

ЯДЕРНАЯ АРХЕОЛОГИЯ НА ЗАВОДАХ ОБОГАЩЕНИЯ ПО МЕТОДУ ГАЗОВОЙ ДИФФУЗИИ

Себастьян Филиппе и Александр Глэзер

АННОТАЦИЯ

Газовая диффузия исторически была самой распространенной технологией для производства высокообогащенного урана в военных целях. С июня 2013 года все заводы газодиффузионного обогащения во всем мире навсегда прекратили работу. Опыт вывода из эксплуатации некоторых из этих заводов показал, что в оборудовании их каскадов содержится большое количество урансодержащих частиц. В этой статье оценивается потенциал использования отложений урансодержащих частиц для понимания и реконструкции эксплуатационной истории газодиффузионных обогатительных заводов. Сначала была определена прямоугольная модель обогатительного каскада для оценки обогатительной способности эталонного завода. Затем с помощью модели фильтрации при перетоке была рассчитана масса твердых урансодержащих частиц, осаждающихся с течением времени в трубчатых разделительных мембранах делителей ступени. И, наконец, была проведена оценка потенциальных методов описания этих урановых отложений и их использования для реконструкции эксплуатационной истории завода.

Авторы статьи работают в Лаборатории ядерного будущего Департамента машиностроения и аэрокосмической техники Принстонского университета, Принстон, Нью-Джерси, США.

Почтовый адрес для корреспонденций: Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Princeton University, E-Quad, Olden St, Princeton, NJ 08544, USA.

Адрес электронной почты: sp6@princeton.edu

Статья получена 23 июля 2013 года и принята к публикации 5 ноября 2013 года.

ВВЕДЕНИЕ

Газовая диффузия – это метод разделения изотопов, основанный на молекулярной диффузии газообразной изотопной смеси через пористые барьеры (или мембраны, или фильтры). В случае разделения изотопов урана обрабатываемый газ – это смесь урана-238 и урана-235 в форме гексафторида урана UF_6 .

Газовая диффузия исторически была самым распространенным методом разделения изотопов для производства высокообогащенного урана (ВОУ) в военных целях в странах, обладающих ядерным оружием. В рамках ядерной археологии¹ и разработки новых инструментов для верификации предыдущего производства ядерных расщепляющихся материалов для военных целей в странах, обладающих ядерным оружием, данная статья представляет новый подход к реконструкции эксплуатационной истории газодиффузионных обогатительных заводов (ГДЗ).

В июне 2013 года все газодиффузионные обогатительные заводы прекратили свою работу². Во многих случаях вывод из эксплуатации и демонтаж таких предприятий уже осуществляются, что делает разработку методов верификации своевременной и неотложной задачей перед возможной потерей или непреднамеренным уничтожением во время деятельности по демонтажу. В таблице 1 перечислены газодиффузионные заводы в странах, обладающих ядерным оружием, на которых производился ВОУ для военных целей³. В целом 57% общемирового производства ВОУ для военных целей было проведено методом газодиффузионного обогащения.

Во время первоначальных стадий демонтажа в Соединенных Штатах, Великобритании и Франции было обнаружено, что заводы загрязнены большим количеством твердых урансодержащих отложений в оборудовании каскадов⁴. Масса этих отложений достигала нескольких тонн урана на различных уровнях обогащения, скопившихся на компонентах заводского оборудования⁵. Анализ этого крупного загрязнения может представить собой гигантский источник информации по эксплуатационным историям газодиффузионных обогатительных

заводов, что в значительной степени мотивировало представленное в данной статье исследование.

Таблица 1. Перечень газодиффузионных обогатительных заводов, производивших ВОУ для военных целей. Числа представляют собой оценки, обычно с точностью 20 – 40% (за исключением заявленного производства в США).

Страна	Название завода	Годы работы	Производство ВОУ (тонн)	Доля производства ВОУ в стране (%)
США	Оук Ридж	1945 – 64	491	47,0
	Портсмут	1956 – 92	552	52,8
Россия	Новоуральск	1949 – 87	80	5,6
	Северск	1953 – 93	65	4,4
	Зеленогорск	1962 – 90	90	6,3
	Ангарск	1957 – 93	180	12,5
Великобритания	Кейпенхерст	1954 – 62	11	100
Франция	Пьерлатт	1967 – 96	35	100
Китай	Ланчжоу	1964 – 80	6	30
	Хепин	1965 – 87	14	70

Поэтому был разработан двухэтапный подход к реконструкции историй производства на газодиффузионных обогатительных заводах. Сначала была построена простая математическая модель каскада газодиффузионного обогатительного завода с использованием набора параметров базовых процессов для оценки скорости производства ВОУ на конкретном заводе. Далее рассматривался потенциал ядерного исследовательского анализа урансодержащих отложений, обнаруженных на загрязненном оборудовании, для реконструкции истории завода. Знание скорости производства ВОУ и периодов эксплуатации может дать приближенную оценку общего количества ВОУ, произведенного на конкретном заводе, которую можно будет впоследствии сравнить с производственной документацией.

Для иллюстрации метода и результатов в статье в качестве примера использовался французский газодиффузионный комплекс в Пьерлатте.

МОДЕЛЬ КАСКАДА ГАЗОДИФФУЗИОННОГО ЗАВОДА В ПЬЕРЛАТТЕ

Комплекс газодиффузионных заводов в Пьерлатте был предназначен для производства ВОУ для французских программ ядерного оружия и реакторов подводных лодок. Комплекс изготовил первую партию ВОУ в апреле 1967 года и был остановлен примерно через тридцать лет 30 июня 1996 года⁶. Согласно первоначальным требованиям военных комплекс в Пьерлатте должен был производить как минимум 600 – 700 кг ВОУ оружейного качества в год⁷.

Комплекс в Пьерлатте состоит из четырех главных подразделений (крупных цехов или заводов), каждое из которых представляет одну стадию в прямоугольном каскаде обогащения. Схема комплекса представлена на рисунке 1⁸. В первых проектах 1956 года упоминалось общее количество ступеней на всех четырех заводах, равное 2500⁹. Завод низкого обогащения (*usine basse* или UB) загружался природным ураном и обогащал UF₆ до 2% урана-235, завод среднего обогащения (*usine moyenne* или UM) повышал степень обогащения до 7%, завод высокого обогащения (*usine haute* или УН) – до 25%, и завод очень высокого обогащения (*usine très haute* или УТН) – до 90% и выше¹⁰. Степень обогащения в потоке отвалов, выходящих из завода UB, как сообщают, равна 0,35%¹¹, но в заводах более высокой степени обогащения в первые годы эксплуатации она была выше и составляла 0,5%¹². Этот более высокий уровень характерен для стратегии производства ВОУ так быстро, как это возможно, на ранней стадии эксплуатации комплекса, когда производительность была ограничена доступной разделительной способностью. В 1982 году, когда гражданский газодиффузионный завод компании Eurodif, *George Besse* (GB), достигли своей полной промышленной производительности, завод UB и 75% завода UM были остановлены¹³. После этого низкообогащенный уран, произведенный на заводе GB, направлялся на комплекс в Пьерлатте для дальнейшего обогащения. Начиная с 1984 года, 1 328 ступеней на трех оставшихся заводах (25% UM, УН и УТН) каждый год работали в сезонном режиме с апреля по октябрь до тех пор, пока комплекс не был полностью остановлен в 1996 году¹⁴.

Каждая одиночная ступень на заводах комплекса в Пьерлатте состоит из компрессора, теплообменника, и двух делителей¹⁵. В каждом делителе установлены тысячи маленьких пористых трубок (фильтров). Два делителя соединяются друг с другом так, как это показано на рисунке 2. Такая конфигурация, которая эквивалентна одиночной ступени с внутренней рециркуляцией, может повысить коэффициент разделения ступени на 37,5%,

а ее разделительную мощность – на 89%¹⁶. Средний коэффициент разделения на диффузоре комплекса в Пьерлатте, как сообщают, равен 1,0014¹⁷. В конструкции с двумя делителями средний коэффициент разделения ступени увеличивается до 1,00193.

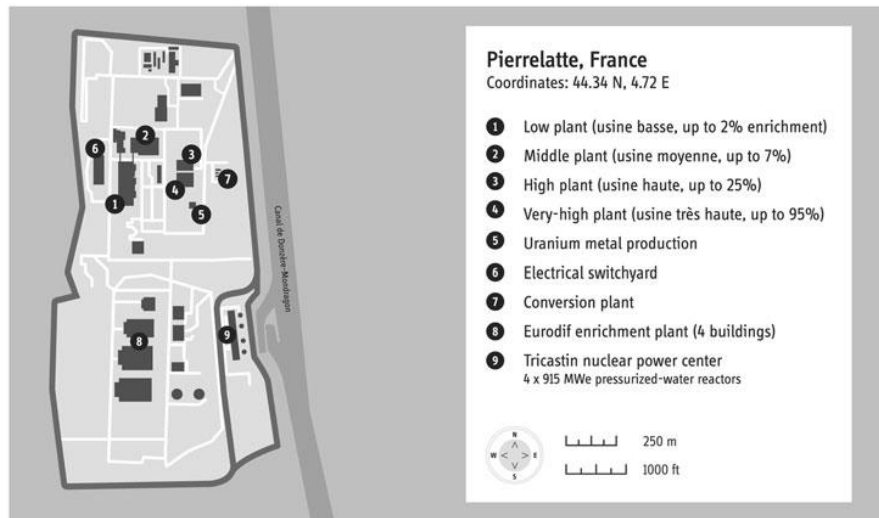


Рисунок 1. Схема площадки в Пьерлатте. Военные заводы обогащения расположены в северной части площадки, а гражданские обогатительные заводы Eurodif George Besse I и II находятся в южной части. Близость обоих комплексов позволяет снабжать военный комплекс низкообогащенным ураном с гражданских заводов, начиная с 1982 года. Площадка располагается на берегу канала Донзер – Мондрагон (координаты 44,34 градуса с.ш. и 4,72 градуса в.д.). Легенда на рисунке: 1 – завод низкого обогащения (до 2%); 2 – завод среднего обогащения (до 7%); 3 – завод высокого обогащения (до 25%); 4 – завод очень высокого обогащения (до 95%); 5 – производство металлического урана; 6 – электрическая подстанция; 7 – конверсионный завод; 8 – обогатительный завод Eurodif (4 здания); 9 – атомная электростанция Трикастен (4 реактора с водой под давлением мощностью 915 МВт (эл.)).

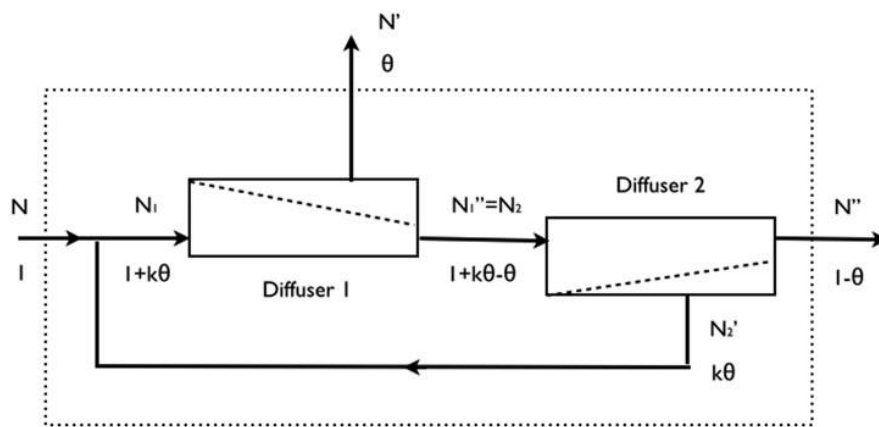


Рисунок 2. Ступень обогащения с двумя делителями. В этой конфигурации при $k = 1$ и $\theta = 0,5$ общий коэффициент разделения ступени и разделительная мощность увеличиваются на 37,5% и 89% соответственно.

На каждом заводе использовались свои собственные типы диффузионного фильтра и компрессора ступени, которые отличались друг от друга. Все барьеры на заводе были построены по композитной многослойной схеме: в каждой трубке тонкий пористый слой наносился сверху структурного слоя, позволяющего фильтру работать при более высоких давлениях¹⁸. Высокое давление в ступенях комплекса в Пьерлатте составляло примерно 0,2 атмосферы¹⁹. Это давление было меньше критического давления UF_6 , и рабочая температура текущего газа все время поддерживалась выше 40 °C для того, чтобы избежать любого затвердевания UF_6 в технологическом оборудовании. Поэтому температура воздуха в производственном корпусе поддерживалась на уровне 55 °C²⁰.

В следующих подразделах будут рассмотрены завод низкого обогащения UB и завод очень высокого обогащения УТН, которые представляют особый интерес для данного анализа. Анализ завода UB позволяет получить информацию о загрузке и отвалах, а конструкция завода УТН непосредственно относится к выходному продукту завода – ВОУ оружейного качества.

Завод низкого обогащения (UB)

Завод низкого обогащения начал производить низкообогащенный уран (2% урана-235) в январе 1965 года²¹. На заводе были установлены 480 ступеней в трех субкаскадах по 160 ступеней²². Поток материала во всех ступенях был одинаковым до 1969 года, когда первоначальный профиль квадратного каскада завода UB стали постепенно модифицировать, чтобы лучше соответствовать профилю идеального каскада вокруг ступени подачи загрузки (смотрите рисунок 3)²³.

Сообщают, что компрессор завода UB – это одноступенчатый сверхзвуковой компрессор мощностью 150 кВт с массовым потоком 5 кг UF⁶ в секунду²⁴ и степенью сжатия 8:1²⁵. Эквивалентный массовый поток урана составит $1,07 \cdot 10^8$ кг урана в год.

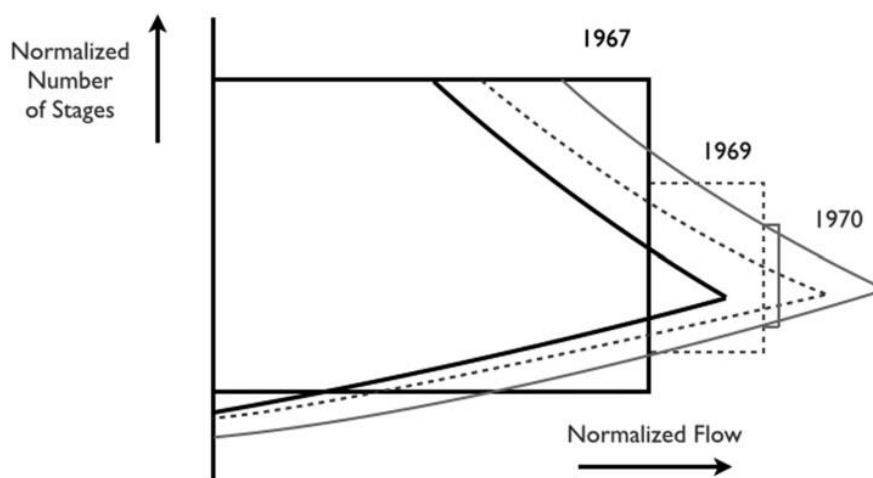


Рисунок 3. Исторический прямоугольный и соответствующий идеальному каскаду профили завода низкого обогащения в первые годы эксплуатации завода. По горизонтальной оси отложен нормированный поток, а по вертикальной оси – нормированное количество ступеней.

Завод очень высокого обогащения (УТН)

Завод очень высокого обогащения (УТН) – это последний этап процесса обогащения, и поэтому его характеристики определяют и ограничивают выход продукции завода. Сообщают, что поток материала на заводе УТН примерно в 60 раз меньше, чем на заводе UB, что соответствует потоку в $1,78 \cdot 10^6$ кг урана в год²⁶. На заводе УТН используется 1150 компрессоров, по одному на каждую ступень²⁷. На основании этих двух значений для потока через ступень и количества ступеней, а также в дальнейших предположениях уровня обогащения продукта в 90% урана-235, уровня обогащения загрузки в 25% (от предыдущего этапа с завода УН) и коэффициента разделения ступени 1,00193, было решено уравнение ступени для завода УТН (уравнения (14) и (10) в Приложении В) для того, чтобы определить поток продукта на заводе. В результате было получено значение потока продукта, примерно равное 580 кг ВОУ оружейного качества в год. В июне 1995 года некоторые из первых компрессоров, установленных на заводе УТН, достигли длительности безаварийной работы в 200 000 рабочих часов²⁸. Предположив длительность эксплуатации в 200 000 часов до июня 1995 года и добавив 5 150 часов для учета дополнительной продукции до прекращения работы комплекса в Пьерлатте в июне 1996 года, мы получим прямую оценку полного количества произведенного в Пьерлатте ВОУ оружейного качества в 14 ± 2 тонн ВОУ. Это количество существенно меньше значений, цитированных ранее в литературе, то есть 35 ± 5 тонн ВОУ оружейного качества²⁹. Такая более низкая оценка основана на предположении, что завод высокого обогащения УН не производил дополнительное количество обогащенного до 25% материала, но не имеется никаких указаний на то, что такой материал использовался во Франции для любых военных или иных целей.

Модель каскада в Пьерлатте и результаты моделирования

Для построения простой модели каскада в Пьерлатте были сделаны различные предположения. Предполагалось, что размещение будет соответствовать прямоугольному каскаду с четырьмя различными секциями, представляющими четыре завода комплекса. Начальная секция комплекса располагается в заводе низкого обогащения. Уровни обогащения на выходе каждой секции соответствуют 2%, 7%, 25% и 90% урана-235. Как сообщалось ранее, содержание урана-235 в загрузке и отвалах соответственно равно 0,7% (природный уран) и 0,5%³⁰. Средний коэффициент разделения α для всех ступеней устанавливается равным 1,00193. Выход продукта с комплекса предполагался равным 600 кг урана в год со степенью обогащения 90%. Уравнения, используемые для построения модели прямоугольного каскада, подробно описаны в Приложении В. Последнее сделанное предположение относится к критерию оптимизации уравнения ступени прямоугольного каскада.

Уравнение ступени связывает количество ступеней S_i с нормированным потоком ψ_i на каждой стадии i прямоугольного каскада:

$$S_i = f(\psi_i, \alpha, N_i, N_{i-1}, N_p) \quad (1)$$

где N_i и N_{i-1} – концентрации продукта и загрузки на i -ой стадии, соответственно, и N_p – концентрация продукта комплекса.

Количество решений этого уравнения бесконечно. Для идентификации однозначного решения потребуется использовать критерий оптимизации. В этой модели выбранный критерий минимизирует полный поток в расчете на один моль продукта. Оптимизация обычно выполняется по функции стоимости каскада для того, чтобы минимизировать стоимость производства обогащенного урана³¹. Тем не менее, сделанные здесь предположения идеальны для минимизации потребления энергии в каскаде и увеличения его эффективности, и они должны предоставить хорошую оценку по порядку величины для потока материала на каждой стадии.

Структура потока в каскаде комплекса в Пьерлатте показана на рисунке 4. Сплошная линия представляет идеальную форму каскада завода³²; показан также эквивалентный прямоугольный каскад, полученный с предположенными ранее параметрами³³.

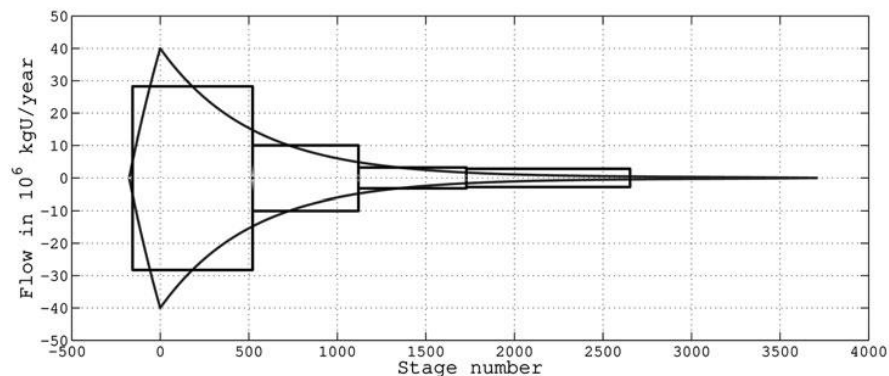


Рисунок 4. Идеальный каскад комплекса в Пьерлатте и эквивалентный прямоугольный каскад, полученные с использованием модели, рассмотренной в Приложении В. На горизонтальной оси показан номер ступени, на вертикальной – поток в 10^6 килограммов урана в год.

В таблице 2 приведена сводка результатов. Разделительная способность для каждой стадии рассчитывалась с помощью следующего уравнения:

$$U_i = \frac{1}{2} L_i S_i (\alpha - 1)^2 \quad (2)$$

В модели представлено только производство ВОУ с 90% урана-235 в Пьерлатте. Важно отметить, что реальная производительность завода, скорее всего, будет больше, если принять во внимание дополнительные потоки продукта на уровнях меньшего обогащения. Эти потоки продуктов используются, например, для производства низкообогащенного урана для топлива военно-морских реакторов, были выведены из расчетов из-за

отсутствия относящейся к ним информации в литературе. Дополнительное производство низкообогащенного урана, хотя оно и важно, имеет вторичное значение для оценки французских запасов ВОУ.

Таблица 2. Результаты модели прямоугольного каскада для комплекса в Пьерлатте для периода начальной эксплуатации. Степень обогащения продукта, загрузки и отвалов соответственно равна 90%, 0,7% и 0,5%.

Заводы	Количество ступеней	Поток материала (10 ⁶ кг урана в год)	Разделительная мощность (10 ³ кг в год)
Низкого обогащения	679	56,5	71,5
Среднего обогащения	597	20,1	22,3
Высокого обогащения	610	6,4	7,3
Очень высокого обогащения	924	5,6	9,6
Всего	2810	–	110,7

Другое различие между моделью и реальностью может включать эволюцию нижней части каскада во времени. Сначала доля урана-235 в отходах равнялась 0,5%, но, вероятно, в какой-то момент она была уменьшена. Тот факт, что после 1984 года завод Eurodif эффективно заменил нижнюю часть комплекса, также может повлиять на оценку. И, наконец, самое большое расхождение может возникнуть от критерия оптимизации, выбранного для решения уравнений прямоугольного каскада. В модели минимизируется полный поток на моль продукта, что эквивалентно минимизации полной разделительной способности в каждой стадии каскада на моль продукта, что может привести к недооценке разделительной способности всего каскада. С учетом всех факторов предыдущие оценки приводили к значению общей производительности завода примерно в 300 000 ЕРР в год³⁴. В одной публикации 1996 года, авторами которой были официальные лица Комиссариата по атомной энергии, приводится производительность в «несколько сотен тысяч ЕРР в год»³⁵.

В следующем разделе рассматривается происхождение твердого урансодержащего загрязнения в оборудовании газодиффузионных заводов, моделируется механизм отложения частиц в диффузорах, и оценивается потенциал применения методов ядерного расследования осажденных частиц как нового инструмента реконструкции эксплуатационной истории газодиффузионных заводов.

ПРОИСХОЖДЕНИЕ ТВЕРДОГО УРАНСОДЕРЖАЩЕГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ В ОБОРУДОВАНИИ ГАЗОДИФФУЗИОННЫХ ЗАВОДОВ

Гексафторид урана – это в высшей степени химически активная молекула. Восстановление UF₆ во время контакта с незащищенной стальной поверхностью приводит к образованию различных твердых соединений урана, таких, как UF₄, UF₅, и U₂F₉.³⁶ Гидролиз UF₆ водой происходит практически мгновенно и приводит к образованию газообразного HF и твердых частиц UO₂F₂. Эти реакции не только являются источниками потерь UF₆, но и приводят к отложениям и коррозии в заводском оборудовании, так же, как и к засорению разделяющих барьеров³⁷. Для проектирования жизнеспособного завода исключительно важно, чтобы проникновение влажного воздуха, или любого типа смазочных масел в производственное оборудование поддерживалось на возможно более низком уровне, но в реальных условиях и в течение длительных периодов времени загрязнение оборудования становится неизбежным. Среди всего оборудования наиболее чувствительным к осаждению урана является диффузионный барьер. Действуя как фильтр при перетоке, пористая мембрана захватывает большую часть взвешенных урансодержащих твердых частиц, несомых потоком UF₆ (смотрите рисунок 5)³⁸. В комплексе в Пьерлатте 80% осажденного урана находится в делителях. После применения различных процессов химической очистки для удаления большей части твердого осадка, согласно оценке, около трех тонн урана с различным уровнем обогащения не могут быть удалены, и они, вместе со связанным производственным оборудованием, должны быть утилизированы в соответствующих хранилищах ядерных отходов³⁹.

Интересно отметить, на Портсмутском заводе в США, где в качестве загружаемого материала использовался переработанный уран, барьеры были загрязнены не только соединениями урана, но также и следами других различных актинидов (например, Th, Np, Pu, Am) и продуктов деления (таких, как Tc-99)⁴⁰. Все эти элементы переносились в форме бинарных молекул гексафторидов (например, ThF₆, NpF₆, PuF₆, AmF₆ и TcF₆).

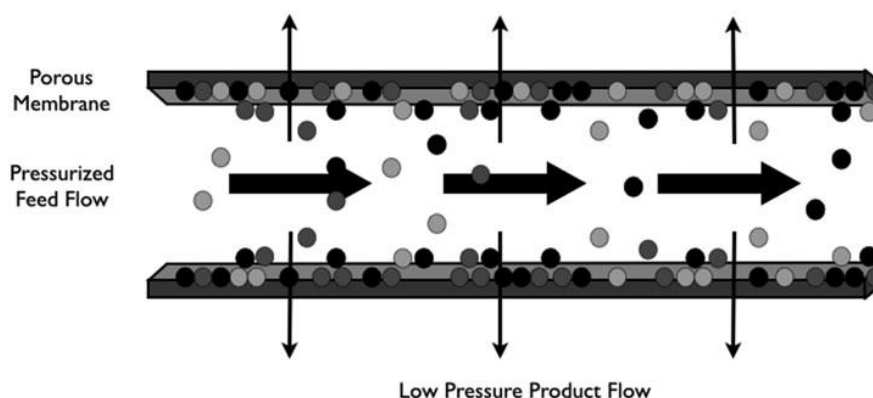


Рисунок 5. Фильтрация при перетече: накопление твердых частиц на пористой поверхности из-за влияния большого градиента давления через мембрану. Надписи на рисунке (сверху вниз): 1 – пористый фильтр; 2 – поток загрузки под давлением; 3 – поток продукта с низким давлением.

МОДЕЛЬ ОСАЖДЕНИЯ UO_2F_2 В ДЕЛИТЕЛЯХ КОМПЛЕКСА В ПЬЕРЛАТТЕ

Ниже оцениваются годовые количества осаждения UO_2F_2 в делителях ступеней газодиффузионного обогатительного завода для того, чтобы определить, можно ли будет использовать методы ядерного расследования для реконструкции выхода завода на основании модели осаждения частиц и данных, представленных в предыдущих разделах. UO_2F_2 – это не единственное твердое урансодержащее соединение, которое может быть обнаружено в барьерах, но его присутствие в газовом потоке непосредственно связано с проникновением влажного воздуха в оборудование, что делает его хорошим кандидатом для такого анализа.

Модель осаждения UO_2F_2 на пористой трубчатой мембране

Механизм осаждения твердых частиц на мембране аналогичен концепции фильтрации при перетече. Поскольку UF_6 перерабатывается в делителе, около половины входящего потока (соответствующего доле прошедшего через фильтр потока) диффундирует через фильтры. Разность давлений на толщине пористого трубчатого фильтра индуцирует радиальную скорость, которая приводит к накоплению твердых частиц в пограничном слое. Благодаря этому феномену, частицы микронных размеров ударяют по фильтру и остаются захваченными в делителе. Теория предсказывает, что в конце концов будет достигнута равновесная толщина слоя⁴¹, но при предполагаемых условиях в потоке, низкой концентрации взвешенных частиц и при нормальных условиях эксплуатации (то есть, отсутствии случайных утечек), толщина слоя никогда не будет приближаться к своему равновесному значению. Считается, что при возникновении случайной утечки засоренные фильтры нельзя будет использовать, и они будут заменены при проведении технического обслуживания. Поэтому можно просто предположить, что масса осажденных частиц возрастает линейно пропорционально концентрации частиц, входящих в делитель⁴², доле проникшего через мембрану потока, и объемному расходу UF_6 в трубчатом фильтре. Скорость осаждения частиц можно будет записать так:

$$\dot{m}_{UO_2F_2} = \theta \cdot C \cdot Q_{UF_6} \quad (3)$$

где θ – доля прошедшего через фильтр потока, C – концентрация твердых частиц и Q_{UF_6} – объемный расход UF_6 .

Концентрация частиц UO_2F_2 в потоке

Присутствие UO_2F_2 обусловлено гидролизом UF_6 водой при проникновении влажного внешнего воздуха в производственное оборудование. Когда появившийся в результате этой реакции HF вступает в контакт с оксидами, он регенерирует воду, что ведет к дальнейшему разложению UF_6 .⁴³ В последующем предполагается, что вся вода, попадающая в производственное оборудование, реагирует с UF_6 . Для того, чтобы найти концентрацию частиц UO_2F_2 в потоке UF_6 , необходимы такие исходные данные: температура, давление и влажность воздуха внутри производственного помещения, а также скорость проникновения в оборуду-

дование⁴⁴. Для завода в Пьерлатте в процессе допускаются два различных значения скорости проникновения (относящиеся к потоку газа, поступающего в оборудование из-за пористости), равные $2 \cdot 10^{-2}$ и 10^{-4} литра на миллилитр в секунду и на кубометр объема, занимаемого UF₆.⁴⁵ Уравнения, используемые для преобразования значений проникновения воздуха в концентрацию частиц UO₂F₂ в потоке, приведены в Приложении С.

Реальная скорость осаждения за первые два с половиной года работы

В 1967 и 1968 году, примерно через 2,5 года после начале производства низкообогащенного урана в Пьерлатте, все фильтры разделения на заводе низкого обогащения UB были заменены. Официальным объяснением было повышение эффективности завода⁴⁶. 5,04 миллиона демонтированных барьерных фильтров было захоронено в грунте на площадке завода⁴⁷. Фильтры были загрязнены твердыми частицами UF₄, UF₅, и UO₂F₂. Масса урана, осажденного на единице площади поверхности, составляла от 10 до 20 г/м², со степенью обогащения от 0,5 до 2,0 % урана-235. В период захоронения фильтров масса урана была примерно равномерно распределена между UF₄, UF₅, и UO₂F₂.⁴⁸ Площадь каждого фильтра равнялась 235 см², а масса составляла 126 г⁴⁹. Согласно сообщениям, длина трубки была приблизительно равной 50 см, а вдоль делителя располагалось 8 трубок⁵⁰. При 480 ступенях и двух делителях на ступень на каждый делитель будет приходиться 5250 барьерных трубок. Легко рассчитать среднюю массу UO₂F₂, осажденную на одном мембранном фильтре; она будет составлять от 0,1 до 0,2 грамма⁵¹, что будет соответствовать скорости осаждения 40 – 80 мг в год на одну трубку завода низкого обогащения (UB)⁵². Это эквивалентно скорости осаждения в 1,7 – 3,4 г UO₂F₂ в год на квадратный метр фильтров; доля урана, осажденного в форме UO₂F₂, по отношению к урану, прошедшему через фильтр, будет равна $9 \cdot 10^{-12}$.

Ожидаемая скорость осаждения UO₂F₂ в модели

Используя геометрию трубки, определенную в предыдущем подразделе, и скорость проникновения воздуха в производственное оборудование, равную $2 \cdot 10^{-2}$ литра на миллилитр в секунду и на кубометр объема, занимаемого UF₆, можно рассчитать концентрацию частиц UO₂F₂ в потоке, равную $3,6 \cdot 10^{-12}$ кг/м³, что приведет к скорости осаждения 0,13 мг UO₂F₂ в год на одну трубку. Это соответствует ежегодному осаждению $5 \cdot 10^7$ сферических частиц UO₂F₂ диаметром в 1 микрон⁵³.

АНАЛИЗ ОСАЖДЕННЫХ ЧАСТИЦ В ЯДЕРНОМ РАССЛЕДОВАНИИ

Предыдущие результаты показывают, что большое количество частиц UO₂F₂, захватываемых с течением времени, достаточно для анализа образцов барьера в ядерном расследовании. В таком предположении можно будет получить существенную информацию даже от одной трубки, то есть одной из нескольких миллионов трубок.

Общий анализ выбранной трубки позволит получить информацию по уровням обогащения, включая отношения урана-235 к урану-238, и урана-234 к урану 238, что делает возможной довольно точную локализацию положения трубки в обогатительном каскаде. Если будет доступно большое количество образцов, то это позволит подогнать модель прямоугольного каскада и получить хорошую аппроксимацию формы каскада и нормированной производительности. Эти результаты можно будет совместить, например, с механическим анализом компрессора ступени для оценки максимальной производительности каскада.

Большое доступное количество урана может также позволить определить возраст осажденных частиц, используя, например, хронометр на базе отношения тория-230 к урану-234⁵⁴. На рисунке 6 показано предсказываемое количество атомов урана-234 на одиночном трубчатом фильтре с завода очень высокого обогащения УТН для трех различных сценариев. Первый сценарий представляет сценарий производства на комплексе в Пьерлатте, построенный по информации из литературы (полное производство с 1967 года, затем сезонное производство с 1982 до 1996 года). Второй сценарий предполагает полное производство ВОУ в Пьерлатте в течение всего периода работы комплекса. Третий сценарий – это еще один гипотетический сценарий, предполагающий постоянное производство в течение всего периода работы завода и окончание работы с тем же самым запасом урана-234, что и во втором сценарии. Комбинируя эти три значения запасов урана-234 с их соответствующими отношениями хронометра на базе отношения тория-230 к урану-234 [$4,09 \cdot 10^{-5}$, $3,55 \cdot 10^{-5}$, и $4,09 \cdot 10^{-5}$], можно будет различить эти сценарии. Общий анализ частиц, извлеченных из одного трубчатого

фильтра делителя, может поэтому оказаться достаточным для выбора между возможными историями производства и помочь подтвердить правильность и полноту деклараций по расщепляющимся материалам на конкретном заводе.

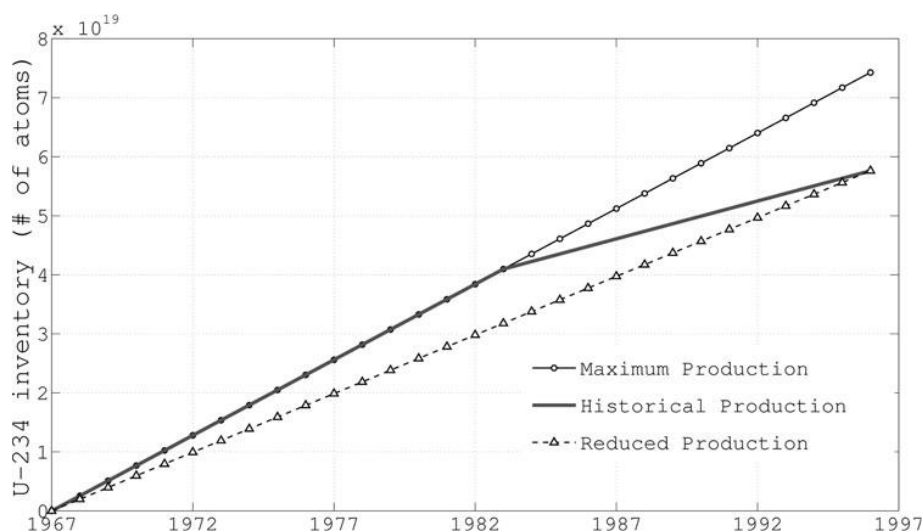


Рисунок 6. Запасы урана-234 на одиночном трубчатом фильтре для трех различных сценариев. Сплошная линия представляет декларированную историю производства в Пьерлатте. Линия с круглыми маркерами представляет сценарий максимального производства в течение всего периода работы комплекса. Штриховая линия с треугольными маркерами представляет постоянное производство в течение всего периода работы, заканчивающейся с теми же самыми запасами урана-234, что и в сценарии исторического производства. На горизонтальной оси отмечено время, на вертикальной оси – количество атомов урана-234.

Далее, если команда следователей сможет выбрать индивидуальные частицы, или выполнить статистическую выборку на фильтре, то в принципе станет возможным реконструировать полную историю производства на ступени, или, с экстраполяцией, на каскаде. Каждая частица обладает индивидуальным отношением тория-230 к урану-234, отмечающим конкретное время, в которое работал каскад. Следовательно, непрерывное загрязнение фильтра во время производства будет «сохранять» историю производства в осажденной частице на поверхности фильтра. Временное разрешение, необходимое для получения ясной истории, составит примерно 2 – 3 месяца, что позволит аналитикам различать периоды производства и длительные выключения. Способность индивидуального анализа частиц будет исключительно полезной для ядерной археологии газодиффузионных заводов. Количество доступных для анализа частиц представляется вполне достаточным, даже при частичной потере информации из-за влияния процесса вывода из эксплуатации, которое обсуждается ниже.

ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССА ВЫВОДА ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Во время вывода газодиффузионных заводов из эксплуатации различные действия могут повлиять на возможность характеризовать и исследовать урансодержащие отложения. Основные трудности для эффективного археологического анализа возникают из-за дезактивации завода и удаления основной части урансодержащих отложений, которые не могут потребоваться, или оказаться предпочтительными по причинам охраны окружающей среды. Более того, анализ может быть ограничен по возможности доступа к вывозимому производственному оборудованию после того, как оно было направлено на утилизацию, или в хранилища ядерных отходов.

Процесс очистки

Одним из первых действий, предпринимаемых в процессе вывода из эксплуатации, будет попытка удалить большую часть соединений урана, осажденных на стенках ступеней каскада. Если завод еще не выведен из эксплуатации, то для удаления большей части отложений может быть использована газовая очистка. Операторы завода могут закачивать в каскад фторирующий реагент (например, трифторид хлора ClF_3 или трифторид азота NF_3). Трифторид хлора ClF_3 сначала растворяет основную массу отложений UO_2F_2 и затем удаляет их в форме UF_6 , для последующего повторного использования⁵⁵. В Пьерлатте эта операция, вместе с первоначальным удалением запасов UF_6 проводилась сразу же после окончания производства в июне 1996 года, и для ее

завершения на заводах высокого и очень высокого обогащения (UH и UTH) потребовалось полтора года⁵⁶. Следующим этапом был демонтаж всего оборудования каскада, находившегося в контакте с UF₆ с использованием методов химического или механического удаления для дополнительной очистки. Процесс очистки существенно уменьшает количество осажденного материала. В статье, недавно опубликованной исследователями из Комиссариата по атомной энергии, отмечалось, что процессы очистки (аспирация, очистка под высоким давлением, и погружение в ванну), проведенные на компрессорах завода с низким обогащением (UB), уменьшила загрязнение ураном-235 (в основном, в твердой форме UF₄) с 18 г до 9 г⁵⁷. Это соответствует количеству доступного для анализа UF₄, оставшемуся в каждом компрессоре, в 900 г, что делает компрессоры хорошими альтернативными кандидатами для получения информации об истории производства, если разделительные фильтры останутся засекреченными изделиями. Известно, что будут доступны дополнительные данные, относящиеся к влиянию очистки; например, из программ улучшения и обновления каскадов в США⁵⁸.

Доступность демонтированных материалов

Одним из экономических стимулов демонтажа газодиффузионных заводов является возможность повторного использования металлов для их продажи в качестве очищенного лома на рынках металлов. Этот лом включает большие количества алюминия или стали. Будут ли такие дезактивированные металлы открыто проданы после дезактивации, или нет, зависит от национального законодательства. В Великобритании законодательство разрешает поступать таким образом, когда активность отходов опустится ниже определенного уровня (обычно выражающегося в беккерелях на килограмм); таким образом из 160 000 тонн металла и бетона, составляющих здания диффузионного завода в Кейпенхорсте и их содержимое, 99% было повторно использовано в качестве чистого материала. В хранилище низкоактивных отходов посылается только оборудование, дезактивация которого была экономически невыгодной⁵⁹; такие материалы будут единственно доступными для анализа осажденных частиц. Авторам неизвестно, включает ли оставшееся после демонтажа Кейпенхорста оборудование диффузионные фильтры, или нет.

Законодательство Франции сильно отличается. Даже для отходов очень низкой активности не существует никакого предела активности, ниже которого отходы будут рассматриваться как обычные промышленные отходы; таким образом, повторное появление таких материалов на рынке в настоящее время запрещено⁶⁰, что повышает потенциальную возможность доступа к таким материалам для изучения осажденных частиц. Как обсуждалось ранее в этой статье, на комплексе в Пьерлатте, 80% остающейся массы урана удерживается в делителях. Во время демонтажа после извлечения из ступеней различных модулей завода, пористые трубчатые фильтры были перемолоты, перемешаны и затем замешаны в бетон для окончательной транспортировки в хранилища ядерных отходов, что исключительно усложняет их извлечение на последующей стадии⁶¹.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье рассматривается новый подход к реконструкции историй эксплуатации газодиффузионных обогатительных заводов. Используя простую модель для реконструкции прямоугольного каскада и оценивая потенциал анализа ядерного расследования большого количества урана, осажденного в производственном оборудовании, в особенности в диффузионных фильтрах, было показано, что в принципе возможно сделать хорошие оценки производственной мощности газодиффузионного обогатительного завода, включая разделительную мощность и периоды эксплуатации. Эти результаты можно будет сравнить, например, с записями производства материалов, доступ к которым может быть предоставлен государством, обладающим ядерным оружием, в качестве инициативы по прозрачности, или режима верификации контроля над вооружениями. Это поможет построить доверие к данным по объему производства обогащенного урана на конкретном заводе.

Во время демонтажа газодиффузионного завода различные типы процессов очистки, обычно применяемых для уменьшения опасений для окружающей среды, оказывают серьезное влияние на природу и количество извлекаемых отложений. Страны, имеющие опыт демонтажа, могут внести свой вклад в более точное определение такого влияния. Возможность получить доступ к демонтированному загрязненному оборудованию может быть необходимой для выполнения значимого ядерного археологического анализа. Поскольку сейчас все газодиффузионные заводы выключены, для стран может оказаться важным либо сохранить некоторые загрязненные диффузионные фильтры в неприкосновенности для последующего анализа, либо тщательно охарактеризовать эти фильтры перед утилизацией. В целом результаты, представленные в данной статье, позволяют предположить, что оборудование газодиффузионных заводов, и в особенности диффузионные фильтры, могут быть уникальным источником информации для будущей ядерной археологии, который может помочь верифицировать полноту историй производства расщепляющихся материалов.

Государства с выключенными газодиффузионными заводами могут помочь подтвердить правильность представленных в данной статье концепций ядерной археологии. Особую важность представляет экспериментальная работа, включающая характеризацию отложений, определение возраста индивидуальных частиц, осажденных на разделительных фильтрах, и реконструкция ключевых проектных параметров завода, таких, как скорости проникновения влажного воздуха, для подтверждения модели осаждения. Эти исследования потенциально могут быть проведены в рамках международного сотрудничества, возможно, даже с участием стран, не обладающих ядерным оружием, поддерживая важность ядерной археологии как средства для верификации основных деклараций по истории производства расщепляющихся материалов.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Steve Fetter, "Nuclear Archaeology: Verifying Declarations of Fissile Material Production," *Science & Global Security* 3 (1993): 237–259.
2. Эксплуатация завода George Besse I (Eurodif) прекратилась в 2012 году, а заводы в Падьюке прекратили операции по обогащению урана в мае 2013 года. Оба завода в Падьюке производили низко обогащенный уран.
3. Данные в таблице 1 получены из различных источников. Соединенные Штаты сделали официальные заявления в 2006 году, U.S. Department of Energy, *Highly Enriched Uranium: Striking a Balance. A Historical Report on the United States Highly Enriched Uranium Production, Acquisition, and Utilization Activities from 1945 through September 30, 1996*, (2001): 1–174, <www.ipfmlibrary.org/doe01.pdf>. Оценки для России основаны на статье Павла Подвига: Pavel Podvig, "History of Highly Enriched Uranium Production in Russia," *Science & Global Security* 19(1) (2011): 46–67. Данные по индивидуальным заводам были любезно предоставлены автором Павлом Подвигом (частное сообщение, ноябрь 2013 года). Великобритания сделала заявление о своих запасах ВОУ в 2006 году. Эти запасы включают существенное количество, предоставленное Соединенными Штатами. В декларации Великобритании не указано количество ВОУ, произведенного внутри страны на заводе в Кейпенхерсте. Оценка взята из публикации: International Panel on Fissile Materials, "Global Fissile Material Report 2010, Balancing the Books: Production and Stocks," (2010): 71–76, <www.fissilematerials.org/library/gfmr10.pdf>. Оценки для Франции базируются на работе: International Panel on Fissile Materials, *Balancing the Books: Production and Stocks*. Однако, полученные в данной статье результаты представляют новый технический базис для существенно более низкой оценки. Далее это обсуждается в работе International Panel on Fissile Materials, "Global Fissile Material Report 2013, Increasing Transparency of Nuclear Warhead and Fissile Material Stocks as a Step toward Disarmament," (2013): 12–13 <www.fissilematerials.org/library/gfmr13.pdf>. Оценки для Китая базируются на: International Panel on Fissile Materials, *Balancing the Books: Production and Stocks*, *op. cit.*, 97–102.
4. Для Соединенных Штатов смотрите: Committee on Decontamination and Decommissioning of Uranium Enrichment Facilities, National Research Council, *Affordable Cleanup? Opportunities for Cost Reduction in the Decontamination and Decommissioning of the Nation's Uranium Enrichment Facilities* (Washington, DC: The National Academies Press, 1996): 35–41, <www.nap.edu/openbook.php?record_id=5114&page=R1>; для Великобритании смотрите: S. G. Baxter and P. Bradbury, "Decommissioning of the Gaseous Diffusion Plant at BNFL Capenhurst," in *WMS Papers* (presented at the Waste Management Symposia, Phoenix, AZ, 1991): 735–737; для Франции смотрите: Pascal Bourrelier and Charles Kassel, "Le De'mantèlement Des Usines Militaires de Pierrelatte," *Annales Des Mines* (July 1999): 37–43.
5. Pascal Bourrelier and Charles Kassel, *op. cit.*, 41. (ссылка 4)
6. Pascal Bourrelier and Charles Kassel, *op. cit.*, 37–38. (ссылка 4)
7. Jean-Pierre Daviet, Eurodif: *Histoire de l'enrichissement de l'uranium, 1973–1993* ([Anvers]: Fonds Mercator, 1993): 169.
8. International Panel on Fissile Materials, *Balancing the Books: Production and Stocks*, *op. cit.*, 86. (ссылка 3)
9. Jean-Pierre Daviet, *Eurodif: Histoire de l'enrichissement de l'uranium, 1973–1993*, *op. cit.*, 169. (ссылка 7)
10. International Panel on Fissile Materials, *Balancing the Books: Production and Stocks*, *op. cit.*, 85. (ссылка 3)
11. Claude Frejacques et al., "Principal Results Obtained in France in Studies of the Separation of the Uranium Isotopes by Gaseous Diffusion," 4 (presented at the second United Nations international conference on the peaceful uses of atomic energy, Geneva, 1959): 418–421.
12. KREBS, Etablissement de Pierrelatte. Butte de Stockage: Reconnaissance et Etude d'Impact, (May 1998) 4, <www.areva.com/activities/liblocal/docs/BG%20amont/monde/tricastin/RapportKrebsbutte%20de%20stockage.pdf>.
13. Cogema, "Pierrelatte A Bien Rede'marre'," *Cogemagazine* 24 (1985): 5.

14. Didier Chauvet, Ordonnancement de la maintenance des usines de diffusion gazeuse et de la distribution électrique (Etablissement de Pierrelatte: Cogema, 19 April 1990), 1.
15. Pascal Bourrelrier and Charles Kassel, *op. cit.*, 40. (ссылка 4)
16. Daniel Massignon, "Gaseous Diffusion," in *Uranium Enrichment*, ed. Stelio Villani, 35 (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1979), 55–182.
17. Pascal Bourrelrier and Charles Kassel, *op. cit.*, 40. (ссылка 4)
18. Jean-Pierre Daviet, "Eurodif: Histoire de l'enrichissement de l'uranium, 1973–1993," *op. cit.*, 193. (ссылка 7)
19. Pierre Plurien and Jean-Hubert Coates, "La diffusion gazeuse en France de Pierrelatte à Eurodif," *Revue Generale Nucleaire 2* (March 1996): 11–16.
20. Paul Dreyfus, "Pierrelatte, l'usine-mystere ouvre ses portes a la presse," *Le Dauphine Libere*, 28 March 1964.
21. Paul Dreyfus, "M. Gaston Palewski a inaugure l'usine basse de Pierrelatte," *Le Dauphine Libere*, January 21, 1965.
22. Jean-Pierre Daviet, *Eurodif: Histoire de l'enrichissement de l'uranium, 1973–1993, op. cit.*, 196. (ссылка 7)
23. C. Leduc et al., "Acquis Francais en Matiere de Separation Isotopique," Vol. 9, presented at the fourth United Nations international conference on the peaceful uses of atomic energy, New York (1972), 15–29.
24. Jean-Pierre Daviet, *Eurodif: Histoire de l'enrichissement de l'uranium, 1973–1993, op. cit.*, 194. (ссылка 7)
25. Claude Frejacques et al., *op. cit.*, 421. (ссылка 11)
26. Jean-Pierre Daviet, "Eurodif: Histoire de l'enrichissement de l'uranium, 1973–1993," *op. cit.*, 195. (ссылка 7)
27. "Cogema: Le secret de 'voile'," *La Tribune*, 2 November 1995, 11.
28. Там же.
29. International Panel on Fissile Materials, Balancing the Books: Production and Stocks, *op. cit.*, 87 (ссылка 3); David Albright, Frans Berkhout, and William Walker, Plutonium and Highly Enriched Uranium, 1996: World Inventories, Capabilities, and Policies (SIPRI, 1997): 122–126.
30. KREBS, Etablissement de Pierrelatte. Butte de Stockage: Reconnaissance et Etude d'Impact, *op. cit.*, 4. (ссылка 12)
31. Jean Claude Guais, "Hierarchical Optimization in Isotope Separation – Gaseous Diffusion Plant-cascade-stage – Principle and Applications," in Proceedings of the International Conference Organised by the British Nuclear Energy Society in Conjunction with Kerntechnische Gesellschaft (presented at the Uranium isotope separation, London: The British Nuclear Energy Society, 1976): 151–164.
32. Для уравнений, используемых для расчета прямоугольного каскада, обращайтесь к Bruno Brigoli, "Cascade Theory," in *Uranium Enrichment*, ed. Stelio Villani, vol. 35 (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1979): 24–28.
33. Уравнения, использованные для построения упрощенной модели каскада, определены по теории, представленной в работах Karl Cohen, *The Theory of Isotope Separation as Applied to the Large-Scale Production of U-235* (New York: McGraw-Hill, 1951): 1–165 и Bruno Brigoli, *op. cit.*, 47–51 (ссылка 32). В этой модели критерий для оптимизации формы каскада служит минимизация полного потока на каждой ступени в расчете на моль продукта.
34. International Panel on Fissile Materials, Balancing the Books: Production and Stocks, *op. cit.*, 87. (ссылка 3)
35. Pierre Plurien and Jean-Hubert Coates, *op. cit.*, 11. (ссылка 19)
36. Randall D. Scheele et al., "Development of NF₃ Deposit Removal Technology for the Porthsmouth Gaseous Diffusion Plant," in *WMS Papers (presented at the Waste Management Symposia, Tucson, AZ, 2006)*: 1–15, <www.wmsym.org/archives/2006/pdfs/6297.pdf>.
37. Daniel Massignon, *op. cit.*, 125. (ссылка 16)
38. G. Menard et al., "Filtration Tangentielle des Gaz: Etude de la Formation du Depot," *Powder Technology 71*, (September 1992): 263–272.
39. Pascal Bourrelrier and Charles Kassel, *op. cit.*, 41. (ссылка 4)
40. Fluor-B&W Portsmouth LLC, "Expression of Interest: Recycling of Porthsmouth GDP Radiologically Contaminated Nickel," 2012, 1–6, <[www.fbportsmouth.com/\(17docs/Solicitations/3-23-12%20Final%20FBP%20Ni%20EOI.pdf](http://www.fbportsmouth.com/(17docs/Solicitations/3-23-12%20Final%20FBP%20Ni%20EOI.pdf)>.
41. В этом режиме повторный унос частиц из-за возрастающей скорости сдвига на границе между газом и отложением уравнивает количество вновь захваченных частиц, останавливая дальнейший рост слоя отложения.
42. G. Menard et al., *op. cit.* (ссылка 38)
43. Влияние водного регенерационного цикла на концентрацию частиц оценить трудно, и оно остается неизвестным для авторов.
44. Температура и давление воздуха внутри производственного здания предполагаются равными 55 °C и 1 атмосфере. Никаких данных об относительной влажности воздуха найдено не было. Для расчетов исполь-

зовалась величина в 15% в предположении относительно сухой и контролируемой атмосферы в производственном здании.

45. Claude Frejaques et al., *op. cit.*, 420 (ссылка 11); Daniel Massignon, *op. cit.*, 137. (ссылка 16)
46. Commissariat à l'Énergie Atomique, CEA Rapport Annuel, (1967): 1–217.
47. KREBS, Etablissement de Pierrelatte. Butte de Stockage: Reconnaissance et Etude d'Impact, *op. cit.*, 4. (ссылка 12)
48. Там же.
49. Там же.
50. Jean-Pierre Daviet, "Eurodif: Histoire de l'enrichissement de l'uranium, 1973–1993," *op. cit.*, 207. (ссылка 7)
51. KREBS, Etablissement de Pierrelatte. Butte de Stockage: Reconnaissance et Etude d'Impact, *op. cit.*, 4. (ссылка 12)
52. Это количество будет эквивалентно $1,6 \cdot 10^{10}$ сферических частиц диаметром один микрон, захваченных за год в каждой трубчатой мембране.
53. Эта скорость примерно в триста раз меньше, чем скорость, рассчитанная по захороненным фильтрам первого поколения. Это явно указывает на то, что процесс на комплексе в Пьерлатте не работал так, как это было предусмотрено в проекте, или как это было задано в первые годы эксплуатации. Это в конце концов привело к замене всех трубчатых фильтров (около 5 миллионов) на заводе низкого обогащения (UB) всего через 2,5 года после начала производства.
54. Alexander Glaser and Stefan Burger, "Verification of a Fissile Material Cutoff Treaty: The Case of Enrichment Facilities and the Role of Ultra-trace Level Isotope Ratio Analysis," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 280, 1 (April 1, 2009): 85–90.
55. Committee on Decontamination and Decommissioning of Uranium Enrichment Facilities, National Research Council, *Affordable Cleanup?*, *op. cit.*, 52. (ссылка 4)
56. Pascal Bourrellet and Charles Kassel, *op. cit.*, 41. (ссылка 4)
57. Fanny Jallu et al., "Dismantling and Decommissioning: The Interest of Passive Neutron Measurement to Control and Characterise Radioactive Wastes Containing Uranium," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 271 (January 15, 2012): 48–54.
58. Committee on Decontamination and Decommissioning of Uranium Enrichment Facilities, National Research Council, *Affordable Cleanup?*, *op. cit.*, 51. (ссылка 4)
59. S.G. Baxter and P. Bradbury, *op. cit.* (ссылка 4)
60. Смотрите веб-сайт <www.dechets-radioactifs.com/les-dechets-radioactifs/classification/dechets-tfa.html>, редактируемый Французским агентством управления радиоактивными отходами (ANDRA).
61. COGEMA, Dossier de demande d'autorisation des rejets d'effluents liquides et gazeux radioactifs et non radioactifs, Titre 2, (INBS-COGEMA-PIERRELATTE, 2000): 31.
62. Daniel Massignon, *op. cit.*, 55. (ссылка 16)
63. Daniel Massignon, *op. cit.*, 57. (ссылка 16)
64. Jean-Pierre Daviet, "Eurodif: Histoire de l'enrichissement de l'uranium, 1973–1993," *op. cit.*, 21. (ссылка 7)
65. Karl Cohen, The Theory of Isotope Separation as Applied to the Large-Scale Production of U-235, *op. cit.*, 29. (ссылка 33)

ПРИЛОЖЕНИЕ А ВВЕДЕНИЕ В ПРОЦЕСС ГАЗОВОЙ ДИФФУЗИИ

Газовая диффузия – это метод разделения изотопов, основанный на молекулярной диффузии в газообразной смеси изотопов через пористые барьеры (или мембраны, или фильтры). В случае разделения изотопов урана, обрабатываемый газ – это гексафторид урана UF_6 , в состав которого входят изотопы урана-235 и урана-238.

В замкнутой камере в условиях теплового равновесия все молекулы изотопной смеси будут иметь одинаковую среднюю кинетическую энергию. В среднем, при одной и той же температуре более легкие молекулы будут двигаться быстрее, и, следовательно, они будут чаще сталкиваться с окружающими стенками. Если одно из граничных условий будет представлено пористым фильтром с достаточно малыми порами для того, чтобы избежать обратного втекания газа, но позволять молекулярную диффузию, то та часть газа, которая пройдет через фильтр, будет обогащена более легкими изотопами⁶².

На рисунке 7 показана простая диффузионная ступень, верхняя и нижняя полоски представляют диффузионный фильтр. Пары значений (N, L) , $(N', L' = \theta L)$ и $(N'', L'' = (1-\theta)L)$ соответственно представляют состав и молярный поток в потоке загрузки, обогащенном потоке и обедненном потоке, где θ – доля потока, проходящая через фильтр. Типичное значение доли проходящего через фильтр потока, равное 0,5, означает, что половина

обработанного газа будет слабо обогащена на выходе из ступени.

Идеальный коэффициент разделения, который определяет изменение концентрации в газовой смеси гексафторида урана при проходе через ступень, задается отношением средних скоростей в распределении Максвелла для двух изотопов урана в форме гексафторида⁶³:

$$\alpha_0 = \frac{N'}{(1-N')} \frac{1-N}{N} = \frac{\bar{v}_1}{\bar{v}_2} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}} = \sqrt{\frac{352}{349}} = 1.00429 \quad (4)$$

Фактически коэффициент разделения α одиночной ступени будет меньше идеального коэффициента разделения α_0 из-за коэффициента эффективности фильтра. Коэффициент разделения обычных фильтров не превышает 1,0022.⁶⁴

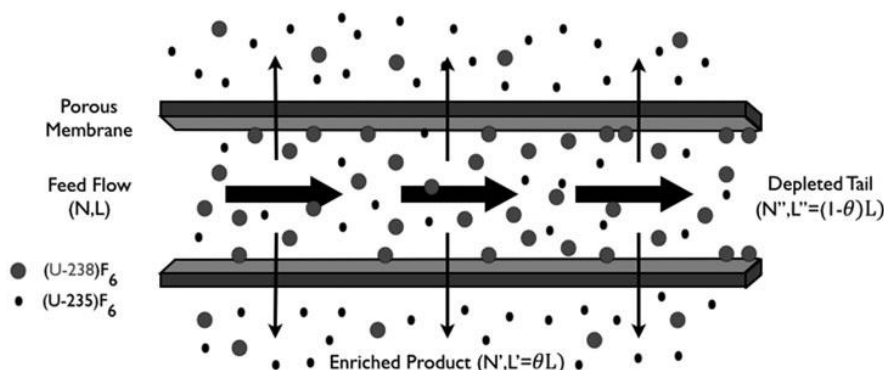


Рисунок 7. Простая диффузионная ступень. Надписи на рисунке (сверху вниз и слева направо): 1 – пористый фильтр; 2 – поток загрузки; 3 – обедненные отвалы; 4 – обогащенный продукт.

Поскольку коэффициент разделения так мало отличается от единицы, обогащение ураном-235 до уровня, необходимого для использования в ядерном оружии (более 90% урана-235), гексафториду урана придется пройти через многочисленные соединенные между собой ступени каскада (обычно через несколько тысяч ступеней).

ПРИЛОЖЕНИЕ В РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ СТУПЕНИ ДЛЯ ПРЯМОУГОЛЬНОГО КАСКАДА

Фундаментальное уравнение разделения изотопов

Фундаментальное уравнение разделения изотопов описывает приближение к равновесию в каскаде⁶⁵:

$$H \frac{\partial N}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial s} \left[\frac{L}{2} \frac{\partial N}{\partial s} - (\alpha - 1) LN(1 - N) - PN \right] \quad (5)$$

где H – , N – концентрация изотопа, которая зависит от времени t и номера ступени s , α – коэффициент разделения, L – поток материала в зависимости от номера ступени, и P – поток продукции завода.

В случае прямоугольного каскада поток материала L постоянен и не зависит от номера ступени для каждой стадии, и, в предположении стационарной работы, квазилинейной параболическое уравнение (5) становится таким:

$$\frac{L}{2} \frac{\partial^2 N}{\partial s^2} - (\alpha - 1) L \frac{\partial}{\partial s} (N(1 - N)) - P \frac{\partial N}{\partial s} N = 0 \quad (6)$$

Интегрируя уравнение (6) по s , получаем:

$$-\frac{L}{2} \frac{\partial N}{\partial s} + (\alpha - 1) LN(1 - N) + PN = PN_p \quad (7)$$

где N_P – концентрация изотопа в потоке продукта. И, наконец, второе интегрирование

$$\int ds = \frac{L}{2} \int \frac{dN}{(\alpha - 1)LN(1 - N) + PN - PN_P} \quad (8)$$

дает следующее решение уравнения (6):

$$s = \frac{1}{(\alpha - 1)\Delta(\psi)} \tanh^{-1} \left[\frac{(N_s - N_0)\Delta(\psi)}{(N_s + N_0)(1 + \psi) - 2N_s N_0 - 2\psi N_P} \right] \quad (9)$$

где N_0 – концентрация в потоке загрузки и ψ – нормированная производительность (безразмерное число), определяемая как

$$\psi = \frac{P}{(\alpha - 1)L} \quad (10)$$

Функция $\Delta(\psi)$ определяется как:

$$\Delta(\psi) = [1 + \psi^2 + 2\psi N_P]^{1/2} \quad (11)$$

Уравнение квадратного симметричного каскада с одной секцией

Для квадратного симметричного каскада, где полное число ступеней равно S , и $N_s = N_P$, уравнение ступени превращается в следующее трансцендентное уравнение:

$$S = \frac{1}{(\alpha - 1)\Delta(\psi)} \tanh^{-1} \left[\frac{(N_P - N_0)\Delta(\psi)}{(N_P + N_0)(1 + \psi) - 2N_P N_0 - 2\psi N_P} \right] \quad (12)$$

Существует бесконечное количество пар (S, ψ) , которое удовлетворяет уравнению (12), соответствующее изменению ψ от нуля до ψ_{\max} с

$$\psi_{\max} = \frac{N_0(1 - N_0)}{N_P - N_0} \quad (13)$$

Оптимизация прямоугольного каскада с несколькими секциями

В секциях обогащения при рассмотрении i -ой секции каскада уравнение (9) принимает вид:

$$S_i = \frac{1}{(\alpha - 1)\Delta(\psi_i)} \tanh^{-1} \left[\frac{(N_i - N_{i-1})\Delta(\psi_i)}{(N_i + N_{i-1})(1 + \psi_i) - 2N_i N_{i-1} - 2\psi_i N_P} \right] \quad (14)$$

где N_i и N_{i-1} – концентрации продукта и загрузки в i -ой секции.

Критерий, используемый в данной статье для оптимизации уравнения (14), состоит в минимизации полного потока на моль продукции, или

$$Criterion = \min \left(\frac{LS}{P} \right) \quad (15)$$

с

$$\frac{LS}{P} \propto \frac{S}{\psi} \quad (16)$$

Следовательно, оптимальные условия для i -ой секции определяются как

$$\frac{d}{d\psi_i} \left(\frac{S_i}{\psi_i} \right) = 0 \quad (17)$$

Используя для S_i выражение (14), выражение (17) можно преобразовать к виду:

$$\begin{aligned} & \left[\Delta(\psi_i) + \frac{\psi_i(1 + \psi_i - N_P)}{\Delta(\psi_i)} \right] \tanh^{-1} \left(\frac{U}{V} \right) \\ & = \frac{1}{V^2 - U^2} \psi_i \left[(N_i - N_{i-1})(1 + \psi_i - 2N_P)V - \Delta(\psi_i)(N_i - N_{i-1} - 2N_P)U \right] \end{aligned} \quad (18)$$

с

$$U = (N_i - N_{i-1})\Delta(\psi_i) \quad (19)$$

и

$$V = (N_i - N_{i-1})(1 + \psi_i) - 2N_i N_{i-1} - 2\psi_i N_P \quad (20)$$

Оптимальное значение ψ_i получается из уравнения (18), и затем оно используется для решения уравнения (14) для получения оптимального значения S_i .

Уравнение ступени в секции отгонки отвалов

Пары значений (S_i , ψ_i) в секции отгонки отвалов получаются из того же самого набора уравнений с соответствующей заменой P и N_P на $-W$ (поток отвалов) и N_W (концентрация в отвалах):

$$S_i = \frac{1}{(\alpha - 1)\Delta(\psi_i)} \tanh^{-1} \left[\frac{(N_i - N_{i-1})\Delta(\psi_i)}{(N_i + N_{i-1})(1 + \psi_i) - 2N_i N_{i-1} - 2\psi_i N_W} \right] \quad (21)$$

и

$$\psi = \frac{-W}{(\alpha - 1)L} \quad (22)$$

ПРИЛОЖЕНИЕ С КОНЦЕНТРАЦИЯ ЧАСТИЦ UO_2F_2 В ПОТОКЕ UF_6

Частицы UO_2F_2 образуются при гидролизе UF_6 водой по реакции:



Источником участвующей в процессе воды служит проникновение воздуха, окружающего оборудование. Поток воздуха, a , проникающего в резервуар по порам, выражается в литрах в секунду при давлении в один миллитор. Разработчики завода обычно фиксируют очень низкое допустимой скорости утечки для всего оборудования в литрах в секунду при давлении в один миллитор на кубометр UF_6 .

Если предполагается, что воздух ведет себя как идеальный газ, то тогда молярный поток воздуха, поступающего в оборудование, n_{air} , будет равен:

$$\dot{n}_{air} = \frac{\dot{a}}{RT} \quad (24)$$

где R – постоянная идеального газа и T – средняя температура в производственном здании.

Полное давление смеси идеальных газов равно сумме парциальных давлений всех компонентов:

$$P_{air} = P_{H_2O} + P_{dryair} \quad (25)$$

с

$$\frac{P_{H_2O}}{P_{air}} = \frac{n_{H_2O}}{n_{air}} \quad (26)$$

Парциальное давление воды, P_{H_2O} , в воздухе получается умножением относительной влажности воздуха ϕ внутри здания на давление водяного пара P_{vap} при средней температуре T в производственном здании при помощи формулы Клапейрона

$$\ln\left(\frac{P_{vap}}{P_0}\right) = \frac{ML_v}{R}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right) \quad (27)$$

где M – молярная масса воды, L_v – скрытая теплота испарения, P_0 и T_0 – соответственно давление и температура в точке кипения.

Молярный поток воды, поступающей в оборудование, \dot{n}_{H_2O} , поэтому равен

$$\dot{n}_{H_2O} = \dot{n}_{air} \frac{\phi P_{vap}}{P_{air}} \quad (28)$$

В предположении, что вся вода прореагирует с UF_6 , средняя концентрация частиц UO_2F_2 в потоке равна

$$C = \frac{1}{2} \frac{\dot{n}_{H_2O} M_{UO_2F_2}}{Q_{UF_6}} \quad (29)$$

где $M_{UO_2F_2}$ – молярная масса UO_2F_2 и Q_{UF_6} – объемный расход газа UF_6 .