случае с сырьем из естественного урана. Впрочем, концентрация U-236 значительно выше (+ 6.8%).

Для обогащения отработанного урана в Таблице 2 до уровней ВОУ содержание U-235 в 93% не может быть получено никакими разделительными средствами. Это связано с высокой концентрацией U-236 в материале. В таком случае обогащение U-235 до 75% оказалось почти таким высоким, что можно достигнуть (см. таблицу 7. Процентная разница у более легких изотопов составляет 3.9% и 3.8% , причем меньшие значения соответствуют уравнению (9). Почти то же самое наблюдается и в случае НОУ (см. таблицу 6). Однако процентная разница в концентрации U-236 (+17.9%) почти в три раза выше, чем процентная разница для случая с НОУ.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ДЛЯ ГАЗОВОЙ ДИФфуЗИИ

В случае газовой диффузии используем уравнение (5), чтобы определить коэффициенты разделения для всех изотопов

$$\alpha_i = (M_k/M_i)^{1/2} \quad i = 1, 2, \dots, J \quad (10)$$

где M_i - молекулярный вес каждого изотопа, а M_k – молекулярный вес ключевого компонента. Для UF_6 (U-238) $M_k = 352$.

Коэффициенты α_i вычислены из уравнения (4), как в оригинальной M* - программе, а также из уравнения (10) и представлены в Таблице 8. Для малых значений коэффициентов разделения при газовой диффузии значения, полученные двумя программами, гораздо ближе друг к другу, чем при больших α газовой центрифуги, приведенных в таблице 3.

С двумя наборами α , показанными в Таблице 8, те же самые серии расчетов, выполненные для газовых центрифуг, повторены для газовой диффузии. В Таблице 9 представлены концен-

трации продукта с двумя вариантами коэффициентов разделения, представляющего собой обогащение естественного урана до уровня НОУ. Процентная разница в потоке продукта составляет менее 0.1% . В Таблице 10 представлены результаты получения ВОУ из естественного урана методом газовой диффузии. разница в потоке продукта для U-234 составляет ровно 0.1%.

Таблица 8: Коэффициенты разделения при газовой диффузии для малых изотопов, полученные из уравнений (4) и (10) при $\alpha_{235} = 1.004289$.

Изотоп	α_i из (10)	α_i из (4)
U-232	1.008633	1.008596
U-233	1.007179	1.007159
U-234	1.005731	1.005723
U-235	1.004289	1.004289
U-236	1.002853	1.002857

Таблица 9: Концентрация продукта в каскадах газовой диффузии, производящих НОУ из естественного урана, при разных α_i .

Изотоп	Концентрация продукта α_i из (10)	Концентрация продукта α_i из (4)	Разница %
U-234	0.00047791	0.00047747	-0.0922
U-235	0.05	0.05	0

Таблица 10: Концентрация продукта в каскадах газовой диффузии, производящих ВОУ из естественного урана при разных α_i

Изотоп	Концентрация продукта α_i из (10)	Концентрация продукта α_i из (4)	Разница %
U-234	0.00934694	0.00933759	-0.100
U-235	0.93	0.93	0

Таблица 11: Концентрация продукта в каскадах газовой диффузии, производящих НОУ из отработанного урана при разных α_i

Изотоп	Концентрация продукта α_i из (10)	Концентрация продукта α_i из (4)	Разница %
U-232	7.5567E-11	7.5514E-11	-0.070
U-234	0.00133083	0.00132900	-0.070
U-235	0.05	0.05	0
U-236	0.01564999	0.01567094	0.134

Таблица 12: Концентрация продукта в каскадах газовой диффузии, производящих ВОУ из отработанного урана при разных α_i

Изотоп	Концентрация продукта α_i из (10)	Концентрация продукта α_i из (4)	Разница %
U-232	1.2008E-09	1.1999E-09	-0.075
U-234	0.02097610	0.02095960	-0.079
U-235	0.75	0.75	0
U-236	0.16348610	0.16406253	0.351

Результаты обогащения отработанного урана до уровней НОУ и ВОУ представлены в Таблицах 11 и 12, соответственно. В обоих случаях разница в вычисленном содержании изотопов легче U-235 меньше, чем 0.1%. Содержание U-236 отличается на 0,134% в НОУ и на 0.351% в ВОУ. Эти результаты заметно отличаются от того, что было представлено для каскадов с газовыми центрифугами.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

В этой статье мы попытались смоделировать коэффициенты разделения таким образом, который отражает физику двух процессов обогащения – газовой центрифуги и газовой диффузии. Были проанализированы различные методы представления полных коэффициентов разделения ступени α_i для i -го компонента в многокомпонентной смеси изотопов и выполнены расчеты каскадов с использованием измененной M^* -программы для исследования малых изотопов в НОУ и ВОУ, полученных из естественного или отработанного урана.

В газовой центрифуге коэффициенты разделения зависят от разницы молекулярных весов и они промоделированы уравнением (9). При газовой диффузии коэффициенты разделения зависят от отношения молекулярных весов и они промоделированы уравнением (10). Оригинальная M^* -программа была изменена, чтобы позволить пользователям предписать коэффициенты разделения для каждого изотопа.

Результаты расчетов, представленные выше, показывают, что существует значительная и, вероятно, измеряемая разница в предсказываемых концентрациях младших изотопов в НОУ- и ВОУ- материалах, полученных при помощи газовой центрифуги или газовой диффузии. Результаты наводят на мысль, что младшие изотопы обладают потенциалом стать меткой для решения спорных проблем в обогащенном уране.

Поскольку малые изотопы урана имеют возможность стать полезным инструментом при решении спорных вопросов, желательно придать юридическую силу теоретическим моделям, представленным в этой статье. Анализы, способные указать на обогатительное предприятие, где был изготовлен уран, смогут немедленно отождествить слабости в системах мер предосторожности и физической безопасности. Для этого окажется очень ценным иметь экспериментальные данные для переработанного урана, обогащенного газовыми центрифугами, чтобы узаконить математическую модель, описываемую уравнением (9), и M^* -расчеты каскада.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. S. Richter, A. Alonso, W. Debolle, R. Wellum, and P. D. P. Taylor, "Isotopic 'Finger-prints' for Natural Uranium Ore Samples," *International Journal of Mass Spectrometry*, 193 (1999), 9-14.
2. U.S Department of Energy Nuclear Safeguards for Uranium Enrichment Plats. Technical Publication No. ISPO-347/R6. (Oak Ridge, TN, Oak Ridge National Laboratory. 2005).
3. J. Shacter, R.I. Høglund, and E. Von Halle, "Diffusion Separation Methods," *Encyclopedia of Chemical Technology* (John Wiley & Sons, Inc., 1965), 91-175.
4. A. De La Garza, G. A. Garrett, and J. E. Murphy, "Multicomponent Isotope Separation in Cascades," *Chemical Engineering Science*, 15 (1961), 188-209.
5. A. De La Garza, "A Generalization of the Matched Abundance-Ratio Cascade for Multicomponent Isotope Separation," *Chemical Engineering Science*, 18 (1963), 73-82.
6. E. Von Halle, "Multicomponent Isotope Separation in Matched Abundance-Ratio Cascades Composed of Stages with Large Separation Factors" in *Proceedings of the 1st Workshop on Separation Phenomena in Liquids and Gases*, ed. K. G. Roesner (Darmstadt, Germany, Institute für Mechanik, 1987), 325-356.
7. E. Von Halle, частное сообщение (2007), 1-10 декабря.
8. C. Schwab, N. A. S. Rodrigues, and H. G. Wood, eds., *Fifth Workshop Proceedings on Separation Phenomena in Liquids and Gases*, Centro Técnico Aeroespacial, Instituto de Estudos Avançados, Ministério da Ciência e Tecnologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Foz do Iguaçu, Brasil, September 22-26, 1998).
9. F. Doneddu, P. Robbin, and H. G. Wood, "Optimization Study for Gas Centrifuges," *Separation Science and Technology*, 35(2000), 8, 1207-1221.
10. Смотрите ссылку [9].
11. P. С. Кемп, "Теория и разработка газовой центрифуги: обзор американского подхода", *Наука и всеобщая безопасность*, готовится к печати.