

СВОЕВРЕМЕННАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ НА КРУПНОМАСШТАБНЫХ ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ С ГАЗОВЫМИ ЦЕНТРИФУГАМИ

Марк Е. Уолкер и Роберт Дж. Голдстон

АННОТАЦИЯ

В данной статье исследуются проблемы международных ядерных гарантий, относящихся к своевременному обнаружению производства высокообогащенного урана на крупномасштабных обогатительных заводах с газовыми центрифугами. Для того, чтобы установить, где могут быть укреплены существующие меры и подходы гарантий на обогатительном заводе с газовыми центрифугами, мы создали дискретную временную модель для имитации гипотетических сценариев неправильного использования, как для переходных этапов, так и для стационарного состояния. Однако, наряду с дистанционным мониторингом для улучшения своевременности обнаружения может быть использован комплект автоматических измерительных систем, дающий возможность начать последующую деятельность, потенциально в быстром временном масштабе. Данные мероприятия, для которых потребуются очень низкие уровни ложной тревоги, должны будут реализовываться в поэтапном подходе, в зависимости от характеристик каждого обогатительного предприятия и анализа вероятных путей приобретения для государства, в котором располагается предприятие. Некоторые из рассматриваемых технологий могут оказаться весьма полезными для операторов предприятия.

Марк Е. Уолкер работает по программе науки и всеобщей безопасности Принстонского университета, Принстон, Нью-Джерси, США.

Почтовый адрес для корреспонденций: Mark E. Walker, Program on Science and Global Security, 221 Nassau St., 2nd Floor, Princeton, NJ 08542, USA.

Адрес электронной почты: markew@princeton.edu

Роберт Дж. Голдстон работает в Департаменте астрофизических наук Принстонского университета, Принстон, Нью-Джерси, США.

Статья получена 11 октября 2016 года и принята к публикации 10 апреля 2017 года.

ВВЕДЕНИЕ

Деятельность по гарантиям Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) на обогатительных предприятиях с газовыми центрифугами (ОПГЦ) является ключевым компонентом верификационного режима Договора о нераспространении ядерного оружия (ДНЯО). При выполнении верификационного режима ДНЯО МАГАТЭ осуществляет деятельность по гарантиям в соответствии с полномочиями по Соглашениям по всеобъемлющим гарантиям (СВГ) с неядерными государствами (НГ). Соглашения СВГ намечают набор мероприятий для реализации гарантий по всем ядерным материалам в пределах границ, юрисдикции или контроля неядерных государств в соответствии с ДНЯО. На этом основании ядерный материал на предприятиях ОПГЦ в неядерных государствах подчиняется гарантиям МАГАТЭ¹. Кроме того, деятельность по гарантиям также проводится на гражданских ОПГЦ в государствах, обладающих ядерным оружием, по Добровольным соглашениям, заключенным между такими государствами и МАГАТЭ. Предприятия ОПГЦ могут быть незаконно использованы для производства необлученного материала непосредственного использования, в данном случае высокообогащенного урана (ВОУ), который может быть использован, после химической и металлургической обработки, в изготовлении ядерного оружия без дальнейшего изменения его изотопного состава. Следовательно, верификационная деятельность на крупномасштабных коммерческих ОПГЦ (в отличие от установок опытного или лабораторного масштаба) особен-

но важна, поскольку производительность этих предприятий значительно сокращает временные масштабы, на которых может произойти существенное незаконное использование. МАГАТЭ стремится к тому, чтобы обеспечить своевременное обнаружение следующих сценариев на предприятиях по обогащению урана²:

- отвод природного, обедненного или низко обогащенного гексафторида урана от заявленного маршрута на предприятии;
- неправильное использование предприятия для производства незаявленной продукции из незаявленного сырья;
- неправильное использование предприятия для производства гексафторида урана со степенью обогащения, большей объявленного максимума, в особенности высокообогащенного урана.

В данной статье рассматривается своевременное обнаружение по третьему сценарию, в котором крупномасштабные ОПГЦ незаконно используются для производства ВОУ. Кроме того, хотя анализ в данной статье непосредственно применяется к гарантиям МАГАТЭ, он может также оказаться важным для верификации будущего Договора о запрещении производства расщепляющегося материала, или других договоров, ограничивающих количество расщепляющихся материалов военного назначения. Если в государствах, обладающих ядерным оружием, запасы расщепляющихся материалов военного назначения уменьшатся, то станет все более важным верифицировать отсутствие любого производства расщепляющихся материалов в таких странах.

Из простого идеализированного расчета следует, что имеется очевидная потребность в своевременной верификации возможного незаконного использования крупномасштабных ОПГЦ. Производство одного существенного количества обогащенного до 90% ВОУ оружейного качества³, начиная с 8,9 т гексафторида природного урана (UF_6) потребует приблизительно 5 400 килограммов-единиц работы разделения (кг-ЕРР), или 5,4 т-ЕРР, в предположении 90% обогащения продукта и 0,30% обогащения отвалов (отметим, что масса в определении работы разделения представляет собой массу урана, а не массу UF_6). При начале с 0,87 т UF_6 , обогащенного до 5%, потребуются только 1,2 т-ЕРР с обогащением отвалов 0,71%. Одинокое коммерческое предприятие с производительностью 4 000 т-ЕРР/год, способное снабжать топливом примерно 30 ядерных реакторов с электрической мощностью 1 ГВт, могло бы, согласно этому идеализированному расчету, непрерывно производить 2,0 существенных количества обогащенного до 90% урана в сутки с сырьем из природного урана. Альтернативно, используя имеющиеся в распоряжении ресурсы обогащенного до 5% UF_6 , такое предприятие в идеальном случае могло бы производить 9,1 существенного количества ВОУ оружейного качества в сутки до истощения своих запасов сырьевого материала. Производство обогащенного до 5% урана за предыдущий месяц составило бы 69 т UF_6 , так что с использованием такого количества можно было бы произвести 80 существенных количеств за 8,8 суток. Аналогичное вычисление для завода с производительностью 500 т-ЕРР/год привело бы к результату 10 существенных количеств за 8,8 суток. Любой из этих сценариев представил бы очень серьезную проблему для своевременного обнаружения и сдерживания незаконного использования ядерной технологии для изготовления ядерных взрывных устройств – фундаментальной цели гарантий МАГАТЭ.

Однако, на основании оценки потенциала предприятия для незаконного использования на основании только идеализированной производительности, нельзя будет получить реалистичных результатов. Физическая компоновка конкретного ОПГЦ, так же, как и размер, количество и размещение производственных установок и каскадов, играют существенную роль в оценке практических сценариев незаконного использования. Важными факторами будут также время и усилия. Некоторые сценарии незаконного использования потребуют непрактично большого количества рабочей силы и весьма длительного времени для исполнения, и будут поэтому менее привлекательными. Также возникает вопрос, как много времени потребуется каскаду, или системе каскадов, для того, чтобы прийти к равновесию после конфигурации, или после изменения состава сырья. Для того, чтобы установить, где нужно усилить существующие измерения и подходы для существующих гарантий, мы рассмотрим базовую диаграмму трубопроводной сети для эталонного крупномасштабного обогатительного завода с газовыми центрифугами. Мы также создали простую дискретную временную модель для оценки поведения каскада в течение гипотетических сценариев неправильного использования, как для переходных этапов, так и для стационарного состояния.

Статья начинается с обсуждения примеров сценариев, и мы рассмотрим диаграмму трубопроводной сети для эталонного ОПГЦ для определения практического незаконного использования. Мы также оценим на основании дискретной временной модели время, которое потребуется для новой переконфигурирован-

ной системы с новым составом сырья для прихода в равновесие. В следующем разделе будут рассмотрены потенциальные сигнатуры этих сценариев незаконного использования. Затем будет намечен потенциальный набор не требующих обслуживания верификационных технологий. И, наконец, мы вкратце рассмотрим процесс своевременного отклика в контексте верификации ДНЯО МАГАТЭ.

ПРИМЕРЫ СЦЕНАРИЕВ

В этом разделе рассматривается, как сценарии незаконного использования могут быть реализованы на эталонном обогатительном заводе с газовыми центрифугами. Для наших примерных сценариев мы рассмотрим случаи, в которых предприятие ОПГЦ используется для производства больших количеств урана оружейного качества⁴ так быстро, как это возможно, без обнаружения⁵. Поскольку через подобные сценарии можно получить прямой доступ к пригодному для оружия материалу, они обращают особое внимание на проблему своевременности, более важную, чем для отвлечения природного, обедненного, или низко обогащенного урана, или избыточного производства низко обогащенного урана. Производство высокообогащенного урана также будет более важным в контексте будущего Договора о запрещении производства расщепляющегося материала (ДЗПРМ).

В статье 2013 года Смит, Лебрун и Лабелла ввели концепцию "эталонного" обогатительного завода с газовыми центрифугами с номинальной мощностью 4 000 т-ЕРР/год⁶. Эталонный завод состоит из восьми "установок", каждая из которых состоит из десяти каскадов. Схема одной из установок показана на рисунке 1. У каждого устройства имеется область соединения коллекторов, в которой коллекторы каскадов объединяются, образуя коллекторы устройства, так же, как и группу станций ввода и вывода UF₆.

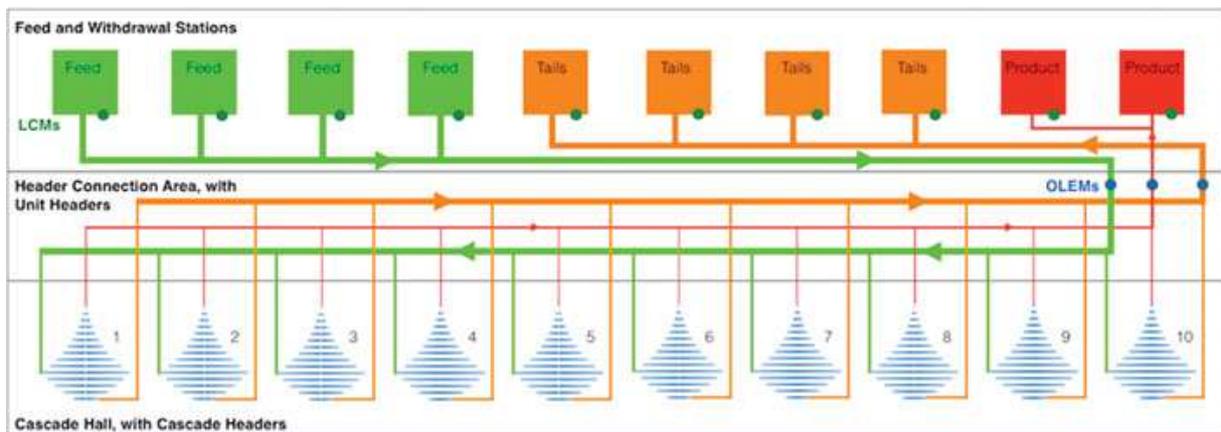


Рисунок 1. Упрощенная "диаграмма трубопроводной сети" для одиночной производственной установки эталонного обогатительного предприятия с газовыми центрифугами производительностью 500 т-ЕРР/год. Количество и расположение станций ввода и отвода произвольно. В верхней части рисунка показаны станции ввода (зеленые) и вывода (оранжевые – для отвалов и красные – для готовой продукции); там же показаны мониторы загрузки ячеек (LCM – темно-зеленые кружки). В средней части рисунка показана область соединения коллекторов, с коллекторами устройств; там же показаны сетевые мониторы обогащения (OLEM). В нижней части рисунка показана схема зала каскадов с коллекторами каскадов.

Каждое устройство имеет номинальную производительность обогащения в 500 т-ЕРР/год, в номинальная производительность каждого каскада равна 50 т-ЕРР/год. Чтобы округлить цифры, мы предположим, что номинальная производительность каждой центрифуги равна 50 кг-ЕРР/год, и поэтому каждый каскад состоит из 1000 центрифуг. Мы предположим, что эти центрифуги работают с усилением на каждой ступени, равным $\gamma = \alpha \cdot \beta = 1,2^2$, где $\alpha = R'/R$ и $\beta = R/R''$, и относительная изотопная распространенность определяется как:

$$R(N) = \frac{N}{1 - N} \quad (1)$$

в котором N – это атомная доля урана-235 по отношению к общей атомной распространенности урана в заданной точке каскада. По договоренности, R и N без отметок с одним штрихом (') или с двумя штрихами (") соответствуют материалу, подаваемому в заданную ступень. Отметка с одним штрихом после R или N обозначает восходящий поток из ступени, а отметка с двумя штрихами указывает на относительную распространенность и значения обогащения для нисходящего потока из ступени. Отметим, что все значения обогащения, приведенные в данной статье, представляют атомные (молярные) фракции, а не весовые.

Сценарий, в котором $\alpha = \beta = 1,2$ позволяет каскаду при идеальных эксплуатационных условиях обогащать материал от 0,72% урана-235 до 5,11% в одиннадцати ступенях. Если предположить, что со стороны отвалов установлено четыре ступени из таких же центрифуг, то будут производиться отвалы со степенью обогащения 0,29%. Для оценки времени установления равновесия в каскадах мы предположим, что в каждой центрифуге содержится 10 г урана, или примерно 14,8 г UF₆. Материалом в трубопроводах между центрифугами мы пренебрегаем, поскольку из предыдущих исследований можно сделать вывод, что количество такого материала невелико (менее, чем приблизительно 10%) по отношению к количеству материала в центрифугах⁷.

Существует несколько потенциальных подходов к незаконному использованию обогатительного завода для производства урана оружейного качества⁸. В наших примерных сценариях мы предполагаем, что оператор предпочитает поддерживать целостность индивидуальных каскадов (не перемещает центрифуг между каскадами) и перестраивает каскады в новую последовательно-параллельную конфигурацию. Для простоты и масштабируемости, а также для того, чтобы избежать длинных соединительных линий, мы предположим далее, что оператор поддерживает целостность индивидуальных устройств без перемещения каскадов между устройствами, и без новых соединений между устройствами. Обогащенный в некоторых устройствах UF₆ может перемещаться в другие устройства в баллонах.

Оператор, планирующий незаконно использовать обогатительное предприятие, может столкнуться с такой проблемой, что высшие каскады в связанном "каскаде каскадов", построенном из каскадов, спроектированных для обогащения до 5%, станут неправильно сформированы для своей работы. Оптимально эффективные каскады, спроектированные для высокой степени обогащения, имеют притупленную форму (т.е., имеют сравнительно больше центрифуг в высших ступенях) по сравнению с каскадами для меньшей степени обогащения. В таком сценарии оператор для повышения эффективности может соединять центрифуги внутри каскада для достижения оптимальной притупленной конфигурации. Однако, это повлечет за собой значительный объем физической работы в зале центрифуг, что потребует затрат труда, времени, материалов и поставок, а также существенную предварительную подготовку, что приведет к риску преждевременного обнаружения. Более быстрой, и, возможно, труднее обнаружимой альтернативой, может стать "удаление" центрифуг из каскадов, что включает в себя выведение центрифуг из эксплуатации для формирования идеальной формы за счет уменьшения доступной работы разделения. Это также может потребовать значительных работ, в зависимости от эксплуатационных характеристик каскадов. Потребуется вывести из эксплуатации примерно двух тысяч центрифуг из десяти тысяч, предположительно входящих в состав устройства. Следует понимать, что дистанционно управляемые клапаны и (или) иным способом перестраиваемые каскады могут упростить такие сценарии.

Однако, более быстрый и простой способ может состоять в том, чтобы оставить каскады в их первоначальной конфигурации, и загружать их номинальным потоком массы, но при более высоком обогащении. Это несколько уменьшит производительность разделения в каскадах по отношению к их номинальной производительности (в идеальном состоянии) из-за перемешивания потоков с различным обогащением, но, что несколько неожиданно, увеличит выигрыш по обогащению. Легко показать, что сохранение общего количества атомов урана и атомов урана-235 в одиночной центрифуге или ступени каскада потребует:

$$\theta = \frac{(1 + \alpha R)(\beta - 1)}{(1 + R)(\gamma - 1)} \quad (2)$$

где θ – "мольная доля", или доля атомов исходного материала, попадающего в готовый продукт, и R – отношение атомов урана-235 и урана-238 в исходном материале центрифуги или ступени. Для $\alpha = \beta$ уравнение (2) сводится к хорошо известной формуле для идеальной мольной доли:

$$\theta = \frac{1 + \alpha R}{(\alpha + 1)(1 + R)} \quad (3)$$

Уравнение (3), между прочим, показывает, что идеальная мольная доля растет вместе с R , что объясняет притупленную форму при более высоком обогащении. С другой стороны, для эксплуатации с неидеальной мольной долей, определенной из оптимизации для меньшего обогащения, уравнение (2) указывает необходимое соотношение между α и β . Мы предполагаем, что коэффициент разделения для ступени $\gamma = \alpha \cdot \beta = R/R''$ является приблизительно независимым от θ и R (или может быть сделан таким), если игнорировать любые другие неидеальные эффекты, которые могут быть связаны с эксплуатацией при более высоком обогащении. Поскольку как α , так и β немного превышают единицу, член $(\beta - 1)$ будет доминирующе определять изменение правой части уравнения (2), так что β будет меньше α , когда θ будет меньше идеального значения. Это произойдет, когда каскад, спроектированный для меньшего уровня обогащения, получит исходный материал с более высоким обогащением (хорошо известно¹⁰, и просто увидеть физически, что когда достигается предел $\theta = 0$, β будет стремиться к единице, и α будет стремиться к $\alpha \cdot \beta$). При большем α и меньшем β каскад будет производить больше высокообогащенной продукции. Это позволяет перейти от низко обогащенного урана, пригодного для использования в энергетических реакторах к материалу, обогащенному выше 90%, только с двумя группами не модифицированных каскадов, как показано в таблице 1, вместо трех групп, обычно предполагаемых для идеальных каскадов¹¹. Этот двухэтапный неидеальный подход может обеспечить достижение 90%-го обогащения с 11 обогатительными ступенями (как и предполагалось здесь), способными достичь обогащения продукции только в 4,6% и $\alpha = \beta = 1,19$. При $\alpha = \beta = 1,2$, как в данном случае, минимальное обогащение исходного материала из низко обогащенного урана, необходимое для достижения 90% обогащения продукции, равно 3,7%.

Таблица 1. Наборы каскадов в сценарии внезапного отвлечения.

	Обогащение сырья	Обогащение продукции	Обогащение отвалов	т·ЕРР/год
Исходный	0,72%	5,11%	0,29%	50
Средняя группа	5,11%	34,0%	2,29%	49,5
Верхний	34,0%	94,1%	28,1%	28,4

Отношение потоков подачи и продукции во всех этих каскадах равно 11,2. Соответственно, одиночное устройство из десяти каскадов может быть переконфигурировано в девять каскадов средней группы, непосредственно питающих одиночный верхний каскад, оставляя некоторый запас производительности в верхнем каскаде. Для реализации такого сценария, показанного на рисунке 2, будет необходимо провести только две модификации в области соединения коллекторов:

- Входной коллектор устройства должен быть отсоединен от входного коллектора каскада №10, но в остальном должен остаться неизменным, и соединенным со всеми другими входными коллекторами каскадов и со всеми другими станциями ввода.
- Коллектор продукции устройства надо будет разорвать между каскадами №9 и №10, и соединить с входным коллектором каскада №10.

Неизменный коллектор продукции каскада №10 должен быть подсоединен к оставшемуся свободным коллектору продукции устройства и далее к станции извлечения продукции. Замечательно, что больше не потребуются никаких изменений.

Возникает вопрос, что должен будет делать оператор с отвалами из каскадов средней группы и верхнего каскада. Для того, чтобы отвалы выходили из такого каскада с тем же уровнем обогащения, что и в питании нижнего каскада, потребуются десять ступеней (вместо установленных четырех). Мы предполагаем, что оператор, стремящийся выполнить внезапное извлечение ВОУ оружейного качества, должен будет решить, что добавление таких ступеней потребует слишком много времени, так что вместо этого он будет собирать отвалы из верхних каскадов и сохранять их для переработки. Самым быстрым подходом, требу-

ющим минимальной модификации системы, будет просто оставить существующие коллекторы отвалов каскадов такими, как они есть, продолжать питать коллектор отвалов устройства, сам по себе не измененный, и собирать вместе отвалы из каскадов средней группы и верхнего каскада. Этот процесс отчасти неэффективен, поскольку в нем смешиваются потоки с различным обогащением. Однако, такой процесс быстр, оптимально прост и производит низко обогащенный уран лишь с несколько меньшим обогащением, чем материал, подаваемый в устройство. Этот материал поэтому может быть использован в дополнение к питанию средней группы, которое более подробно будет рассмотрено далее в данном разделе.

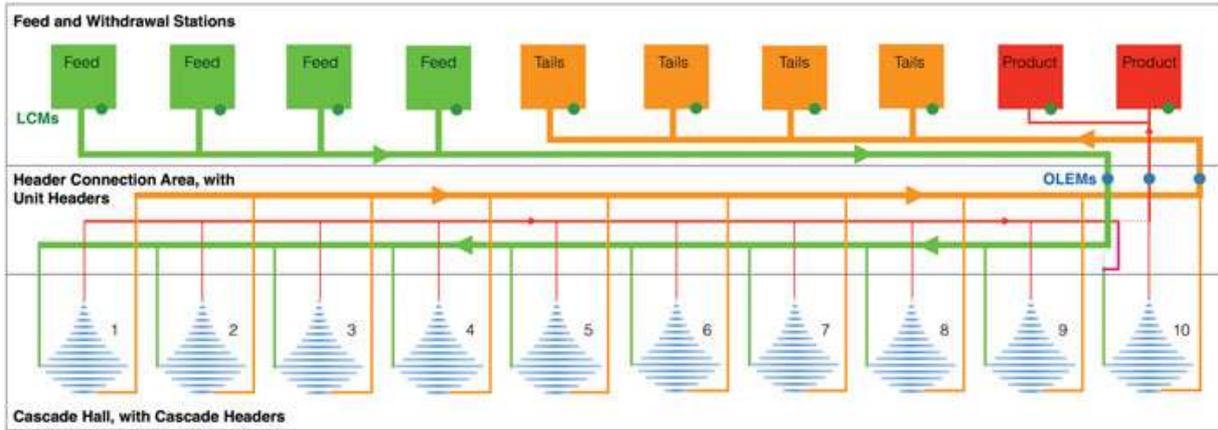


Рисунок 2. Упрощенная “диаграмма трубопроводной сети” для одиночной производственной установки эталонного обогатительного предприятия с газовыми центрифугами производительностью 500 т-ЕРР/год, модифицированная для производства ВОУ над каскадом №10.

После того, как каскады будут переконфигурированы, следующим шагом будет приведение их в равновесное состояние на их новой эксплуатационной точке. На рисунке 3 показаны результаты расчетов временной эволюции уровней подачи материала, отвода продукции и отвалов обогащения (если в данном случае не производится переработка отвалов). Для проведения этих вычислений мы разработали явную модель с пошаговым временным изменением. В модели рассчитываются как потоки, так и запасы материалов в каскаде, включая форму каскада и мольные доли, остановки центрифуг и эксплуатационные параметры. В данном случае в модели предполагается, что полный молярный поток через каждую центрифугу постоянен, но степень обогащения меняется со временем. Это устраняет необходимость в новом гидродинамическом моделировании, поскольку существенное изменение потоков массы отсутствует. Таким образом, все просуммированные по изотопам потоки в центрифугах и каскадах сохраняются. Устанавливая молярные расходы на каждом временном шаге, модель рассчитывает количество материала (в молях) и уровень обогащения на каждой ступени во время каждого временного шага.

В течение каждого временного шага сначала рассчитывается поток материала, вытекающего из каждой ступени. Количество материала (в молях), которое остается в каждой ступени в течение временного шага, m_{ret} , задается выражением:

$$m_{ret} = m_{s,t} - (L_{s,t}' + L_{s,t}'') \Delta t \quad (4)$$

где $L_{s,t}'$ и $L_{s,t}''$ – молярные скорости потока материала, перемещающегося на ступень выше и ступень ниже, соответственно, в течение временного шага, $m_{s,t}$ – количество материала, задерживающегося в ступени, и Δt – длительность временного шага. Мы предполагаем идеальные скорости потока в ступенях для первоначального каскада обогащения, не ограничиваемые неравномерностью отдельных центрифуг.

После этого может быть рассчитано обогащение материала, оставшегося в ступени:

$$N_{ret} = \frac{N_{s,t} m_{s,t} - (L_{s,t}' N_{s,t}' + L_{s,t}'' N_{s,t}'') \Delta t}{m_{ret}} \quad (5)$$

где $N_{s,t}$ – среднее молярное обогащение материала в ступени (в отличие от подаваемого материала) в начале временного шага, в предположении мгновенного и полного перемешивания, и $N_{s,t}'$ и $N_{s,t}''$ – обогащения материала, перемещающегося на ступень выше и ступень ниже, соответственно, в течение временного шага, такие, что

$$N_{s,t}' = \frac{\sqrt{\gamma} R_{s,t}}{1 + \sqrt{\gamma} R_{s,t}} \quad (6)$$

и

$$N_{s,t}'' = \frac{R_{s,t}}{\sqrt{\gamma} + R_{s,t}} \quad (7)$$

где

$$R_{s,t} = \frac{N_{s,t}}{1 - N_{s,t}} \quad (8)$$

$R_{s,t}$ представляет собой среднее молярное отношение урана-235 к урану-238 внутри ступени для данной ступени s во время t . Отметим, что мы предполагаем, что γ постоянно, поскольку мы не позволяем никаких изменений в полных молярных потоках и мы игнорируем любые изменения высшего порядка, ассоциируемые с уровнем обогащения.

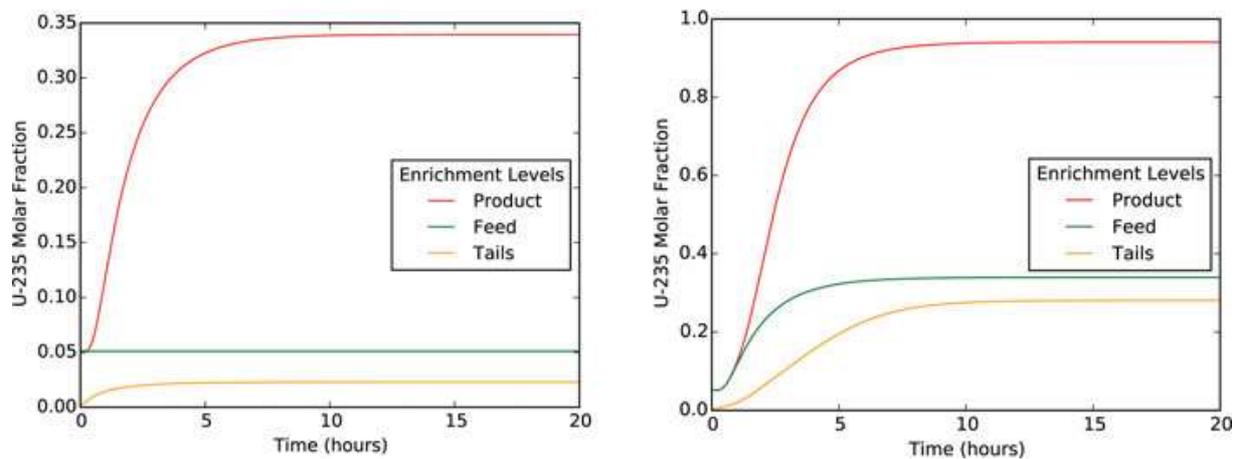


Рисунок 3. Зависимость от времени (в часах, по горизонтали) молярных концентраций урана-235 (по вертикали) в продукции (красная линия), в подаваемом материале (зеленая линия) и в отвалах (желтая линия) в каскадах средней группы (слева) и верхнем каскаде (справа).

Рассчитывается масса и обогащение материала в каждой ступени в конце временного шага, включая также приток материала,

$$m_{s,t+\Delta t} = \left(L_{s-1,t}' + L_{s+1,t}'' + F_{ext} \right) \Delta t + m_{ret} \quad (9)$$

$$N_{s,t+\Delta t} = \frac{\left(L_{s-1,t}' N_{s-1,t}' + L_{s+1,t}'' N_{s+1,t}'' + F_{ext} N_{ext} \right) \Delta t + N_{ret} m_{ret}}{m_{s,t+\Delta t}} \quad (10)$$

где нижние индексы $s-1$ и $s+1$ обозначают ступени, соответственно находящиеся непосредственно ниже и выше ступени s , F_{ext} – поток массы подаваемого материала на ступени подачи (равно нулю для всех остальных ступеней) и N_{ext} – обогащение подаваемого материала.

В ситуации, в которой форма каскада острее, чем идеальная, для обогащения, при котором он работает (например, в текущем случае, когда обогащение больше проектной величины), из заданной ступени в расположенные выше нее ступени посылается меньший поток обогащенного материала по сравнению с идеальным случаем, потому что молярная доля будет слишком мала, а в расположенные ниже ступени

будет посылаться большой поток обедненного материала. В результате обогащение материала в центрифугах будет расти со временем по отношению к обогащению их подаваемого материала. Когда равновесие будет достигнуто, значения α и β , рассчитанные из обогащения подаваемого материала, продукции и отвалов каждой ступени, будут находиться в прекрасном согласии с уравнением (2) – даже хотя α и β в отношении среднего по материалу внутри центрифуг остаются, согласно построению, на уровне 1,2.

При предполагаемом запасе UF_6 на центрифугу равновесие достигается довольно быстро. Как показано на рисунке 3, обогащение продукции в верхнем каскаде достигает 90% через приблизительно 6 часов, и приходит в равновесие при обогащении в 94% за 12 часов. Эксплуатационные параметры, типичные для оригинальных каскадов, каскадов средней группы, и верхнего каскада, приведены в таблице 2. для этих расчетов был использован временной шаг в 8 секунд.

Таблица 2. Эксплуатационные параметры для эталонного каскада производительностью 50 т-ЕРР/год, производящего низко обогащенный уран.

Ступень	Начальное обогащение ступени	Мольная доля ступени, θ_s	Поток через ступень, L_s (г UF_6 /с)	Масса материала в ступени, m_s (г UF_6)
-4	0,35%	0,4549	5,89	615,73
-3	0,42%	0,4549	10,80	1129,48
-2	0,50%	0,4550	14,90	1558,46
-1	0,60%	0,4551	18,33	1917,01
0	0,72%	0,4552	21,20	2217,12
1	0,86%	0,4553	17,14	1792,89
2	1,03%	0,4555	13,76	1439,11
3	1,24%	0,4557	10,94	1144,04
4	1,48%	0,4559	8,58	897,85
5	1,77%	0,4562	6,62	692,36
6	2,12%	0,4565	4,98	520,72
7	2,53%	0,4568	3,61	377,23
8	3,02%	0,4573	2,46	257,10
9	3,61%	0,4578	1,49	156,33
10	4,30%	0,4585	0,68	71,57

Важно отметить, что в этих оценках учитываются только потери в производительности разделения из-за смешивания потоков с различными степенями обогащения. Данные расчеты не учитывают эффекты высших порядков, которые могут стать значительными при более высоких обогащениях, и поэтому приведенные в данной статье значения объема производства следует считать приблизительными, но пригодными для иллюстрации временных масштабов, на которых может происходить незаконное использование предприятий ОПГЦ.

Теперь наметим два предельных сценария незаконного использования. В первом сценарии существующие запасы низко обогащенного урана (материала с 5% обогащением) загружаются во все устройства предприятия, модифицированные рассмотренным выше простым способом, до тех пор, пока эти запасы не закончатся. Во втором сценарии некоторые устройства останутся неизменными и будут продолжать производить низко обогащенный уран для загрузки в два модифицированных устройства. Оба сценария обладают преимуществом переработки отвалов в модифицированных устройствах. В то время, как первый сценарий позволяет быстрее производить материал оружейного качества в расчете на единицу производительности предприятия, поскольку работа разделения прилагается только к обогащению низко обогащенного урана до урана оружейного качества (и не к обогащению природного урана до низко обогащенного урана), производство сможет продолжаться лишь до тех пор, пока не закончатся запасы низко обогащенного урана. С другой стороны, второй сценарий позволяет непрерывно производить материал оружейного качества, но с меньшей скоростью, поскольку предприятие фактически обогащает природный уран до оружейного качества, а не низко обогащенный уран до урана оружейного качества. Следует отметить, что для обеих сценариев незаконного использования верхний каскад будет несколько недогружаться материалом, поскольку отношение загрузки к продукции для каждого каскада равно 11,2, в то время как верхний каскад будет загружаться всего лишь девятью каскадами. Поэтому верхний каскад будет производить ВОУ на $9/11,2 = 80,4\%$ от своей производительности. Поток продукции для идеального каскада с производительностью 50 т-ЕРР/год, обогащающего природный уран до материала с 5,11% обогащением,

составляет примерно 77 молей за сутки. Работая на 80% от своей производительности, верхний каскад будет производить примерно 62 моля в сутки, что примерно эквивалентно 0,5 существенного количества за сутки при 90% обогащении. Однако, число молей в существенном количестве ВОУ обратно пропорционально степени обогащения, поскольку существенное количество определяется как 25 кг урана-235 в неопределенном количестве ВОУ. Таким образом, при степени обогащения продукции выше 90% темпы производства в терминах существенных количеств будут немного больше, и наоборот при обогащении меньше 90%. Кроме того, хорошо известно, что эксплуатация противоточной центрифуги со скоростью загрузки, меньшей оптимального уровня, увеличивает усиление машины¹². Поэтому объемы производства в существенных количествах и степень обогащения продукции могут быть несколько больше, чем указано в данной статье, что несколько компенсирует не учитываемые эффекты высших порядков.

Для сценария с самым быстрым производством полностью переконфигурированное предприятие с номинальной мощностью 4000 т-ЕРР/год с имеющимся запасом изготовленного за один месяц урана, обогащенного до 5,11%, теоретически сможет примерно за 3 дня (включая время прихода в равновесие, но исключая время на изменение конфигурации) изготовить примерно 11 существенных количеств материала оружейного качества (на основании представленной здесь модели). Отвалы от этого процесса, включая те, которые были собраны во время перехода к равновесию на первом цикле, могут быть повторно переработаны в двух последующих циклах, что теоретически позволяет изготовить примерно 29 существенных количеств материала оружейного качества примерно за одну неделю. Как количества, которые могут быть произведены, так и длительность производства, линейно зависят от величины накопленных запасов, что делает их весьма важным фактором. Однако, максимальная скорость производства всего предприятия теоретически остается равной 4,4 существенных количества за сутки. Устройство с производительностью 500 т-ЕРР/год, рассматриваемое как независимое предприятие, начинающее работу с запасов низко обогащенного урана, изготовленного только на том же самом устройстве за один месяц, теоретически может произвести 3,6 существенных количества за 7,3 суток.

В сценарии со стационарным незаконным использованием, два устройства на эталонном предприятии с 8 устройствами могут быть переконфигурированы так, как было описано ранее, с отвалами от модифицированных устройств, перерабатываемыми в свою собственную загрузку вместе с продукцией от 6 неизмененных устройств. При этом обогащение загрузки в среднюю группу естественно уменьшится, так же, как и обогащение материала, произведенного на верхних каскадах. Поскольку обогащение комбинированных отвалов каскадов средней группы и верхних каскадов лишь немного обеднено по сравнению с загрузкой средней группы, и поскольку первоначальный сценарий обладает некоторым запасом выше 90% обогащения, все еще будет возможно производить материал оружейного качества при повторной переработке материала отвалов (точный результат составляет обогащение в 89,1%, но при этом не учитывается сокращенная подача в верхние каскады и соответствующее возрастание их усиления). В этом случае номинальное производство в 31 существенное количество в месяц (т.е., приблизительно 1 существенное количество за сутки) будет поддерживаться на постоянном уровне до тех пор, пока на предприятие будет поставляться природный UF₆.

Темпы производства в двух данных сценариях примерно в 2 раза меньше, чем в высшей степени идеализированных расчетах, представленных во введении (где не рассматривались ни практические варианты изменения конфигурации, ни времена достижения равновесия), как по полному продукту из заданного сохраненного количества низко обогащенного урана, так и по скорости производства. Тем не менее, эти более реалистичные результаты все еще представляют значительную проблему для своевременной верификации, учитывая минимальные усилия по изменению конфигурации.

Важно осознавать, что данные расчеты представляют собой предельные случаи. Потенциальный нарушитель, например, может решить модифицировать не все из 8 устройств, и произвести то же самое количество ВОУ из низко обогащенного урана, сохраненного за более длительный период. Альтернативно, в любом сценарии нарушитель может решить не перерабатывать отвалы из модифицированных устройств. Возможны также смешанные сценарии, в которых нарушитель захочет произвести максимальное количество материала в течение заданного периода, скажем, одного месяца, начав перерабатывать накопленный низко обогащенный в модифицированных устройствах, но и производить в течение этого времени дополнительный низко обогащенный уран. Очевидно, что существует баланс между объемом усилий по модификации (и связанным с ними риском обнаружения), и скоростью производства материала до обнаружения.

ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ СИГНАТУРЫ

Перед обсуждением полезности мероприятий по гарантиям безопасности в обнаружении незаконного использования крупных предприятий ОПГЦ в следующем разделе, важно рассмотреть сигнатуры, которые могут быть обнаружены в течение сценария незаконного использования, указывающие на необычную эксплуатацию предприятия.

Очевидно, что в обоих сценариях незаконного использования уровни обогащения в коллекторах устройства для загрузки, продукции и отвалов будут выше, чем при обычной эксплуатации. В модифицированном устройстве низко обогащенный уран будет присутствовать в коллекторах устройства для загрузки и для отвалов, а высоко обогащенный уран будет присутствовать в коллекторе устройства для продукции. На площадках обработки должны будут присутствовать баллоны для загрузки и отвалов (например, типа 30В или 48У), содержащие низко обогащенный уран, так же, как и баллоны, содержащие ВОУ. Мы рассчитали, что нарушитель сможет загрузить стандартные баллоны для низко обогащенного урана высокообогащенным ураном (при требуемом 8% уровне от стандартной производительности, поскольку они будут наполняться одиночным каскадом, работающим при потоке 9/11,2) в ячейках извлечения без превышения пределов по критичности¹³. Следы ВОУ, которые могут быть обнаружены при взятии образцов окружающей среды, будут материализоваться на площадках обработки. Присутствие низко обогащенного урана в загружаемом материале и высокообогащенного материала в станциях извлечения приведет к более высоким уровням нейтронной радиации на единицу массы UF_6 на этих площадках из-за более высоких уровней урана-234 в материале процесса, поскольку альфа-частицы, излучаемые ураном-234, будут вызывать реакции (α, n) на фторе, содержащемся в UF_6 ¹⁴. Изменение этого нейтронного излучения во времени не сможет быть замаскировано работой с меньшими массами общего UF_6 . Будет необходимо также изменить конфигурацию трубопроводов в области соединения коллекторов, или в зале каскадов (что рассматривалось выше). Это может быть реализовано либо с помощью установки трубопроводов между входными отверстиями, уже имеющимися в области переработки, либо посредством создания новых отверстий или пунктов соединения. Если в последнем варианте будут создаваться отверстия в существующих трубопроводах, в которых ранее находился UF_6 , то вероятно, что произойдет выброс некоторого количества UF_6 и продуктов его гидролиза, фторида уранила (UO_2F_2) и фтористого водорода (HF). Могут быть также установлены пункты отвода, более близкие к центрифугам, чем области подачи и извлечения, возможно, в области соединения коллекторов, или в залах каскадов. В зависимости от местоположения новой деятельности, визуальные подтверждения измененной конфигурации трубопроводов могут либо существовать, либо не существовать.

Потоки через коллектор будут аномальными: поток в коллекторе продукции устройства за пределами области соединения коллекторов будет значительно сокращен до 8% от нормального. Поток в коллекторе подачи устройства будет на 10% меньше нормального (поскольку коллектор будет питать только 9 каскадов из 10). Через коллектор отвалов устройства будет проходить поток, несколько меньший обычного, поскольку хотя он и будет получать отвалы из 10 каскадов, выход отвалов из верхнего каскада будет показывать, что загрузка каскада несколько понижена. Скорости заполнения камер извлечения, и скорости опустошения камер загрузки также будут отражать эти потоки, в особенности, если существуют необъявленные пункты загрузки и отвода.

В обращении с баллонами с UF_6 внутри завода также возникнут несоответствия. Переработка отвалов будет включать перемещение контейнеров из камер извлечения в камеры загрузки, чего не должно быть при нормальной эксплуатации обогатительного завода. В сценарии быстрого производства используются запасы низко обогащенного урана, что может потребовать перемещения полных баллонов из хранилища в область переработки, что также будет признаком аномальной деятельности. Сигнатурой сценария непрерывной эксплуатации будет частое перемещение полных баллонов с UF_6 между устройствами. Эти баллоны могут быть полными баллонами продукта, хотя камеры загрузки могут быть спроектированы только для приема больших баллонов с исходным материалом или отвалами, что потребует перекачки UF_6 из контейнеров продукта в баллоны большего размера, возможно, с применением оборудования для разбавления продукта, при необходимости измененного. Независимо от типа баллонов, низко обогащенный уран в этих баллонах не будет доступен для верификации, поскольку он будет загружен в модифицированное устройство.

Кроме того, если баллоны с продуктом используются для питания модифицированного каскада вместо баллонов с исходным материалом или отвалами, то частота смены баллонов в камерах подачи будет выше, чем обычно. Данные оператора о погрузке в камерах подачи, если они будут доступны инспекторам,

будут отражать это обстоятельство.

И, наконец, в операциях завода на высоком уровне также возникнут несоответствия. В течение сценария тайного незаконного использования нарушитель может физически скрыть баллоны с UF₆ (для продукта, исходного материала и отвалов) с необычной степенью обогащения. Если инспекторы гарантий полагают, что во время незаконного использования завод работал, то тогда отсутствие материала в баллонах для продукта и отвалов, соответствующих заявленному производству завода, послужит основанием для дальнейшего расследования. В непрерывном сценарии производство и поставки низко обогащенного урана с необходимостью прекратятся или значительно сократятся, поскольку продукцию низко обогащенного урана из не модифицированных устройств надо будет использовать для загрузки в модифицированные устройства. Напротив, в сценарии быстрого производства не модифицированные устройства все еще смогут производить продукцию низко обогащенного урана, которую предприятие сможет отправлять, хотя и в меньших объемах, которые не будут согласовываться с нормальной эксплуатацией. Тем не менее, до начала сценария быстрого производства оператор может обогащать низко обогащенный уран до уровней (например, до 5%), больших по сравнению с тем, которые могли бы производиться в сценарии обычной эксплуатации, в которых может производиться материал с более широким диапазоном обогащения. Если в любом из этих сценариев записи баланса материала будут сфальсифицированы для имитации нормальной эксплуатации предприятия, то появятся явные расхождения между этими числами и наблюдаемым материалом.

НАБОР ВЕРИФИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Задача всеобъемлющих соглашений по гарантиям МАГАТЭ определяется как "своевременное обнаружение отвлечения существенных количеств ядерных материалов от мирной ядерной деятельности к производству ядерного оружия, или других ядерных взрывных устройств, или для неизвестных целей, и сдерживания таких отвлечений риском раннего обнаружения"¹⁵. В данном разделе мы наметим в общих чертах набор потенциальных не требующих непосредственного присутствия верификационных технологий, которые могли бы быть реализованы для своевременного обнаружения сигнатур, перечисленных в предыдущем разделе, и, следовательно, обеспечивающих сдерживание определенных ранее примерных сценариев, или сценариев, относящихся к ним. Реализацию подмножества таких систем можно было бы поэтапно осуществить, в зависимости от производительности и технологии конкретного обогатительного завода, результатов анализа путей приобретения для государства (который рассматривает наличие или отсутствие более широких выводов, предоставляющих повышенную уверенность в отсутствии необъявленных ядерных материалов и деятельности в государстве), и степени международного управления и обязательства, если таковые имеются. Такие системы могут улучшить не только эффективность, но и оперативность гарантий, поскольку визиты инспекторов смогут в большей степени управляться и направляться результатами не требующих непосредственного присутствия измерений, и в меньшей степени календарем, что, возможно, приведет к сокращению давления на эксплуатацию. Для операторов важно, что можно будет без задержки предоставить баллоны с продукцией для личной инспекции. Эти системы дополняют существующую верификационную структуру МАГАТЭ, которая включает периодическую инспекцию промежуточных запасов, ежегодную верификацию физических запасов, мероприятия по сдерживанию и наблюдению, и дополнительный доступ в государствах дополнительного протокола. Подход к гарантиям на предприятиях ОПГЦ, разработанный в рамках проекта шестистороннего применения гарантий также содержит в себе инспекции ограниченной частоты с необъявленным доступом (ОЧНД) в залы каскадов, во время которых инспекторы могут подтвердить, что трубопроводы и конфигурации каскадов согласуются с проектной информацией и заявленными уровнями обогащения, либо посредством визуальной инспекции, либо с использованием приборов¹⁶. В частности, действия инспекций ОЧНД являются исключительно мощными методами обнаружения присутствия (и подтверждения отсутствия) незаконной деятельности на предприятиях ОПГЦ, поскольку они могут быть проведены с предупреждением за весьма короткое время, и во время этих инспекций инспекторы смогут получить доступ на производственные площадки, которые в ином случае будут находиться вне пределов осуществления другой верификационной деятельности. Оператор ОПГЦ и МАГАТЭ обычно согласовывают среднее число инспекций ОЧНД, которые будут проводиться в каждом году. Некоторые из этих действий ОЧНД будут проводиться одновременно с обычными визитами инспекторов, в то время как другие будут планироваться по случайному графику, полностью отделенному от обычных инспекций. Здесь мы дополнительно предлагаем, чтобы данные от нескольких систем, не требующих непосредственного присутствия, указавшие на необычные условия на предприятии

ОПГЦ, могли стать побуждением для инспекции ОЧНД производственных площадок, посредством которых инспекторы МАГАТЭ могли бы верифицировать реальное состояние операций на предприятии.

Смит, Лебрун и Лабелла предложили три технологии для гарантий, не требующих непосредственного присутствия, на своем большом "эталонном" обогатительном заводе: сетевые мониторы обогащения (OLEM), мониторы загрузки камер (LCM) и станции верификации баллонов, не требующих непосредственного присутствия (UCVS)¹⁷. Здесь мы вкратце рассмотрим эти технологии и их отношение к нашим выбранным сценариям.

Сетевые системы мониторинга обогащения

Сетевые системы мониторинга обогащения¹⁸ устанавливаются (без излишнего вмешательства) на коллекторах устройств, как это показано на рисунке 1. Они могут быть закреплены к коллекторам продукта, загрузки и отвалов каждого устройства, так что на эталонном предприятии ОПГЦ, обсуждаемом в выбранных сценариях, может быть установлено до 24 таких систем. Такие системы, основанные на регистрации фотонного излучения, с соответствующей калибровкой для устранения влияния осадка в трубопроводах, могут определить плотность урана-235 в газе, протекающем через коллектор устройства, с точностью до нескольких процентов. Используя измерения температуры с внешней стороны трубопровода коллектора и датчики давления в кожухе индикатора вмешательства МАГАТЭ, можно будет определить плотность газа UF₆, что позволит провести точную оценку уровня обогащения газа в трубопроводе коллектора устройства. Данная технология была квалифицирована для применения и в настоящее время она разворачивается¹⁹. Системы OLEM могут также предоставить побочную выгоду операторам ОПГЦ, поскольку измерения обогащения на таких устройствах могут быть использованы для управления процессом²⁰.

Мониторинг загрузки камер

Мониторинг загрузки камер представляет собой измерения зависимости от времени массы баллонов с UF₆ во всех станциях загрузки и извлечения, присоединенных к каждому из коллекторов устройства, как это показано на рисунке 1. Это измерение будет проводиться оператором предприятия и для МАГАТЭ было бы важно независимо проверить аутентичность этих измерений. Измерения мониторинга загрузки камер в комбинации с измерениями на сетевых системах мониторинга обогащения позволили бы закрывать баланс общей массы и баланс массы урана-235 в каждом устройстве, в режиме, близком к реальному времени. Требования к технологии, позволяющей надежное совместное с МАГАТЭ использование информации с мониторов загрузки камер, сейчас разрабатываются²¹. Данные о загрузке камер могут рассматриваться операторами как коммерческая тайна, и поэтому установление протоколов для получения этой информации и обращения с ней может оказаться сложным.

Станции верификации баллонов, не требующих непосредственного присутствия

Станции верификации баллонов, не требующих непосредственного присутствия будут измерять полную массу урана в баллонах для исходного материала, поступающих на предприятие ОПГЦ, так же как и массу урана в баллонах для продукта и отвалов, готовых к отправке с предприятия ОПГЦ. Измерения массы на станциях верификации баллонов могут быть использованы для независимой и дистанционной верификации данных учета материалов, передаваемых оператором в МАГАТЭ. Кроме того, эти станции могут измерять массу содержащегося в баллонах урана-235 по скорости счета одиночных и двойных нейтронных событий от встречающегося в природе урана-234, который обогащается вместе с ураном-235. Станции верификации баллонов будут обеспечивать уверенность в том, что весь материал, прошедший через коллекторы устройства, и, возможно, даже перемешанный в баллонах для конечной продукции, был послан с завода ожидаемому получателю. Технологии, которые могут быть использованы для станций верификации баллонов, не требующих непосредственного присутствия, находятся на стадиях разработки и квалификации²².

ОБСУЖДЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ВЕРИФИКАЦИИ, НЕ ТРЕБУЮЩИХ НЕПОСРЕДСТВЕННОГО ПРИСУТСТВИЯ

Смит, Лебрун и Лабелла утверждают, что совместное применение систем OLEM, LCM, и UCVS может

обеспечить значительно улучшенную эффективность гарантий за счет мониторинга как полного баланса массы, так и баланса массы урана-235 в почти реальном времени, и с большой точностью гарантировать, что деятельность на предприятии ОПГЦ согласуется с его заявленным мирным использованием²³. Эти технологии, не требующие непосредственного присутствия, могут также предоставить улучшенную эффективность, наиболее явно проявляющуюся в том, что эффективная система станций верификации баллонов, комбинированная с эффективными мероприятиями по сдерживанию и наблюдению, может позволить разрешать отправку баллонов с продукцией с предприятия ОПГЦ без физического присутствия инспекторов. Такая система может поэтому также предоставить преимущество нераспространения, сократив нормальные запасы обогащенного UF₆, и, в соединении с соответствующими сдерживанием и наблюдением, предоставлять МАГАТЭ лучшее знание этих запасов.

В принципе, этот комплект технологий сможет обнаружить намеченные здесь сценарии, если оператор позволит пропускать материалы загрузки, продукта и отвалов через станции верификации баллонов, не требующие непосредственного присутствия, в модифицированном устройстве, или не будет вмешиваться в работу мониторов загрузки камер (которые должны будут записывать скорости загрузки и извлечения для этого устройства, отличающиеся от нормальных значений). Однако, оператор может попытаться избежать обнаружения. Сценарий уклонения может включать блокирование и обход станций верификации баллонов перед тем, как произойдет незаконное использование, так, чтобы эти станции могли "видеть" только обогащения, отражающие нормальные условия эксплуатации на предприятии. Кроме того, оператор сможет подделать данные загрузки камер (подлинность которых не может быть установлена МАГАТЭ) так, чтобы они отражали нормальные условия эксплуатации, либо непосредственно фальсифицируя данные, либо используя дополнительные навески для изменения результатов измерений загрузки и извлечения из соответствующих баллонов. Недостаток баллонов для продукции низко обогащенного урана, наполняемых через одну, или несколько станций верификации баллонов может указывать на аномальную деятельность, но поскольку эти баллоны не обязательно должны незамедлительно транспортироваться после заполнения с производственной площадки на площадку хранения, то свидетельство о незаконном использовании предприятия со станции верификации баллонов сможет стать существенным только после того, как будет произведено много существенных количеств ВОО. Например, при нормальных условиях заполненные продукцией баллоны могут подвергаться гомогенизации в автоклавах на производственной площадке, после чего им потребуется несколько суток для остывания²⁴. Следовательно, обнаружение данного сценария зависит от мониторов загрузки камер, которые не находятся под полным контролем МАГАТЭ, и не представляют собой полностью независимых источников измерений.

Однако, обсуждавшиеся выше перехваты и изменения данных с камер загрузки и блокировка станций верификации баллонов могут быть сделаны неэффективными посредством установки мониторов потока на станциях загрузки и извлечения, и на пунктах установки станций верификации баллонов.

Коллекторы устройства и мониторы потоков загрузки и извлечения

Мы предполагаем, что должна быть разработана не требующая присутствия технология измерения потока массы UF₆ в местах расположения систем верификации баллонов и станций загрузки и извлечения. Диапазон возможностей простирается от не интрузивных, но довольно сложных, таких, как использование импульсного источника тепловых нейтронов для инициирования деления и обнаружения задержанного прохода продуктов деления ниже по направлению потока, до интрузивных, но простых, таких, как установка прибора для измерения разности давлений в ограничителе внутри трубопровода коллектора²⁵. Можно представить себе несколько технологий, располагающихся между этими двумя экстремальными случаями, возможно, основанными на распространении звуковой волны вверх и вниз по направлению потока в газе UF₆. Комбинация станций верификации баллонов и надежных измерений потока в коллекторе устройства и станциях загрузки и извлечения, опечатанных МАГАТЭ, может представлять мощный инструмент верификации. Подобно данным с мониторов загрузки камер, информация с таких мониторов потока может вызывать опасения в отношении конфиденциальности, и надо будет обратить внимание на поддержание конфиденциальности данных, измеряемых такими устройствами. Для того, чтобы уменьшить опасения в отношении конфиденциальности и безопасности, устройства для измерения потоков должны быть спроектированы таким образом, чтобы передавать в штаб-квартиру МАГАТЭ только двоичные сигналы типа "оборудование исправно/неисправно" и "соответствует/не соответствует".

Однако, в сценариях незаконного использования, рассматриваемых в данной статье, все мероприятия по гарантиям, не требующие присутствия, могут быть обойдены (в особенности, если передаются только

двоичные сигналы), если оператор передаст в МАГАТЭ ложную информацию о том, что одно устройство, или более, было отключено для обслуживания, поскольку вывод из эксплуатации части предприятия может правдоподобно объяснить одновременные отрицательные двоичные сигналы с оборудования систем верификации баллонов и мониторов загрузки камер. Если это будет происходить при нормальной эксплуатации с достаточной частотой, например, во время запуска предприятия ОПГЦ, или регулярно для профилактического обслуживания, то МАГАТЭ будет обременительно отслеживать каждый такой случай, возможно направляя инспекции ограниченной частоты с необъявленным доступом (ОЧНД) в соответствующий зал каскадов только для того, чтобы подтвердить, что не произошло никакого изменения конфигурации. Поэтому для МАГАТЭ было бы очень желательно получить способы для быстрого обнаружения изменения конфигурации трубопроводов, не требующие присутствия, для того, чтобы свести к минимуму запросы на отнимающие много времени инспекции, дорогостоящие как для МАГАТЭ, так и для оператора. Здесь мы представим потенциальный набор инструментов для выбора МАГАТЭ в зависимости от характеристик обогатительного завода.

Обнаружение изменения конфигурации, не требующие присутствия

На основании опросного листа проектной информации предприятия и верификации проектной информации МАГАТЭ должно быть осведомлено о наличии всех проходов, оборудованных в залах каскадов и на внешних производственных площадках, где UF_6 протекает по трубопроводам в коллекторы устройств, и из них. МАГАТЭ должно быть способным идентифицировать комбинацию (или комбинации) этих проходов, которые должны быть использованы для перестройки каскадов в вызывающие опасения параллельно-последовательные конфигурации. На критических проходах будет возможно установить печати с дистанционным указанием проникновения, а оператор может согласиться информировать МАГАТЭ перед доступом к этим портам. Если будет обнаружен необычно частый доступ к этим критическим проходам, то этот факт может послужить дополнительным фактором для принятия МАГАТЭ решения о требовании инспекции на площадке.

Изменение конфигурации каскадов может быть проведено с помощью установки новых проходов. Это действие неминуемо приведет к взаимодействию некоторого количества гексафторида урана UF_6 с водяным паром, приводящего к образованию фторида уранила (UO_2F_2) в виде твердых частиц и фтористого водорода (HF) в газообразной форме. В начальном изменении конфигурации, когда МАГАТЭ сможет дистанционно выявить эту деятельность для предоставления своевременного обнаружения и сдерживания, фторид уранила еще не будет обогащен до проектных характеристик завода, так что (по крайней мере для указанной цели) обнаружение HF в виде газа будет так же важно, как обнаружение UO_2F_2 . Это стало неожиданным, поскольку HF легче и быстрее обнаружить, и его не так легко удержать, как локально осажденные частицы фторида уранила. Выброс HF также может произойти при попытке установить петлю обвода потока вокруг монитора потока и системы верификации баллонов для подделки легитимных показаний, пропуская обрабатываемый материал мимо мониторов. Коммерческие системы обнаружения газа с открытым прохождением на базе лазеров, безопасных для глаз, могут просматривать участки размером более 100 метров²⁶. Потребуется провести некоторые исследования для оптимизации системы и для определения пределов, до которых оператор может избежать образования HF, но, благодаря продуманному расположению и конструкции, может оказаться возможным обнаружить проникновение в соответствующий трубопровод с высокой степенью уверенности, не страдая от ложных тревог из-за обычных операций, таких, как замена баллонов. Измерения необычных выбросов HF могут потенциально быть использованы для помощи в мотивации деятельности инспекторов на площадке, возможно включающей допуск на производственные площадки.

Если будет изменяться конфигурация трубопроводов в каскаде, то, вообще говоря, эта деятельность будет заметной, если только требуемая конфигурация не будет достигаться при помощи дистанционно управляемых вентилях без видимой индикации. Камеры надо будет располагать стратегическим образом, или использовать сканирование для того, чтобы просматривать соответствующие коллекторы каскадов и трубы, ведущие к коллекторам устройства и от них, не раскрывая в то же время конфиденциальную информацию. Для обнаружения изменений в конфигурации и присутствии персонала, и индикации таких изменений и присутствия персонала, не передавая изображений системы трубопроводов, надо будет применять специальное программное обеспечение. Фактически это будет похоже на мероприятия, используемые сейчас инспекторами при доступе в зал каскадов, где визуальная инспекция сравнивается с фотоальбомами верифицированной конфигурации, хранящимися на предприятии за печатью МАГАТЭ. И сно-

ва, будет важно подтвердить исключительно низкую частоту ложных тревог вместе с высокой надежностью обнаружения. В более слабых, но и более простых альтернативах (или дополнениях) можно будет вместо камер использовать детекторы перемещений, или для помощи камерам в пространстве в непосредственной близости от трубопроводов, требующемся для доступа к трубопроводам, но не получения изображения самих трубопроводов.

Мониторинг баллонов с UF₆

Хотя низкая плотность материала в центрифугах и трубопроводах каскада делает проблематичным измерение нейтронов даже от каскадов центрифуг²⁷, баллоны, содержащие килограммовые количества высокообогащенного UF₆, образуют нейтроны с гораздо большими скоростями, так же как и гамма-лучи с характеристическими спектрами. В сценарии незаконного использования не требующие присутствия детекторы нейтронов и гамма-лучей, расположенные на станциях загрузки и извлечения, смогут эффективно обнаруживать присутствие низко обогащенного урана на станциях загрузки и извлечения отвалов, и ВОУ на станциях извлечения продукции. В таком случае нарушитель может решить полностью отказаться от использования установленных камер загрузки и извлечения для обслуживания модифицированных частей предприятия, вместо этого загружая и извлекая уран, применяя пункты ввода и вывода на площадке присоединения коллекторов, или внутри зала каскада. Эти незаявленные пункты загрузки и извлечения также могут быть обнаружены с помощью не требующих присутствия измерений нейтронов и гамма-лучей. Портальные мониторы нейтронов и гамма-лучей, не требующие присутствия, могут быть установлены в дочках доступа на площадку соединения коллекторов и в залы каскадов. В более гипотетическом сценарии можно будет запрограммировать роботы, на которых будут установлены детекторы нейтронов и гамма-лучей, для перемещения в соответствующие области обогатительных заводов. Альтернативно, мониторы могут быть установлены на салазках, перемещающимися над площадками, на которых могут быть размещены нелегальные баллоны. Если подвижный монитор либо обнаружит аномальные радиационные сигнатуры, либо ему будет запрещен вход в обычно доступную область, то он может подать сигнал о такой ситуации. Такая ситуация может послужить стимулирующим фактором для МАГАТЭ (вероятно, наряду с другими обнаруженными сигнатурами), чтобы потребовать проведения инспекции на месте. Если такая инспекция будет принадлежать к типу инспекций ограниченной частоты с необъявленным доступом (ОЧНД), то инспекторы смогут использовать приборы для регистрации излучений для верификации отсутствия спрятанных баллонов для загрузки или извлечения.

Своевременная передача данных

Операторы чувствительно относятся к содержанию и скорости передачи данных со своих предприятий, как из-за того, чтобы предотвратить распространение засекреченных технологий, так и для защиты своих коммерческих интересов. Поэтому будет необходимо ограничивать передачу данных, и, вероятно, даже накопление данных в обсуждаемых здесь системах. Хотя потребуется провести дополнительный анализ, сейчас представляется, что может оказаться достаточной передача простых сообщений размером в два бита с частотой, может быть, один раз в шесть часов, в которых указывается состояние прибора и результат измерений в виде "номинальная эксплуатация" или "требуется верификация инспекторами". Так же, как и выбор технологий из предлагаемого набора, частота передачи данных может изменяться, в данном случае в зависимости от потенциальной скорости производства материала оружейного качества.

СВОЕВРЕМЕННЫЙ ОТКЛИК МАГАТЭ

МАГАТЭ имеет в своем распоряжении два мощных средства для своевременного обнаружения и отклика. Первым из них является способность проводить инспекцию на месте ограниченной частоты с необъявленным доступом (ОЧНД) на предприятиях, находящихся под гарантиями в рамках проекта шестистороннего применения гарантий. Это разрешает инспекторам МАГАТЭ доступ в залы каскадов на обогатительных заводах с краткосрочным оповещением (вплоть до двух часов до инспекции). Хотя инспекции ОЧНД обычно проводятся либо в соединении с рутинными инспекциями, либо на случайном основании, если МАГАТЭ обнаружит ненормальную деятельность по нескольким независимым сигналам, то проведение отдельной инспекции ОЧНД может быть оправдано. Поскольку маловероятно, что в ближайшем будущем будет построено много крупных предприятий ОПГЦ, и поскольку те предприятия, которые строятся,

будут находиться в странах, в которых имеются другие предприятия под гарантиями МАГАТЭ, или в соседних с ними странах, назначенные инспекторы могут размещаться так, чтобы они смогли немедленно появиться на предприятии. МАГАТЭ при решении о выборе направления требования инспекции ограниченной частоты с необъявленным доступом (ОЧНД) или продолжения запросов и обсуждения должно будет рассматривать производительность и технологию конкретного обогатительного завода, результаты анализа путей приобретения, наличие более широкого заключения в государстве пребывания и степень (если таковая имеется) международного управления и участия. Очевидно и крайне важно, что для доверия к МАГАТЭ и для эффективной работы обогатительных заводов эти запросы инспекций ограниченной частоты с необъявленным доступом (ОЧНД) были исключительно редкими.

Если во время работы инспекции на месте было обнаружено свидетельство существенного незаконного использования, или был запрещен доступ инспектора, то департамент гарантий попытается разрешить ситуацию на технической основе на соответствующем уровне управления применимого государственного или регионального управления, ответственного за исполнение гарантий, информируя генерального директора МАГАТЭ. При необходимости генеральный директор может вступить в контакт с министром иностранных дел соответствующего государства и потребовать немедленного разрешения вопроса. В качестве завершающего действия, генеральный директор может созвать совещание для консультаций с Советом управляющих МАГАТЭ с предупреждением за очень короткий срок, даже в течение нескольких часов, таким образом делая ситуацию известной всем. Возможность такого развития событий должна служить мощным сдерживанием.

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Крупномасштабные обогатительные заводы с газовыми центрифугами представляют значительные проблемы для своевременного обнаружения и сдерживания производства урана оружейного качества. Этапы изменения конфигурации, установления равновесия производства первого существенного количества урана оружейного качества будут протекать медленнее, чем можно было бы предположить из идеального расчета производительности по единицам работы разделения. Однако, изменение конфигурации, возможно, будет произведено за часы, или за несколько дней, а последующая скорость производства может быть большой. К счастью, подключаемые к сети мониторы обогащения уже развертываются, и уже начата разработка других технологий. Учитывая текущие условия поставок, расширение больших предприятий ОПГЦ вероятно замедлится, так что станет возможной реализация развертывания этих более эффективных гарантий, что также позволит более эффективно эксплуатировать заводы.

Тем не менее, мы рекомендуем рассмотреть некоторые дополнительные технологии, чтобы предоставить МАГАТЭ достаточный выбор для своевременного принятия решений, основанного на множественных путях сигналов. Весьма желательными могут быть измерения потока на приборах, опечатанных МАГАТЭ, как дополнение сетевых систем мониторинга обогащения и мониторов загрузки камер. Для предоставления информации о новых не заявленных проходах могут оказаться полезными печати на ключевых заявленных проходах с дистанционной индикацией и обнаружение фтористого водорода. Простыми, но эффективными средствами могут быть камеры с программным обеспечением для обнаружения изменений, или простые детекторы перемещений. Можно рассмотреть детекторы нейтронов и фотонов на станциях загрузки и извлечения и на ключевых порталах, и даже передвижные детекторы, для своевременного обнаружения недозволенных станций загрузки и извлечения. Эти технологии могут добавить дополнительную глубину для набора методов, которые может выбрать МАГАТЭ, в зависимости от производительности и технологии конкретного обогатительного завода, результатов анализа путей приобретения, наличия более широкого заключения в государстве пребывания и степени (если таковая имеется) международного управления и участия.

Мы находим, что МАГАТЭ обладает мощными средствами сдерживания в форме инспекций ограниченной частоты с необъявленным доступом по кратковременному оповещению, и, в крайних случаях, возможности созвать совещания Совета управляющих МАГАТЭ по кратковременному оповещению.

И, наконец, в то время как представленный здесь анализ направлен на предприятия ОПГЦ, специфически подчиненные положениям Договора о нераспространении, верифицируемого МАГАТЭ, будущий Договор о прекращении производства расщепляющихся материалов, или договор, требующий низких (или нулевых) уровней расщепляющихся материалов и ядерного оружия, потребует аналогичных гарантий для всех предприятий ОПГЦ, включая находящиеся в странах, обладающих ядерным оружием, так что рассмотренные здесь технологии и процедуры следует понимать как универсально применимые.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Деятельность по гарантиям в соответствии с ДНЯО на предприятиях ОПГЦ в странах-участницах Европейского сообщества по атомной энергии (Евратом) совместно осуществляется МАГАТЭ и Евратомом согласно соглашению по гарантиям между МАГАТЭ и Евратомом (INFCIRC/193).
2. W. Bush et al., "Model Safeguards Approach for Gas Centrifuge Enrichment Plants," Paper presented at the 2006 IAEA Symposium on International Safeguards, Vienna, Austria, 16-20 October, 2006.
3. МАГАТЭ рассматривает 25 кг урана-235 в составе ВОУ как существенное количество, "для которого возможность изготовления ядерного взрывного устройства не может быть исключена." Смотрите *IAEA Safeguards Glossary: 2001 Edition*, International Nuclear Verification Series No. 3, 23, Vienna: International Atomic Energy Agency, 2001, https://www.iaea.org/sites/default/files/iaea_safeguards_glossary.pdf
4. Мы рассматриваем уран оружейного качества как уран, обогащенный по урану-235 до 90%, или более (по доле изотопа). Однако, весь высокообогащенный уран (определяемый как уран, обогащенный ураном-235 до более, чем 20%), может рассматриваться как уран, пригодный для изготовления оружия. Смотрите 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," Revision 1, 2001, <http://fissilematerials.org/library/doe01.pdf>.
5. IAEA Safeguards Glossary, 21. (ссылка 3)
6. L. Eric Smith, Alain R. Lebrun, Rocco Labella, "Potential Roles for Unattended Safeguards Instrumentation at Centrifuge Enrichment Plants," *Journal of Nuclear Materials Management*, 42, no. 1 (2013): 38-58.
7. Patrick Migliorini, "Modeling and Simulation of Gas Centrifuge Cascades for Enhancing the Efficiency of IAEA Safeguards," Ph.D. Dissertation, University of Virginia, 2013, and James Ely et al., "On-Line Enrichment monitor (OLEM): Supporting Safeguards at Enrichment Facilities," 20 14 Safeguards Symposium, International Atomic Energy Agency (2014). Принимая во внимание характеристики трубопроводов каскада и размеры и эксплуатационные параметры центрифуг, указанные в ссылке Migliorini 2013, вместе с рабочим давлением в трубопроводах каскада, приведенным в ссылке in Ely 2014, становится ясным, что отношение массы материала в трубопроводах к массе материала в центрифугах довольно мало.
8. Alexander Glaser, "Characteristics of the Gas Centrifuge for Uranium Enrichment and Their Relevance for Nuclear Weapons Proliferation," *Science and Global Security*, 16, (2008): 1-25.
9. Karl Cohen, *The Theory of Isotope Separation as Applied to the Large-Scale Production of U-235* (New York: McGraw-Hill, 1951), 6.
10. V. Brigoli, "Cascade Theory," Ch. 2 in Stelio Villani, ed., *Uranium Enrichment* (Berlin: Springer-Verlag, 1979), 21.
11. Для фиксированного $R^{product}/R^{feed} = 5,93$ в каждом наборе каскадов для достижения обогащения в 90% потребуется четыре набора каскадов: от 0,72% до 4,1%, от 4,1% до 20,3%, от 20,3% до 60,3% и от 60,3% до 90%. Для достижения 90% обогащения в трех ступенях потребуется $R^{product}/R^{feed} = 10,75$, что пригодно для производства урана, обогащенного до 7,2%, из природного урана.
12. P. Migliorini, "Modeling and Simulation of Gas Centrifuge Cascades," 40 (ссылка 7).
13. Безопасная по критичности толщина бесконечной плиты из урана, обогащенного до 90% по урану-235, равна 3,8 см, что примерно на порядок величины меньше внутреннего радиуса баллона для продукции 30В в 36,83 см. Поэтому осажденный на внутренних стенках баллона слой обогащенного до 90% UF_6 также будет критически безопасным. Это соответствует примерно 190 кг UF_6 , что составляет примерно 8% от максимальной массы заполнения баллона 30В ураном со степенью обогащения 5%, равной 2277 кг. Скорость заполнения баллона для продукции для представленных в данной статье сценариев неправильного использования будет составлять примерно 8% от скорости при нормальной эксплуатации. "Nuclear Material Safeguards For Uranium Enrichment Plants: Part 3 - Uranium Enrichment Plant Description and Material Control and Accountability Procedures," ISPO-347/R8 Part 3, Oak Ridge National Laboratory, 2007, 5.62.
14. Mark M. Pickrell et al., "Detection of Illicit HEU (uranium-235) in a Fuel Cycle Enrichment Plant," Paper presented at the 47th Annual Meeting of the Institute of Nuclear Materials Management, Nashville, TN, 16-20 July 2006.
15. International Atomic Energy Agency, "The Structure and Content of Agreements Between the Agency and States Required in Connection with the Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons," INFCIRC/153 (Corrected), 1972, paragraph 28.

16. Joerg H. Menzel, "Safeguards Approach for Gas Centrifuge Type Enrichment Plants," *Journal of Nuclear Materials Management*, 12, no. 4 (1983): 30-37.
17. L.E. Smith et al., "Potential Roles for Unattended Safeguards Instrumentation at Centrifuge Enrichment Plants." (ссылка 6)
18. L. Eric Smith et al., "Modeling and Analysis Methods for an On-Line Enrichment Monitor," *Journal of Nuclear Materials Management*, 44, no. 3 (2016): 27-44.
19. James Ely et al., "Enrichment Measurement with the On-Line Enrichment Monitor (OLEM)," Paper presented at the 57th Annual Meeting of the Institute of Nuclear Materials Management, Atlanta, GA, 24-28 July 2016.
20. Roy J.G. Veldhof et al., "Overview of Conducted Field Trials at URENCO," Paper presented at 2014 IAEA Symposium on International Safeguards, Vienna, Austria, 20-24 October 2014.
21. J.M. Whitaker, M. Laughter, and J. Howell, "Using Process Load Cell Information for the IAEA Safeguards at Enrichment Plants," IAEA-CN-184/116, Paper presented at the 2010 IAEA Symposium on International Safeguards, Vienna, Austria, 1-5 November 2010.
22. L.E. Smith et al., "Field Trial of an Unattended Verification Station for UF6 Cylinders," Paper presented at the 57th Annual Meeting of the Institute of Nuclear Materials Management, Atlanta, GA, 24-28 July 2016.
23. L.E. Smith et al., "Potential Roles for Unattended Safeguards Instrumentation at Centrifuge Enrichment Plants." (ссылка 6)
24. J. Michael Whitaker, "Uranium Enrichment Plant Characteristics-A Training Manual for the IAEA," ORNL/TM-2005/43, Oak Ridge National Laboratory, 2005. <http://fissilematerials.org/library/ornl05a.pdf>.
25. Jill N. Cooley et al., "Model Safeguards Approach and Innovative Techniques Implemented by the IAEA at Gas Centrifuge Enrichment Plants," Paper presented at the 48th Annual Meeting of the Institute of Nuclear Materials Management, Tuscon, AZ, 8-12 July 2007.
26. Смотрите, например, "Hydrogen Fluoride Gas Laser Detection," Senscient, http://www.senscient.com/hydrogen_fluoride_detection.html.
27. M.M. Pickrell et al., "Detection of Illicit HEU (uranium-235) in a Fuel Cycle Enrichment Plant." (ссылка 14)