

ОСОБЕННОСТИ ИСТОЧНИКОВ СТАНДАРТНЫХ УТЕЧЕК ГЕКСАФТОРИДА УРАНА (Исследовательское замечание)

Р. Скотт Кемп

Автор работает по Программе "Наука и всеобщая безопасность", Принстонский университет. Принстон, Нью Джерси, США

Статья получена редакцией 11 ноября 2009 года и принята к опубликованию 10 января 2010 года.

Почтовый адрес для корреспонденции: R.Scott Kemp, Program on Science and Global Security, Princeton University, 225 Nassau Street, 2nd Floor, Princeton, NJ 08542, USA.

Электронный адрес: rskemp@princeton.edu

ВВЕДЕНИЕ

Модели для обнаружения установок с газовыми центрифугами и заводов по конверсии по их утечкам гексафторида урана в атмосферу критично основаны на предполагаемых особенностях источника утечек¹.

К настоящему времени ничего не было опубликовано об экспериментально полученных особенностях источников стандартных утечек ни от газовых центрифуг, ни от заводов по конверсии. Наиболее широко цитируемый источник по особенностям источников для конверсионных заводов основан на пересмотре оценки доз для утечек 60-х годов от здания K-1131 на площадке K-25 американского Агентства по атомной энергии. Однако от этой установки утекало десятки кг в месяц и она не представляет конверсионные заводы современного дня².

Данная исследовательская заметка предоставляет измеряемые особенности источников утечек UF₆ как для предприятий с газовыми центрифугами, так и для коммерческих конверсионных установок. Утечки на конверсионных заводах представлены в Табл.1. Они нормализованы на грамм утекаемого урана, приходящегося на тонну урана в виде продукта. Данные приведены для трех конверсионных установок вместе со статистически достоверными интервалами.

Данные для предприятий с центрифугами были нормализованы на грамм утекающего урана, приходящийся на одну тонну-EPP (EPP – единица разделительной работы) рабочего продукта. Данные от трех предприятий на одной площадке (Кейпенхурст, Великобритания) приведены в Таблицах 2 и 3. Хотя задан достоверный интервал, читатель будет обеспокоен тем, что обобщение по одной площадке несет с собой высокую систематическую ошибку. Значительная часть установок в Кейпенхурсте использует контроль с пониженным давлением и фильтры HEPA для удаления значительного количества утечек из воздуха до откачки в атмосферу. Более того, скорость утечек сильно зависит от типа центрифуги, причем у центрифуг высокого качества утечки значительно уменьшаются. Детальное описание оценок по заводу с центрифугами приводится в последующих обсуждениях.

РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИСТОЧНИКОВ ДЛЯ КОММЕРЧЕСКИХ УСТАНОВОК. ОБСУЖДЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ ДАННЫХ ДЛЯ КОНВЕРСИОННЫХ ЗАВОДОВ.

Honeywell Metropolis

Данные по этому заводу основаны на полугодовых измерениях утечек урановой активности из установки в промежутке 2000-2003 годов, проведенных оператором и должностными руководителями ядерного регулирования США³. Данные были нормализованы табличками по каждому периоду измерений. Общеизвестно, что этот завод страдает из-за больших утечек, и он проверялся по этому поводу несколько раз американской Комиссией по ядерному регулированию. Столь плохо управляемая установка, скорее всего, не представляет современный уровень техники, но могла бы лучше представить установку в развивающейся стране.

Установка Honeywell получает урановую руду в виде желтого порошка (в основном, U₃O₈ и другие окислы),

который сначала проходит через кальцинатор для удаления карбонатов, воды и других летучих веществ. Кальцинированный материал перемешивается и накапливается в специальном оборудовании, сконструированном компанией Honeywell, чтобы получить частицы оптимального размера для операций в газовой среде. Агломераты просеиваются и сортируются. Подготовленное сырье направляется в реактор с кипящим слоем, где оно контактирует при повышенной температуре с водородом. Отдельные загрязнения реагируют и выводятся за пределы системы в струе, которая фильтруется, выжигается и больше не используется. Остающаяся концентрированная двуокись урана (UO₂) направляется прямо в реактор с кипящим слоем, где реакция с HF приводит к образованию тетрафторид урана (UF₄). Снова происходит удаление некоторых загрязнений в виде газов, которые фильтруются и очищаются до выброса в атмосферу. UF₄ вступает в контакт с фтором в специальном флюоринаторе, подавляющая часть металлических загрязнений остается в реакторе при испарении UF₆. Когда гексафторид урана покидает флюоринатор, газ фильтруется отдельным пористым материалом и затем вновь очищается в теплообменниках. Теплообменники периодически чередуются с подогревом UF₆ под давлением до своей температуры плавления, после чего гексафторид урана направляется в блок дистилляции. После дистилляции жидкий UF₆ высокой чистоты разливается в цилиндры емкостью по 14 тонн⁴.

Таблица 1: Суммарная статистика утечек для заводов с конверсией UF₆.

Название установок	Медианная скорость утечки (г/т)	Количество наблюдений	95% достоверный интервал (г/т)
Honeywell Metropolis	16.45	7	13.43 - 19.47
Cameco Port Hope	3.65	20	3.03 - 4.27
Comurhex Pierrelatte	0.11	5	0.06 - 0.17

Эта установка только преобразует UF₄ в UF₆ в то время, как остальные две установки кроме этого производят UF₆ из концентрата оксидов урана.

Самесо Pork Hope

Информация об установке Камеко Порт Хоуп основана на усредненных по времени ежемесячных измерениях утечек, проведенных в первую очередь между 2005 и 2006 годами операторами и опубликованных в ежеквартальных отчетах по совместимости с окружающей средой⁵. Установка Порт Хоуп – это пример хорошо работающего завода несмотря на крупный случайный выброс в 2007 году.

Установка Порт Хоуп получает уран высокой чистоты от очистительного комбината Камко в Блинд Ривер в упаковке по 9.5 тонн в виде триоксида урана UO₃. Триоксид распыляется в тонкий порошок и реагирует с водородом для восстановления в диоксид урана (UO₂). После этого диоксид урана реагирует с плавиковой кислотой (HF) и превращается в тетрафторид урана UF₄, который затем очищается кальцием для удаления воды и летучих при-

месяц. Прошедший очистку UF₄ далее контактирует с чистым фтором для получения газообразного UF₆. Газ фильтруется и сублимируется в холодных ловушках. Холодные ловушки периодически проводят циклы ожигения UF₆, который затем используется для заполнения цилиндров с 10 или 14 тоннами продукта.

Comurhex Pierrelatte

Данные об этой установке взяты из ежегодного доклада об окружающей среде, публикуемого родительской корпорацией AREVA⁷. Данные об излучении имеются на периоды с 2003 до 2007 годов для установки, преобразующей UF₄ в UF₆. Поскольку все этапы, связанные с очищением оксида урана и производством диоксида и триоксида урана, а также UF₄, происходят на других установках, утечки гораздо меньше по сравнению с Honeywell Metropolis и Cameco Port Hope. Детальное описание процесса на заводе в Comurhex получить не удалось.

Таблица 2: Суммарная статистика утечек для заводов с газовыми центрифугами.

Название установки	Медианная скорость утечки (г/т ЕРР)	Количество наблюдений	95% доверительный интервал (г/т ЕРР)
Площадка URENCO Кейпенхурст	0.015	51	0.011 - 0.019
Описание периодов наблюдений приведено в тексте.			

Таблица 3: Утечки из установок в Кейпенхурсте.

Название установки	Медианная скорость утечки (г/т ЕРР)	Количество наблюдений	95% доверительный интервал (г/т ЕРР)
Каскады E22	0.021	51	0.016 - 0.027
Каскады A3	0.0081	34	0.0066 - 0.0097
Каскады E23	0.00072	33	0.00037 - 0.00110
Вспомог. установка E23	0.00017	12	0.00014 - 0.00019

ОБСУЖДЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ ДАННЫХ ОБ ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ЗАВОДАХ С ГАЗОВЫМИ ЦЕНТРИФУГАМИ

Описание площадки в Кейпенхурсте

Если нет специальной оговорки, то вся информация о площадке Urenco в Кейпенхурсте взята из доклада, подготовленного компанией Urenco в ответ на запрос Британского агентства по окружающей среде, где освещаются различные периоды, охватывающие время с 1993 года по 2005 год⁸.

На площадке в Кейпенхурсте работают три завода с центрифугами. Самый старый из них (завод E22) вступил в строй в 1982 году. Он содержит один блок центрифуг LEC, а все остальные используют центрифуги 3LC⁹. Второй по старости завод A3 был запущен в 1985 году в качестве установки для английских военных сил, но в первом квартале 1995 года его купила компания Urenco для коммерческого использования. Как считается, на нем работают центрифуги 3LC последнего поколения¹⁰. Самый новый из этих заводов, завод E23, начал работу в 1997 году, используя центрифуги TC-11¹¹. Дополнительные модули завода E23 были установлены и начали работать во время отчетного периода 2006 года, возможно, с центрифугами TC-12¹².

Основные источники утечек

Для завода с центрифугами первичный источник утечки аэрозоля - это соединение и отсоединение цилиндров с UF₆. Утечки этого рода пропорциональны производительности завода, деленной на число цилиндров. Для всех трех заводов гексафторид урана поставляется в цилиндрах по 12.5 тонн, а отходы удаляются в цилиндрах такого же типа. Цилиндры разного типа применяются для обогащенного продукта, хотя продукт не образует доминирующего потока. Содержимое цилиндров превращается в газ для подпитки центрифуг путем нагрева цилиндра, а проработанный материал собирается для сублимации в охлаждаемые цилиндры (детали приводятся ниже). В Кейпенхурсте эти процессы протекают при давлении ниже атмосферного.

В добавление к операциям подпитки и удаления дальнейшие шаги по обращению с материалом также вызывают утечки. Перед подачей газа в центрифугу каждый цилиндр с UF₆ проходит через очищение, когда его содержимое полностью сублимируется и переносится в другой цилиндр, что позволяет сильно летучему содержимому (например, HF) выйти из процесса. Эта операция может стать добавочным источником утечек. Хотя UF₆ не используется на заводе в жидком виде, что делалось на некоторых старых заводах по обогащению, все цилиндры с продуктом помещаются в свободно стоящий автоклав, а их содержимое переводится в жидкий вид для однородности и контроля качества взятых образцов, как только завершится обогащение. Смешивание различных партий продукта также производится, чтобы удовлетворить требованиям покупателя. Эти операции после обогащения также дают утечки аэрозоля.

Наконец, каскады центрифуг могут способствовать утечкам аэрозоля, особенно через вакуумную систему каскада. Уровень утечек зависит от конструкций центрифуги и каскада. В общем случае, утечки пропорциональны количеству центрифуг и расходу от одной центрифуги.

Изменения, характерные для конкретного завода

Тип очистителя, применявшегося для перевода UF₆ в газовую фазу, влияет на природу утечек из областей подпитки и удаления. На более старых заводах E22 и A3 использовался пар для нагрева цилиндров с исходным материалом. Из-за влажной окружающей среды выбросы UF₆ из этих заводов подвергнутся немедленному гидролизу в аэрозоли UO₂F₂, которые затем захватываются в воздух с высокой влажностью. Завод E23 применяет электрический нагрев, так что утечки от него оказываются суше, а гидролиз протекает медленнее.

Для получения сухих утечек с завода E23 частицы эффективно отводятся от уходящих из завода газов, если поддерживать на заводе давление, слегка меньшее, чем атмосферное и пропускать циркулирующий воздух через фильтры HEPA (которые эффективно задерживают частицы). Такие фильтры по определению требуются, чтобы удалить, по крайней мере, 99.97 % аэрозолей с размером 0.3 мкм, а физические явления позволяют улучшить эффективность фильтров HEPA по мере того, становятся ли частицы меньше или больше¹³.

Облака пара, типичные для устаревших заводов E22 и A3, вызывают поток утечек, которые слишком влажны для фильтров HEPA. На заводе E22 применяются мокрые щетки Вентури. Они распыляют водяное облако, придавая капелькам большую скорость и направляя пылинки в большие сборные баки. Эффективность таких щеток быстро падает по мере уменьшения размеров частиц ниже 0.3 мкм¹⁴.

Из доклада Urenco следует, что на заводе A3 утечки отслеживаются, но не выметаются. Кроме того, в добавление к каждой операции каскада на любом заводе, расположенном на площадке в Кейпенхурсте, имеется несколько дополнительных вспомогательных установок, приводящих к утечкам UF₆. Завод E22 содержит также установку с вакуумным насосом для разборки и чистки, которая управляет насосами от всех трех заводов. Хотя значительная часть урана от этих насосов удаляется в процессе ожигения, кое-что утекает в атмосферу, несмотря на то, что на их пути находятся фильтры HEPA. Примерно 50% выбросов в атмосферу от всего завода E23 можно отнести на счет работы насоса, обслуживающего процессы разборки и очистки. Поскольку эта и дру-

гие вспомогательные установки заняты очисткой оборудования от всех трех заводов, они настроены не только на объем производства завода E23, а на производительность всего комплекса обогащения.

Детальное рассмотрение утечек на каждом заводе в Кейпенхурсте приведено в Табл. 3. Эти оценки демонстрируют большой разброс возможных утечек и влияние конкретного завода. Из Табл. 3 исключены минимальные утечки от специальных контейнеров вспомогательных установок, исследовательских установок и химических лабораторий. Эти утечки включены в полную информацию о площадке Кейпенхурст, приведенную в Табл. 2.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Начальный анализ возможности обнаружения аэрозоля UO_2F_2 образованного гексафторидом урана, утекающим из заводов по конверсии урана”, *Наука и всеобщая безопасность*, т.16 (2009); “IAEA Use of Wide Areas Environmental Sampling In the Detection of Undeclared Nuclear Activities,” Report of Member State Support Program, STR-321, 27 August 1999.
2. По оценкам, из здания K-1131 утекало 0.00024 грамма урана в виде утечек на каждый грамм урана в полученном гексафториде урана. Смотрите D.Albright and L.Barbour, “Source Terms for Uranium Enrichment Plants”, appendix to STR-321.
3. Письма управляющего заводом Метрополис в Комиссию по ядерному регулированию США получены автором по Закону о свободе информации.
4. <http://www.nrc.gov/info-finder/decommissioning/fuel-cycle/honeywell.html> (доступ с 2 февраля 2010 года).
5. “Ежеквартальные отчеты о соответствии установки Порт Хоуп требованиям окружающей среды” (2005-2006 годы). Перечень ежедневных изменений утечек на установке Порт Хоуп за 2002-2006 годы доступен в Обращении для продления лицензии (приложение 2).
6. Cameco Port Hope Fact Sheet (Справочник об установке Порт Хоуп компании Камеко).
7. Aveva, Отчеты о деятельности и влиянии на окружающую среду за 2005-2007 годы.
8. “Информация об ограниченном радиоактивном выбросе в ответ на обзор Агентства по окружающей среде для компании Уренко в Кейпенхурсте”, документ HSE/2006/0017, август 2006 года.
9. Центрифуги LEC – это подкритичные центрифуги с ротором из стекловолокна, покрытым алюминием. Как считается, рабочая скорость вращения равна примерно 475 м/с. Центрифуги 3LC были изготовлены в Кейпенхурсте с конца 1982 года до 1987 года. Конструкция, судя по сообщениям, основана на немецкой G3, у которой периферийная скорость находится в диапазоне 485-540 м/с (оценка автора).
10. Возможно, что завод работает с центрифугами TC-11 (полностью или частично), так как производство TC-11 началось через год после начала строительства завода. По состоянию на март 1987 года изготавливались только центрифуги TC-11.
11. Машина TC-11 – это первая центрифуга с ротором из углеродного волокна. Считают, что ее периферическая скорость равна около 600 м/с. Следующая модель, TC-12, как полагают, будет работать со скоростью около 620 м/с.
12. История завода приведена, например, в материале Кехоз “Обогащительная тройка: история Уренко до 2000 года” (Urenco, 2002).
13. Министерство энергетики США, “Характеристики фильтров HEPA, используемых подрядчиками МЭ”, стандарты МЭ: DOE-STD-3020-97 (1997).
14. M. Lerner, “Эффективность разделения аэрозолей щетками Вентури”, *Aerosol Science and Technology*, 28 (1998), 389-402.