

ТЕХНОЛОГИЯ ПОДДЕРЖКИ РЕЖИМА ОХРАНЫ ЯДЕРНЫХ БОЕПРИПАСОВ И МАТЕРИАЛОВ В ТЕЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕМОНТАЖА И УТИЛИЗАЦИИ

Кайл Дж. Банч, Марк Джоунс, Прадип Рамухалли, Джейкоб Бенц и Лаура Шмидт Денлингер

Технологии верификации, основанные на электромагнитных и акустических эффектах, потенциально могут сыграть важную роль в выполнении сложных требований будущих режимов верификации. Например, исследователи из Тихоокеанской северо-западной национальной лаборатории продемонстрировали, что низкочастотные электромагнитные сигнатуры запечатанных металлических контейнеров могут быть использованы для быстрого подтверждения наличия специфических компонентов на основании «да или нет» без раскрытия засекреченной информации. Исследователи из Тихоокеанской северо-западной национальной лаборатории также применили ультразвуковые измерения для получения изображений микроструктуры материалов, которые могут быть использованы в качестве шаблонов или уникальных идентификаторов изделий, учитываемых по договору. Такие альтернативные технологии пригодны для применения на различных этапах демонтажа боеприпасов и нередко они уменьшают или даже исключают сбор засекреченных данных из-за физических ограничений метода. В таких случаях необходимость в информационном барьере для предотвращения доступа к засекреченным данным может быть потенциально исключена, что упростит сценарии верификации. В результате эти технологические методы могут дополнить традиционные методы верификации контроля над вооружениями, основанные на радиации.

Данная статья представляет обзор нескольких альтернативных технологий верификации, которые пригодны для поддержки будущего широкого и более интрузивного режима контроля над вооружениями, который охватывает жизненный цикл демонтажа ядерного оружия. Обсуждаются общие возможности и ограничения каждого способа верификации и представляются примеры технологий. Эти технологии имеют отношение к всему потенциальному режиму мониторинга боеголовок, от входа в режим охраны (то есть установления уверенности к аутентичности и целостности боеголовок) до демонтажа и окончательной утилизации материала (то есть поддержания уверенности в том, что режим охраны не был нарушен).

Кайл Дж. Банч работает в отделении технологий верификации и прозрачности бюро контроля над вооружениями, верификации и соблюдения Государственного департамента Соединенных Штатов, Вашингтон, округ Колумбия, США.

Марк Джоунс, Прадип Рамухалли, Джейкоб Бенц и Лаура Шмидт Денлингер работают в Тихоокеанской северо-западной национальной лаборатории, Ричленд, штат Вашингтон, США.

Мнения, выраженные в данной статье, принадлежат только авторам, и не обязательно отражают мнения или политику Государственного департамента США или Правительства США.

Почтовый адрес для корреспонденций: Kyle Bunch, United States Department of State, Bureau of Arms Control, Verification and Compliance, Office of Verification and Transparency Technologies, Room 2250, 2201 C St. NW, Washington, DC 20520.

Адрес электронной почты: Kyle-Bunch@outlook.com

Статья получена 21 августа 2013 года и принята к публикации 2 января 2014 года.

ВВЕДЕНИЕ

Фундаментальной проблемой для реализации режима демонтажа ядерных боеголовок является возможность обнаружения несанкционированного отвлечения материала во течение процесса демонтажа и утилизации посредством строгого выполнения режима охраны. Верификация заявленного, или отсутствия, ядерных материалов и компонентов оружия в течение жизненного цикла демонтажа и утилизации является критичной. Как с дипломатической, так и с технической точки зрения, верификация в таких будущих режимах контроля над

вооружениями потребует новых решений. Поскольку любая приемлемая технология верификации должна будет защищать секретную конструкторскую информацию и атрибуты для предотвращения раскрытия засекреченной или иной чувствительной для распространения информации, не ядерные и не чувствительные методы могут предоставить существенно новые инструменты верификации, которые не потребуют применения дополнительных информационных барьеров.

Статья VI Договора о нераспространении ядерного оружия (ДНЯО) обязывает Соединенные Штаты и другие ядерные державы «в духе доброй воли вести переговоры об эффективных мерах по прекращению гонки ядерных вооружений в ближайшем будущем и ядерному разоружению, а также о договоре о всеобщем и полном разоружении под строгим и эффективным международным контролем»¹. Данная статья лежит в основе обязательства США, повторенном Президентом Бараком Обамой в его речи в Праге в апреле 2009 года, «добиваться мира и безопасности в мире без ядерного оружия»². Если пять ядерных держав, вошедших в Договор ДНЯО, намерены выполнять свои обязательства по Статье VI Договора ДНЯО посредством соглашений о контроле над вооружениями, то им потребуется разработать, согласовать и реализовать их с эффективной верифицируемостью, которая выходит за пределы всего, что было до сих пор принято между Соединенными Штатами и Россией (или любым другим государством).

Продолжающаяся успешная реализация Договора СНВ-III нередко рассматривается как примечательное достижение администрации Обамы в области безопасности и отношений между США и Россией. Дальнейшие сокращения ядерных арсеналов США и России могут также потребовать приглашения и включения остальных трех ядерных держав, идентифицированных в Договоре о нераспространении ядерного оружия (ДНЯО), а именно, Великобритании, Франции и Китая (входящих вместе с Соединенными Штатами и Россией в так называемую группу Р-5), а так и других ядерных держав, не признанных в Договоре ДНЯО. Прогресс группы Р-5 необходим для выполнения обязательств, принятых через Статью VI Договора ДНЯО. Потребности будущей верификации могут включать мониторинг прекращения производства новых делящихся материалов для оружия, мониторинг хранения компонентов боеголовок и делящихся материалов, и верификацию демонтажа боеголовок, центральных металлических узлов, вторичных ступеней и других материалов.

Текущие обязательства США и России по сокращению стратегических вооружений, воплощенные в Договоре СНВ-III, ограничивают учитываемые развернутые стратегические ядерные боеголовки количеством в 1550 для каждой стороны; суммарным пределом в 800 развернутых и не развернутых пусковых установок межконтинентальных баллистических ракет (МБР), баллистических ракет на подводной лодке (БПРЛ) и тяжелых бомбардировщиков, оборудованных для доставки ядерного оружия; и отдельный предел в 700 развернутых МБР, БПРЛ и тяжелых бомбардировщиков, оборудованных для ядерного оружия³. Цифры 1550 представляют 74-процентное сокращение по сравнению с учитываемым пределом в 6000 боеголовок для каждой стороны в первоначальном договоре СНВ. Договор СНВ-III не относится к нестратегическим и неразвернутым ядерным боеприпасам и к производству и утилизации делящихся материалов для оружия. Поэтому режим верификации Договора разработан так, чтобы позволить двум участвующим сторонам убедиться в том, что количество развернутых стратегических ядерных боеголовок и систем доставки каждой стороны не превышает согласованных пределов.

Поскольку Соединенные Штаты и Россия продолжают продвигаться к более низким цифрам в двустороннем контексте, и другие страны группы Р-5 (Великобритания, Франция и Китай) начинают изучать свое участие в будущем многостороннем режиме сокращения ядерных вооружений, методы верификации могут стать существенно более сложными и интрузивными. Системы верификации, использующие такие методы, должны будут продолжать предоставлять достаточную уверенность инспектирующим сторонам, защищая в то же время от непреднамеренного раскрытия засекреченной информации. Такие системы, которые могут использовать дополнительные технологии верификации, не собирающие засекреченную или другую чувствительную для распространения информацию, будут особенно привлекательными. Разработка эффективных сценариев и технологий верификации становится в особенности сложной, потому что обычно принимающая сторона контролирует как верифицируемое изделие, обычно называемое изделием, учитываемым по договору, так же как и измерительное оборудование, используемое для верификации. Оправдание таких сценариев связано как с интересом принимающей стороны в защите своей собственной засекреченной информации о конструкции ядерного оружия, так и с требованием Договора ДНЯО против дальнейшего распространения ядерного оружия через раскрытие подобной информации.

Есть много международных соглашений, направленных на связанную с производством материалов часть жизненного цикла, для предотвращения распространения в государствах, не обладающих ядерным оружием, и надежная история американо-российских двусторонних соглашений, которые были направлены на часть жиз-

ненного цикла, относящуюся к развернутому арсеналу ядерного оружия этих двух государств. По мере уменьшения количества ядерных боеприпасов по текущим и будущим двусторонним и многосторонним соглашениям будет возрастать потребность в верификации и прозрачности в течение процесса сокращения. Вероятно, это будет включать и потребность в верификации демонтажа ядерных боеприпасов и конверсии и утилизации их демонтированных компонентов.

Будущим режимам мониторинга боеголовок потребуется удовлетворять некоторым базовым требованиям для предоставления достаточного доказательства партнерам по договору или любому верификационному органу того, что обязательства были выполнены, и не произошло никакого обмана. Первым требованием является необходимость в механизме для ввода изделия, учитываемого в договоре, в режим верификации. Изделия, учитываемые в договоре, могут включать боеголовки, бомбы, компоненты, взрывчатые вещества, и специальные ядерные материалы, но не ограничиваться ими. Процесс ввода изделий, учитываемых в договоре, в режим верификации называется инициализацией. Он может требовать от государства любое, от сообщения до приложения печати или метки и уникального идентификатора до сложной последовательности радиационных и не радиационных измерений.

После инициализации в режим декларированное изделие должно быть подтверждено как фактически являющееся изделием, учитываемым по договору (например, ядерным боеприпасом). Процесс подтверждения боеприпаса является активным направлением исследований, в котором продолжается изучение границы между верификацией и защитой секретных данных⁴⁻⁷. Эти первые два этапа создают уверенность в целостности и аутентичности изделия. Критический элемент данного этапа состоит в получении уверенности в правильной работе измерительных средств, используемых для верификации изделия, учитываемого в договоре. Учитывая то, что инспектирующей стороне может быть предоставлен лишь ограниченный доступ к таким средствам, гарантирование правильной работы представляет свои собственные проблемы, обычно адресуемые процессу, называемому *аутентификацией*.

Аутентификация – это «процесс, посредством которого отслеживающая сторона получает соответствующую уверенность в том, что информация, сообщаемая системой мониторинга, точно отражает истинное состояние отслеживаемого изделия»⁸. Принимающая сторона накладывает аналогичные требования на верификационное оборудование инспектирующей стороны, и она должна будет сертифицировать все такое оборудование до его установки и использования на ее площадке. Поэтому сертификация представляет собой «процесс, посредством которого принимающая сторона убеждается в том, что система мониторинга ... не раскрывает никакой засекреченной информации об инспектируемом секретном изделии отслеживающей стороне»⁹. Общим подходом к примирению требований этих процессов является реализация информационного барьера, который служит для защиты секретных данных измерений от инспектирующей стороны¹⁰. Данные измерений, достаточные для верификации достоверности изделия, учитываемого по договору, собираются и обрабатываются для получения несекретного двоичного результата «проходит – не проходит». Информационный барьер позволяет инспектирующей стороне получить доступ только к этому результату, но не к полному измеренному набору данных. С учетом того, что процесс аутентификации подтвердил верификационные возможности системы измерения, двоичный результат отражает, что измеряемая система, материал, или компонент удовлетворяют критериям, согласованным обеими сторонами.

Существуют два подхода к построению информационного барьера и определению критерия «проходит – не проходит»: подход шаблона и подход атрибута. В подходе шаблона используется сравнение характеристик, присущих декларированному изделию, с аналогичными характеристиками известного и надежного изделия, с применением измеренных данных¹¹. Такой подход обычно требует продолжительного (долговременного) хранения засекреченных данных, с сопутствующими этому рисками. Подход атрибута использует характеристики, согласующиеся с ядерным боеприпасом или материалов, такие, как отношение плутония-240 к плутонию-239, так что изделие может быть верифицировано без продолжительного хранения засекреченных данных¹².

Информационные барьеры необходимы на всех стадиях измерений, где собирается засекреченная или чувствительная информация, но чаще всего они применяются на этапах подтверждения и демонтажа боеголовок в режиме мониторинга. Потребности верификации на этом участке процесса делают необходимыми измерения, которые являются интрузивными и собирающими потенциально засекреченную информацию. Сложность такого подхода делает желательным поиск альтернативных и дополняющих методов верификации, в особенности за этапом начального ввода изделий, учитываемых по договору, в режим верификации. В самом деле, последний доклад Консультативного совета по международной безопасности Государственного департамента США рекомендует: «разрабатывать в среднесрочной и долгосрочной перспективе технологии и процедуры для системного подхода к ядерным предприятиям каждой страны, которые охватывают весь спектр от

производства материалов, изготовления компонентов, сборки боеголовки, развернутых и не развернутых боеприпасов, демонтажа и утилизации материалов»¹³. Для того, чтобы поддержать такой системный подход, желательно разработать набор технологий, помимо тех, которые включают традиционные системы с информационным барьером, для поддержки всех этапов режима верификации.

Технологии должны быть способными выполнять мониторинг предприятия без раскрытия подробностей безопасности и должны верифицировать как пустые, так и полные контейнеры, включая скрытые экраном изделия без возможности визуальной инспекции их внутреннего содержания. Одним из недостатков многих современных радиационных технологий является то, что результаты измерения засекречиваются и поэтому требуют использования радиационного барьера для защиты данных. Это еще более усложняет оборудование и налагает дополнительную нагрузку на требования аутентификации и сертификации, а также значительно ограничивает данные, доступные для обзора и подтверждения, простым считыванием загорания одной красной или зеленой лампочки.

Технологии, которые могут предоставить дополнительные верификационные измерения без сбора засекреченных данных, должны стать предпочтительными для всех соответствующих сторон. Такие технологии могут использовать либо иную модальность, отличающуюся от измерений радиации (то есть «ортогональное измерение»), либо использовать физический процесс, который препятствует сбору засекреченных данных (то есть тот, который обладает «внутренним информационным барьером»). Технологии из последней категории могут приносить полезные данные верификации без необходимости в сложной технологии информационного барьера. Кроме того, собранные данные могут сформировать «шаблон» для измеряемого изделия, аналогичный тому, который используется в измерениях радиации, для обнаружения изменений в физических характеристиках изделия. Наконец, они могут дальше использоваться для верификации неядерных компонентов в течение процесса демонтажа, что невозможно для традиционных измерений детектирования радиации. Некоторые из этих методов будут подробно рассмотрены в данной статье.

На протяжении этапа демонтажа ядерных боеприпасов и жизненного цикла материала одним из фундаментальных вызовов является возможность предотвращения и обнаружения несанкционированного отвлечения материала. Этот вызов может быть встречен усиленным внедрением режима охраны, в котором критическим аспектом является верификация декларированного присутствия или отсутствия ядерных материалов и компонентов оружия. Режим охраны представляет собой процесс, которым вокруг изделия, учитываемого в договоре, устанавливается и поддерживается контролируемая граница для предотвращения и обнаружения несанкционированного доступа к изделию. Верификация режима охраны часто отделяется от процесса инициализации изделия, учитываемого в договоре. В таком случае верификация режима охраны поддерживает, но не первоначально устанавливает уверенность в аутентичности и целостности изделия, учитываемого в договоре, когда оно перемещается в процессе демонтажа и утилизации.

Типичные подходы к режиму охраны используют технологии для поддержания целостности и аутентичности изделий и установок посредством уникальной аутентификации и обнаружения вмешательства^{14,15}. Уникальная проблема возникает во время демонтажа, где традиционные мероприятия режима охраны, такие, как метки, печати и наблюдение становятся неэффективными из-за того, что для выполнения демонтажа владелец должен будет иметь полный доступ к изделию. Это означает, что все метки и печати, защищающие изделие, будут удалены. Кроме того, процесс является весьма секретным, и наблюдение за ним не будет разрешено. Еще одно усложнение заключается в том, что одно отдельное изделие, учитываемое в договоре, входит в процесс в форме полного боеприпаса или боеголовки, но из процесса выходят много изделий в контейнерах в форме разобранных компонентов. Такое изменение конфигурации и разделение компонентов делает подтверждение того, что не произошло отвлечение или замена, исключительно трудным.

Окончательное требование к режиму мониторинга боеголовок состоит в том, чтобы предоставить возможность удаления изделия из режима верификации или перевести его в другой режим без любой потери уверенности в целостности и аутентичности позиции или материала. Верифицируемая утилизация изделия, учитываемого по договору, вероятнее всего, потребует его преобразования в незасекреченные физические и химические формы. Окончательная утилизация может также включать долговременное хранение этих изделий или даже изготовление топливных сборок в форме топлива из смеси окислов (МОКС) и загрузки его в реакторы для производства электроэнергии и для изменения изотопного состава так, чтобы материал больше не был пригоден к использованию в оружии.

Целью статьи являются несколько инструментов, которые расширяют набор доступных технологий и методологий подтверждения боеголовок и режима охраны, в своей основе защищающих засекреченную информацию, не требующуюся в режиме верификации. Мы рассматриваем один электромагнитный метод и не-

сколько акустических методов с различными средствами и подходами к применению этих технологий в процессе режима охраны. Мы также описываем способ, которым неядерные технологии предлагают дополняющие методы и подходы к традиционным технологиям верификации на базе радиации. Поскольку сильные стороны этих технологий направлены на многие области, в которых технологии на базе радиации имеют ограничения, они могут быть использованы вместе с измерениями на базе радиации для создания более сильного и более надежного режима охраны. Конечным результатом будет повышенная уверенность в общем режиме верификации и увеличение убежденности, прозрачности и доверия между сторонами договора.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИОННАЯ КАТУШКА

Принципы действия

Низкочастотные электромагнитные сигналы обладают несколькими преимуществами, желательными для верификации договора по контролю над вооружениями и реализации режима охраны. Поскольку измерения на низких частотах зависят от макроскопических электрических и магнитных свойств материалов, то целесообразно будет рассмотреть исключение информационного барьера, который мог бы потребоваться в ином случае для защиты секретных данных, относящихся к изотопному составу компонентов ядерного оружия. Потенциальная эксплуатация в установках с взрывчатыми веществами не представляет угрозы для безопасности, поскольку для сбора требуемых данных могут быть использованы малые уровни магнитного поля, сравнимые с фоновым геомагнитным полем. Кроме того, электромагнитные измерения могут обычно быть выполнены с помощью стандартного оборудования за короткие промежутки времени порядка нескольких минут. Необходимое оборудование может быть сконструировано таким образом, чтобы оно работало от батарей, было легким и свободным от ограничений экспортного контроля.

Поведение низкочастотных электромагнитных сигналов управляется хорошо известными физическими принципами, такими как закон электромагнитной индукции Фарадея. Закон Фарадея представляет одно из четырех уравнений Максвелла, которые формально описывают классическое поведение электромагнитных полей¹⁶. Низкочастотные электромагнитные поля активно используются в широком ассортименте технологий, таких, как генерация электроэнергии, обработка металлов давлением, неразрушающий контроль и индукционный нагрев. Низкочастотные электромагнитные технологии также широко используются для инспекции металлических контейнеров и инфраструктуры для определения целостности изделий¹⁷⁻¹⁹. Низкочастотный режим отличается от высокочастотного режима тем, что в нем электрические и магнитные поля эффективно развязаны друг от друга, а распределение энергии локально концентрируется вокруг компонента или устройства, а не излучается в пространство в виде электромагнитных волн. Практические частоты для низкочастотного режима зависят от приложения и могут находиться в широком диапазоне от 10 Гц до 10 МГц или выше.

Важным фундаментальным параметром в определении взаимодействия электромагнитных сигналов с электропроводящими материалами является глубина проникновения, или «глубина скин-слоя»²⁰. Формула для глубины скин-слоя показана в уравнении (1), где f – частота сигнала, μ – магнитная проницаемость материала, и σ – электропроводность материала. Эта величина используется при разработке низкочастотных систем и она относится к способности электромагнитного поля проникать в материал в зависимости от частоты прилаемого поля, а также от проводимости и проницаемости материала.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (1)$$

Амплитуда индуцированного тока внутри материала экспоненциально уменьшается с увеличением глубины из-за проявления скин-эффекта, и глубина скин-слоя определяется как глубина под поверхностью, на которой амплитуда равна 37 процентам от своего значения на поверхности. На трех глубинах скин-слоя амплитуда равна 5 процентам от своего значения на поверхности, и на такой глубине взаимодействие с внутренними особенностями будет слабым.

Хранение компонента боеприпаса и материала

Примером использования низкочастотных электромагнитных сигналов для верификации договора по контролю над вооружениями является электромагнитная индукционная катушка, разработанная в Тихоокеанской

северо-западной национальной лаборатории²¹. Такая технология, показанная на рисунке 1, первоначально была продемонстрирована в конце 1990-х годов в проектах, финансируемых Министерством энергетики, и далее разрабатывалась в проекте, финансируемом Агентством по сокращению военной угрозы в начале 2000-х годов для верификации хранящихся ядерных материалов. На основании принципа глубины скин-слоя низкочастотное магнитное поле от окружающей катушки проникает через проводящий барьер, такой, как контейнер для хранения из нержавеющей стали, и взаимодействует с материалом, помещенным внутри контейнера. Такой метод способен проверять компоненты и материалы, используемые в процессе демонтажа и утилизации, и хранящиеся или транспортируемые в запломбированных металлических контейнерах без необходимости физического контакта с пломбой или открытия контейнера. Он может быть применен для построения истории свойств индивидуального изделия с использованием недорогого и быстро получаемого простого измерения. Таким способом катушка может предоставить несекретный шаблон для верификации и отслеживания непрерывной истории изделия, учитываемого по договору. На ядерном предприятии «Пантекс» были проведены многочисленные полевые кампании для демонстрации метода для такой цели посредством измерения свойств центральных металлических узлов из плутония в контейнерах для хранения AL-R8 и AT-400. Утвержденный предприятием «Пантекс» анализ характера и последствий отказов также определил, что метод представляет минимальный риск безопасности даже в сценарии наихудшего случая, поскольку самые высокие амплитуды магнитного поля, используемые в измерении, сравнимы с геомагнитным полем. Были также проведены другие полевые измерения для изучения влияния изменений контейнеров и способности различать металлические и оксидные формы материала²².

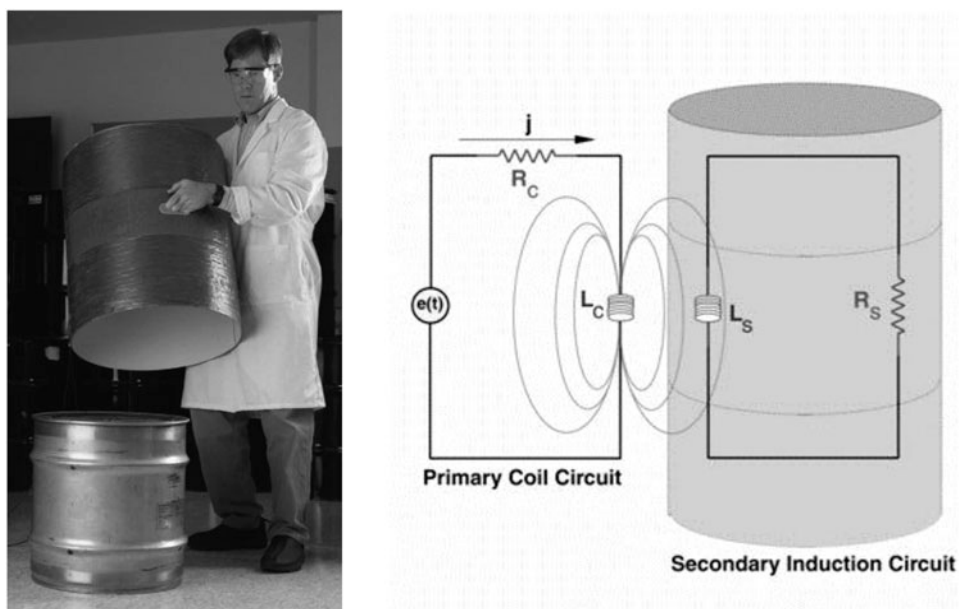


Рисунок 1: Разработанная в Тихоокеанской северо-западной национальной лаборатории для верификации договора по контролю над вооружению электромагнитная индукционная катушка (слева) и ее эквивалентная электрическая схема (справа). Надписи на рисунке (слева направо): 1 – схема первичной катушки; 2 – схема вторичной индукции.

Обзор метода

Электромагнитная индукционная катушка работает в соответствии с принципом, иллюстрируемым на рисунке 1. Катушка размещается вокруг контейнера и соединяется с источником низкочастотного сигнала так, чтобы ток, текущий через катушку, создавал магнитное поле. Часть магнитного поля катушки проникает через стенки контейнера и взаимодействует с хранящимся объектом, имеющим определенную электрическую проводимость и магнитную проницаемость. Для сценариев договоров по сокращению вооружений и режима охраны интерес представляют такие материалы, как уран, плутоний и свинец; эти материалы проводят электричество и поэтому они могут быть охарактеризованы с использованием полей, генерируемых катушкой. Локализованные токи, известные как вихревые токи, наводятся в хранящемся объекте и генерируют поле отклика в соот-

ветствии с законом Ампера, которое измеряется через изменения в импедансе катушки. Весь процесс измерения может быть завершен в течение нескольких минут.

На протяжении процесса сбора данных частота изменяется в диапазоне частот, подходящем для конфигурации, и на каждой частоте измеряется импеданс катушки. Базовое измерение пустого контейнера предоставляет опорный набор данных для контейнера с вложенным объектом, и этот набор применяется для нормировки всех измерений процесса, как это показано на рисунке 2. Нормировка результатов по отношению к пустому контейнеру позволяет оператору подтвердить, что магнитные поля действительно проникли через стенки контейнера и взаимодействуют с его содержимым. Поскольку процедура нормировки предполагает, что все контейнеры идентичны пустому эталонному контейнеру, для каждого сценария инспекции должен быть указан приемлемый диапазон допусков для материалов в контейнере и размеров контейнера. Эти вопросы были изучены для контейнера AT-400R и ожидается, что они будут частью проектного процесса для использования системы электромагнитной катушки для заданного типа контейнера. Импеданс катушки представляет собой комплексное число, зависящее от ряда факторов, таких, как тип хранящегося материала, его объем, ориентация, распределение масс, и электромагнитные свойства контейнера.

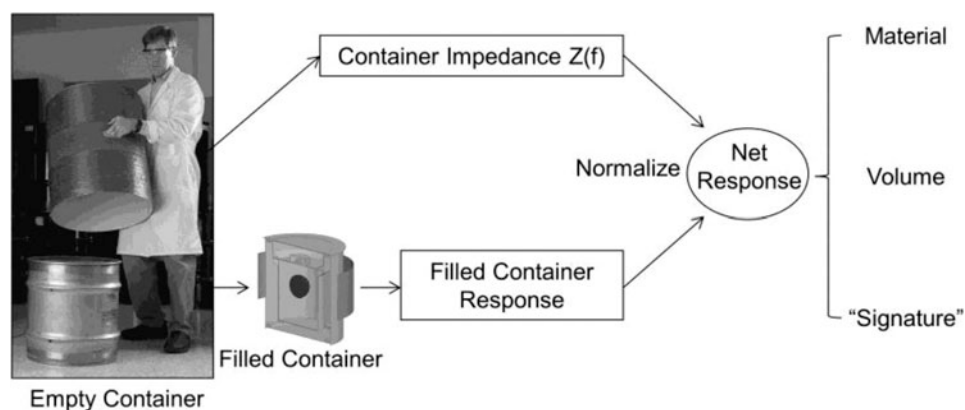


Рисунок 2: Процедура нормализации, используемая для получения электромагнитных сигнатур хранящихся объектов. Надписи на рисунке (слева направо и сверху вниз): 1 – пустой контейнер; 2 – заполненный контейнер; 3 – импеданс контейнера; 4 – отклик заполненного контейнера; 5 – нормализация; 6 – итоговый отклик; 7 – материал; 8 – объем; 9 – «сигнатура».

Полученный импеданс катушки может быть разделен на действительную и мнимую части и нормирован по отношению к эталонному импедансу пустого контейнера (R_0 , X_0):

$$Z_{norm} = R_{norm} + jX_{norm} = \frac{Z_{filled} - R_0}{X_0} = \frac{R_{filled} - R_0}{X_0} + j \frac{X_{filled}}{X_0}$$

Этот нормированный отклик импеданса может быть использован как сигнатура или шаблон хранящегося объекта для сравнения с другими контейнерами, декларированными для хранения идентичных объектов, таких, как хранящиеся компоненты боеприпасов²³.

Пример результатов

Применение коммерчески доступных средств моделирования электромагнитного поля по методу конечных элементов оказалось мощным методом расчета электромагнитных катушек для различных приложений в процессе демонтажа, хранения и утилизации. На рисунке 3 показаны типичные результаты, полученные в Тихоокеанской северо-западной национальной лаборатории для изменения измеренного и расчетного импеданса для различных объектов испытаний, размещенных внутри контейнера AT-400R. Контейнер AT-400R изготовлен из нержавеющей стали 304L с вкладышами из пенопласта высокой плотности и сварной внутренней герметизирующей оболочкой. Внутренняя герметизирующая оболочка располагается внутри внешнего контейнера между двумя вкладышами, заполненными пенопластом. Каждый объект испытания поддерживается внутри

контейнера трубчатой подставкой из плексигласа. Прекрасное согласие между расчетами и измерениями показывает ценность применения средств моделирования для исследования использования этого метода для различных предлагаемых сценариев²⁴.

В данных, представленных на рисунке 3, частота источника изменялась от 100 Гц до 3 кГц. Процесс нормализации выдает последовательность кривых (одну для каждого объекта испытаний), сходящихся в одну точку при увеличении частоты. Все хранившиеся материалы обладали сходящейся в одну точку сигнатурой, поскольку высокие частоты полностью экранируются металлическим контейнером. Результаты показывают явные различия между различными хранившимися материалами в приведенном диапазоне частот.

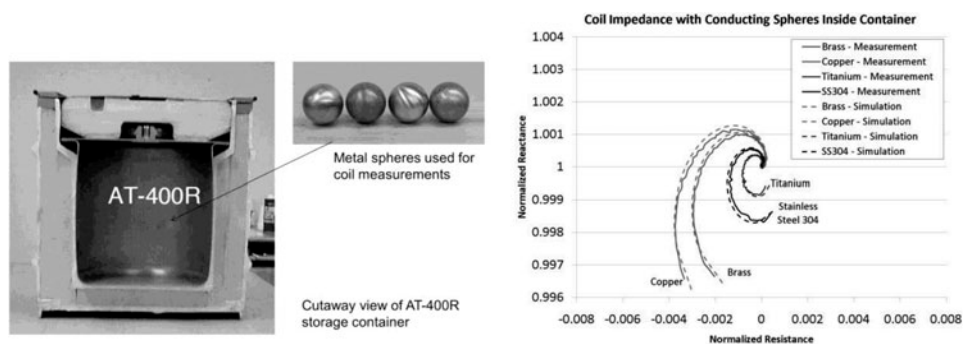


Рисунок 3: Применение электромагнитной индукционной катушки для измерений металлических шаров, хранящихся внутри ядерных контейнеров для хранения. В левой части рисунка показан вид контейнера для хранения AT-400R в разрезе и металлические сферы, использованные в экспериментах с катушкой. В правой части рисунка показаны кривые импеданса катушки с проводящими сферами внутри контейнера. По вертикальной оси отложено нормированное реактивное сопротивление, по горизонтальной оси – нормированное активное сопротивление. Надписи на легенде (сверху вниз): 1 – латунь – измерение; 2 – медь – измерение; 3 – титан – измерение; 4 – нержавеющая сталь – измерение; 5 – латунь – расчет; 6 – медь – расчет; 7 – титан – расчет; 8 – нержавеющая сталь – расчет. Надписи на рисунке (сверху по часовой стрелке): 1 – титан; 2 – нержавеющая сталь; 3 – латунь; 4 – медь.

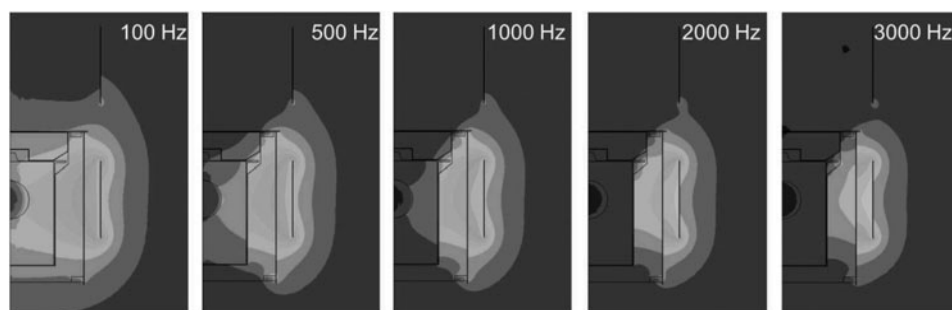


Рисунок 4: Влияние частоты возбуждения (в Гц) на распределение магнитного поля в модели латунной сферы внутри контейнера для хранения AT-400R.

Выбор соответствующего диапазона частот является важным проектным соображением для обеспечения эффективности использования метода электромагнитной катушки. Для определения диапазона частот, так же как и для исследования влияния других параметров, таких, как размеры объекта, могут быть использованы расчеты. На рисунке 4 показано расчетное влияние частоты возбуждения в диапазоне от 100 Гц до 3 кГц на распределение магнитного поля в модели латунной сферы внутри герметизирующей оболочки.

Результаты показывают, что более низкие частоты возбуждения катушки обеспечивают большее проникновение магнитного поля, как это и ожидается из общего уравнения для глубины скин-слоя. Кривые показывают также, на частотах выше примерно 1,5 кГц магнитные поля ограничены участками за пределами внутренней герметизирующей оболочки контейнера AT-400R.

Защита секретной информации

Преимущество метода индукционной катушки состоит в том, что маловероятно, что само по себе измерение импеданса раскроет потенциально секретную информацию о конкретном объекте в контейнере. Хотя это утверждение в таком контексте подробно не исследовалось, теоретическая работа по определению уникальности в измерении вихревых токов поддерживает этот вывод²⁵. Вывод вытекает из того факта, что общий импеданс катушки является комбинацией импеданса ненагруженной катушки и вкладов в импеданс из-за отклика магнитного поля катушки от индуцированных вихревых токов в контейнере и объекте. Если измерения импеданса нормализованы по отношению к пустому контейнеру, то отклик импеданса катушки в основном определяется характеристиками объекта в контейнере. В некоторых случаях такие характеристики могут быть определены из знания тангенциальных электрических и магнитных полей вокруг границы, охватывающей объект. Эти компоненты не могут быть вычтены из измерений импеданса, поскольку импеданс катушки относится к суммарному охваченному магнитному потоку (относящемуся к интегралу поля), а не к действительному пространственному определению поля. Другими словами, импеданс представляет сокращенное подмножество данных о поле, необходимое для определения уникальных характеристик объекта. Хотя специфические требования по безопасности любого сценария верификации должны быть тщательно изучены, метод катушки представляет весьма многообещающее направление для инспекции интересующих изделий без использования информационного барьера.

Поскольку из конкретного отклика импеданса не следует уникальности характеристик хранящегося объекта, теоретически возможно изменить физические или электромагнитные характеристики объекта таким образом, чтобы создать два различных объекта, имеющих одинаковый отклик импеданса катушки. Способность катушки защищать секретную конструкторскую информацию может препятствовать уникальности сигнатуры импеданса. В этой связи было проведено исследование простого демонстрационного примера с использованием модели конечных элементов, как это показано на рисунке 5.

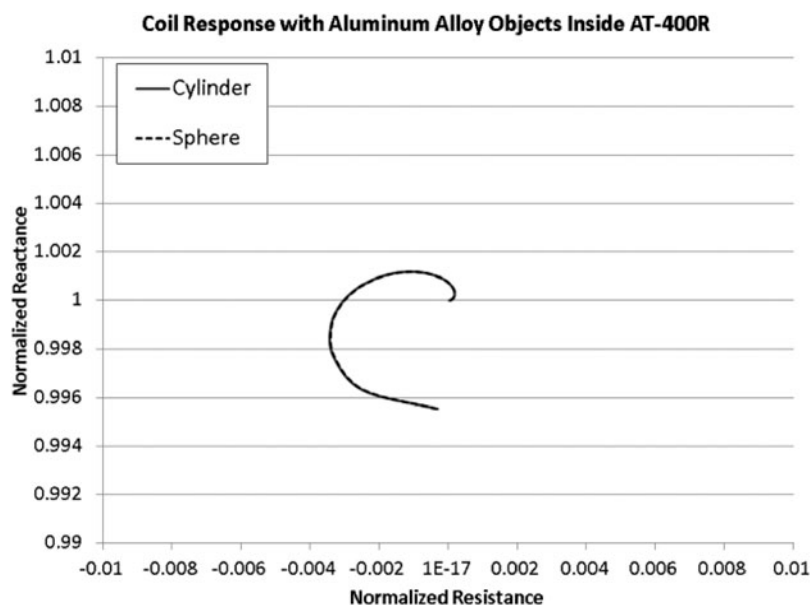


Рисунок 5: Результаты предсказания импеданса для различных металлических испытываемых объектов, показывающие идентичные результаты для каждого объекта. На рисунке показан отклик катушки с объектами из алюминиевого сплава внутри контейнера AT-400R. По вертикальной оси отложено нормированное реактивное сопротивление, по горизонтальной оси – нормированное активное сопротивление. Надписи на легенде (сверху вниз): 1 – цилиндр; 2 – сфера.

На рисунке показан предсказанный нормализованный импеданс двух сплошных испытываемых объектов, отдельно размещаемых внутри контейнера для хранения AT-400R из нержавеющей стали. Первый испытываемый объект – это алюминиевая сфера диаметром 4,75 дюйма с электропроводностью $2,45 \cdot 10^7$ Сименс/м, а второй испытываемый объект – это алюминиевый цилиндр диаметром 4 дюйма и высотой 4,6 дюйма с элек-

тропроводностью $2,7 \cdot 10^7$ Сименс/м. Оба испытываемых объекта располагаются в центре контейнеров. Вариация электропроводности между этими двумя примерными объектами лежит внутри ожидаемого диапазона для алюминиевых сплавов²⁶. Близкое согласие двух расчетных кривых демонстрирует, что два различных объекта теоретически могут иметь схожий отклик импеданса.

В этом примере результаты сужают диапазон возможных объектов в контейнере без раскрытия соответствующей подробной информации о физических характеристиках. Такой подход может повысить уверенность сторон договора в том, что объект в контейнере является тем, который был объявлен, в особенности, если такой подход будет сопровождаться другими измерениями атрибутов. Измерение содержимого контейнера при сохранении ожидаемой сигнатуры отклика, вероятно, будет трудным на практике. Вероятно, что подробное исследование сценария ограничений в обнаружении изменения, дающих физически возможные вариации размера, свойств и геометрии материала, необходимо будет провести перед полной реализацией технологии. Такое исследование может привести к выводу, что применение других ортогональных технологий в комбинации с методом электромагнитной катушки может поддержать уверенность в таком режиме охраны.

Верификация отсутствия

В течение процесса демонтажа боеприпасов может потребоваться проверить, что большие металлические транспортные контейнеры на самом деле являются пустыми и не содержат никаких ядерных материалов, намеренных к отвлечению из режима охраны^{27,28}. Сами по себе измерения радиации могут оказаться недостаточными для верификации, поскольку ядерные материалы могут быть скрыты с помощью материалов радиационной защиты, например, свинца. Такой сценарий иллюстрирует дополняющие аспекты метода индукционной катушки, который может обнаружить присутствие электропроводящего свинцового материала, в особенности в количествах, необходимых для защиты существенного количества ядерного материала.

Было проведено моделирование для оценки обнаружения сплошной свинцовой сферы в центре гладкостенного цилиндрического контейнера. Контейнер из нержавеющей стали значительно превышал по размерам обшуждавшийся ранее контейнер для хранения АТ-400R. Исследовались контейнеры высотой 1,52 м и диаметром 1,07 м; толщина стенок варьировалась от 1 до 10 мм. Для проверки содержимого контейнера применялась охватывающая катушка шириной 0,3 м, работающая в диапазоне частот от 50 Гц до 2 кГц.

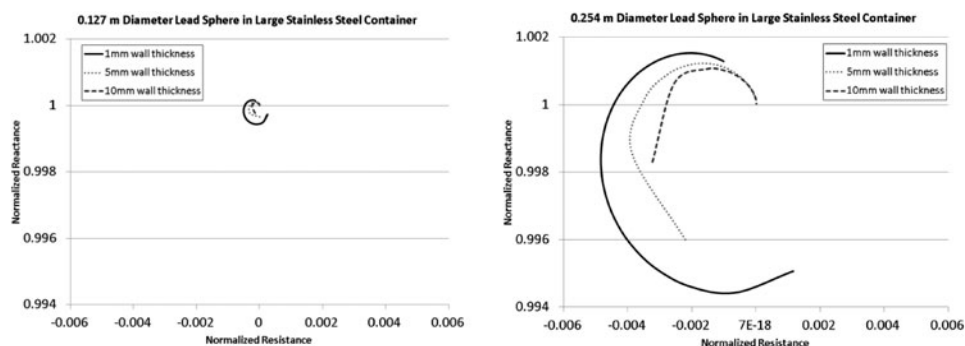


Рисунок 6: Расчетный импеданс свинцовых сфер диаметром 0,127 м и 0,254 м, размещенных внутри примерного контейнера. Результаты рассчитаны для толщин стенок контейнера в интервале от 1 до 10 мм. На левом рисунке приведены результаты для свинцовой сферы диаметром 0,127 м в большом контейнере из нержавеющей стали; на правом рисунке – результаты для свинцовой сферы диаметром 0,254 м. По вертикальной оси отложено нормированное реактивное сопротивление, по горизонтальной оси – нормированное активное сопротивление. Надписи на легенде (сверху вниз): 1 – толщина стенки 1 мм; 2 – толщина стенки 5 мм; 3 – толщина стенки 10 мм.

Как показано на кривых нормализованного импеданса на рисунке 6, свинцовую сферу диаметром 0,254 м будет легко обнаружить даже в контейнере из нержавеющей стали толщиной 10 мм. Свинцовая сфера диаметром 0,127 м также обнаружима, но ее диаметр может быть близок к минимальному обнаружимому размеру. Вероятность обнаружения зависит от толщины стенок контейнера, электропроводимости, магнитной проницаемости и размеров объекта.

Если режим мониторинга разрешает доступ к пустым контейнерам, то можно будет также построить шаблон пустого контейнера. Последующие измерения декларированного пустого контейнера можно будет потом

сравнить с оригиналом, чтобы гарантировать получение ожидаемых результатов по измерению импеданса.

Утилизация материала

Другое потенциальное применение метода катушки электромагнитной индукции в рамках контроля над вооружениями относится к сценарию утилизации материала, в котором демонтированные из боеприпасов центральные металлические узлы необратимо конвертируются в несекретную форму или в топливо со смесью оксидов для реакторов атомных электростанций. Например, по Соглашению по утилизации плутония и управлению им, первоначально подписанного в сентябре 2000 года, Соединенные Штаты и Российская Федерация согласились «поэтапно вывести приблизительно 34 тонны плутония из своих программ ядерного оружия и конвертировать этот плутоний в формы, непригодные для ядерного оружия»²⁹. По первоначальному соглашению, декларированными формами для утилизации плутония будут 25 тонн «Центральных металлических узлов и чистого металла» и 9 тонн «Центральных металлических узлов, чистого металла или оксида» для Соединенных Штатов, и 25 тонн «Центральных металлических узлов и чистого металла» и 9 тонн «Оксида» для Российской Федерации³⁰. В соответствии с этим соглашением, «деятельность по мониторингу и инспекциям должна быть построена и реализована таким образом, чтобы обеспечить, чтобы проверяющая сторона имела возможность независимо подтвердить, что условия и положения соглашения в отношении утилизации плутония, смешанных компонентов, отработавшего плутониевого топлива, иммобилизованных форм, и установок по утилизации, были удовлетворены»³¹. В 2010 году был подписан протокол, дополняющий данное соглашение, в который предусматривал конверсию всего плутония в МОКС-топливо. Вообще говоря, верификация декларированных форм может составлять важную часть процесса утилизации ядерного материала, и метод электромагнитной катушки может служить в качестве полезного средства измерений.

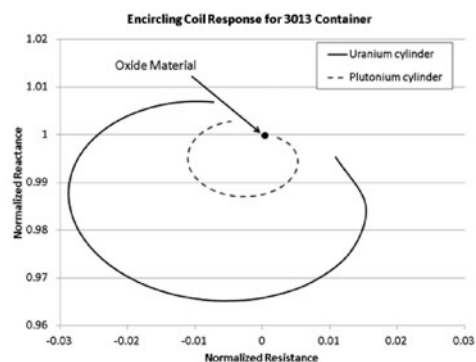


Рисунок 7: Моделирование ядерного металла, хранящегося в контейнере 3013. Слева показан типичный контейнер, справа приведен расчетный отклик охватывающей катушки для контейнера 3013. На правой части рисунка по вертикальной оси отложено нормированное реактивное сопротивление, по горизонтальной оси – нормированное активное сопротивление. Надписи на легенде (сверху вниз): 1 – урановый цилиндр; 2 – плутониевый цилиндр. Точкой показан отклик непроводящего оксида.

В то время, как Соглашение по утилизации плутония и управлению им не предусматривает мониторинга и инспекции материала до его конверсии в оксид и изготовления МОКС-топлива, в будущих соглашениях может быть предусмотрено закрытие этого промежутка между отслеживаемым демонтажем и утилизацией в качестве МОКС-топлива, в настоящее время покрываемым по Соглашению по утилизации плутония и управлению им. Такое потенциальное будущее соглашение должно будет иметь возможность различения металлической и оксидной формы плутония и урана. Имея в виду такую потенциальную будущую верификацию, было проведено моделирование для демонстрации того, что электромагнитная катушка может быть использована для различения металлических и оксидных материалов. Метод катушки может легко определить разницу между этими типами материалов, поскольку металлическая форма является проводником электричества, а оксидная форма является изолятором. На рисунке 7 показаны результаты моделирования контейнера для хранения ядерных материалов по стандарту 3013 Министерства энергетики с двумя различными металлами и оксидным материалом³². Контейнер по стандарту 3013 представляет собой контейнер с двумя стенками из нержавеющей стали дополнительным внутренним контейнером, который используется на практике.

Модели заполненного контейнера содержат примерные металлические цилиндры, представляющие 4,4 кг плутония или урана. Размер плутониевого металлического цилиндра ограничивается условием критической

массы, а размер уранового металлического цилиндра был выбран тем же самым для целей сравнения. Случай плутониевого оксида показывает точечную сигнатуру импеданса в точке (0, 1) для всех частот, поскольку оксидная форма не взаимодействует с проникающим магнитным полем, и результат будет таким же, как для пустого контейнера. Эти результаты показывают, что метод катушки можно использовать для легкого различения между разными металлами, и металлом и оксидом. Кроме того, поскольку исследующие магнитные поля не взаимодействуют с ядерной структурой материала, метод катушки не предоставляет прямой информации об изотопной природе утилизируемых материалов.

АКУСТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ РЕЖИМА ОХРАНЫ

Принципы действия

Акустическая технология основана на взаимодействии акустических волн с материалами. В текучих средах (жидкостях и газах) акустические волны распространяются как волны сжатия, которые могут быть описаны с помощью волнового уравнения. В твердых телах могут распространяться как волны сжатия, так и волны сдвига, хотя фундаментальное поведение этих волн может быть описано с помощью волновых уравнений того же типа, которые описывают распространение в текучих средах. В твердых телах эти волны также называют упругими волнами или волнами напряжений³³.

Взаимодействие акустических волн с твердыми телами зависит от механических свойств материала, таких, как плотность и постоянные упругости³⁴. Переменность пространственного распределения этих свойств приводит к неоднородности материала с пространственной переменностью акустических свойств, таких, как скорость и акустический импеданс. Напротив, в анизотропном материале акустические свойства зависят от направления распространения. Поведение акустических волн в твердых телах зависит также от типа волны. Обычно рассматриваются три основных типа волн: продольные (обозначаемые через L или P), горизонтально поляризованные волны сдвига (SH) и вертикально поляризованные волны сдвига (SP). В дополнение к этим модам могут также генерироваться поверхностные волны, волны в пластинах и другие типы волн, в зависимости от конкретных параметров и геометрии компонента. В частности, могут быть генерированы специфические типы волн, которые взаимодействуют с границы конструкции, и которые способны распространяться вдоль конструкции на большие расстояния порядка десятков метров. Такие канализированные волны представляют интерес при исследовании недоступных частей конструкции.

Технологии акустических измерений обычно подразделяются на активные и пассивные методы. В активных методах измерительная система передает энергию испытываемому объекту и записывает результат взаимодействия энергии с объектом. Пассивные системы не прилагают никакой энергии к испытываемому объекту; они следят или «слушают» за взаимодействием с энергией от других внешних источников, или источников, находящихся внутри испытываемого объекта.

Взаимодействия акустической волны с материалами формируют основу для нескольких верификационных технологий, интересных для режима охраны в процессе демонтажа. Например, отражения канализированных волн от разрывов в конструкциях образуют базис для акустических технологий для верификации конструкторской информации. Канализированные волны привлекательны для обнаружения вмешательства из-за их способности предоставлять ценную информацию о таких особенностях, как трассировка трубопроводов и расположение соединений и трубопроводов, которые могут находиться вне пределов видимости или визуально неразличимы. Изменения в структуре волновода, такие, как изгиб, дефект или изменение свойств материала, так же как и изменения окружающей среды, могут изменить сигнатуру отклика канализированной волны и предоставить информацию о типе изменения. Сложные акустические взаимодействия с конструкциями поэтому могут быть использованы для создания базового ультразвукового «отпечатка» для подтверждения того, что структурная целостность сохраняется. В таком случае конструкции и материалы, недоступные визуальной инспекции, могут периодически верифицироваться без знания конфигурации структуры. На рисунке 8 показан простой пример измерения лабораторного масштаба (зависимость амплитуды сигнала от времени прихода), который подчеркивает способность ультразвуковых канализированных волн обнаруживать изменения в структуре трубопровода для трех различных типов соединений.

Аналогично, мониторинг акустического излучения с помощью пьезоэлектрических датчиков может непрерывно «прослушивать» акустические или ультразвуковые сигналы, которые могут генерироваться в результате деятельности, характерной для вмешательства, такой, как сверление или разрезание, когда она проявится. В альтернативных подходах для обнаружения вмешательства используется резонансное поведение структур или

материалов. В таких методах к конструкции прилагается известное (калиброванное) возбуждение и записываются возникающие резонансы. В большинстве случаев вмешательство в конструкцию производит изменения в резонансных модах, которые могут быть обнаружены при сравнении с базовым шаблоном. Большая часть этих технологий (за исключением мониторинга акустического излучения и внутренней ультразвуковой метки) находится на самой ранней стадии развития в отношении применимости к верификации договоров.

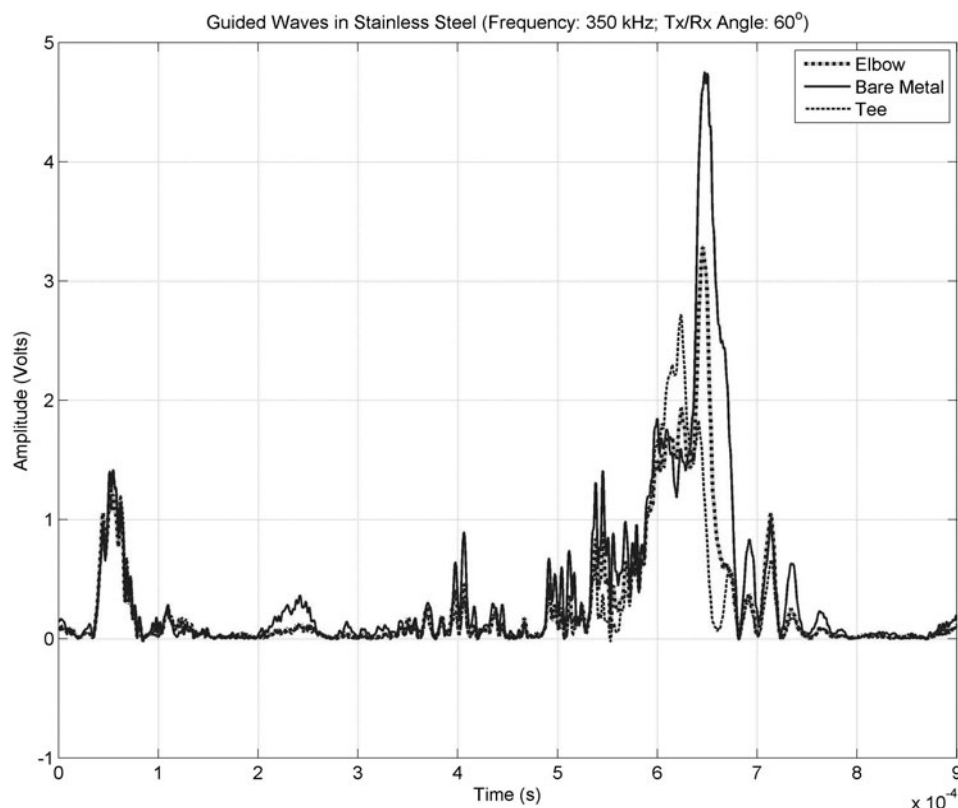


Рисунок 8. Отклик каналлизированной ультразвуковой волны с частотой 350 кГц в нержавеющей стали для инспекции трубопровода. По горизонтальной оси отложено время (в секундах), по вертикальной оси – амплитуда сигнала. Пики сигнала представляют отражения из-за изменений в акустическом импедансе. Надписи на легенде (сверху вниз): 1 – колено (пунктирная линия); 2 – неизолированный металл; 3 – тройник.

Ниже мы рассмотрим вкратце внутреннюю ультразвуковую метку, технологию акустических измерений, в основе которой лежит взаимодействие акустических волн с особенностями микроструктуры, и позволяющую создавать сигнатуры, уникальные для испытываемого объекта.

Внутренняя ультразвуковая метка

Общие сведения

Не интрузивная и неразрушающая уникальная идентификация или верификация декларированного изделия, учитываемого по договору, может быть осуществлена с использованием внутренних свойств материала компонента, таких, как микроструктура материала, в качестве сигнатуры или метки, с помощью которой он идентифицируется. Металлы и иные зернистые компоненты обладают структурой зерна, случайной даже в различных позициях на одном и том же компоненте, которая может служить уникальной сигнатурой для изделий. Акустические волны, прилагаемые к этим компонентам, взаимодействуют с микроструктурой, вызывая рассеяние энергии на поверхностях раздела, таких, как границы зерен. Такое рассеяние зависит от среднего размера рассеивателя (зерна) D , длины волны λ падающей акустической волны, и изменения акустического импеданса на границе зерна^{35,36}. В материалах, используемых в компонентах, представляющих интерес для режима верификации, размеры зерен могут изменяться в различных положениях на компоненте, приводя к уникальной ультразвуковой сигнатуре, присущей такому компоненту.

Разработанная в Тихоокеанской северо-западной национальной лаборатории система внутренней ультра-

звуковой метки использует это уникальное физическое свойство для идентификации компонента (маркировки)³⁷. Подделка уникальной микроструктуры и ориентации зерен в компоненте почти невозможна, что делает ультразвуковую внутреннюю маркировку в высшей степени устойчивой к замене оригинальных компонентов на поддельные. В то же самое время сигнатура характерна для небольшого участка компонента или объекта и для объемных упругих свойств объекта, и не относится к изотопной или иной чувствительной информации. Поскольку извлечение секретной информации об изделии, учитываемом по договору, из этих измерений почти невозможно, метод предоставляет внутренний информационный барьер. Этот метод эффективен практически для всех инженерных материалов, пригодных для построения изображений микроструктуры, включая композиционные материалы и сплавы, и он может быть применен либо к изделию, учитываемому по договору, либо к контейнеру или средству доставки. Внутренняя ультразвуковая метка может быть использована в дополнение к методам ядерного обнаружения для аутентификации компонента.

Внутренняя ультразвуковая метка требует доступа к изделию, учитываемому по договору, для определения уникальной ультразвуковой сигнатуры. Однако, в некоторых случаях интересующие компоненты могут быть помещены в контейнеры. В таких случаях могут быть доступны два варианта. Во-первых, если может быть получен доступ к самому изделию, то внутренняя ультразвуковая метка может быть использована для уникальной маркировки изделия. В противном случае, внутренняя метка может быть получена для контейнера, и при использовании вместе с другими методами (такими, как пломбы, устойчивые к вмешательству) она может предоставить обоснованную уверенность в том, что изделие не было тайно изменено.

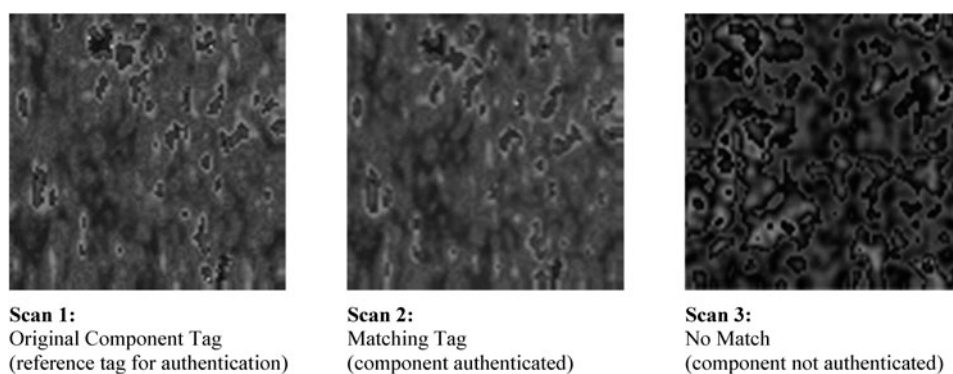


Рисунок 9. Примеры изображений ультразвуковых внутренних меток. Подписи к изображениям сканов (слева направо): 1 – оригинальная метка компонента (шаблонная метка для аутентификации); 2 – совпадающая метка (компонент аутентифицирован); 3 – нет совпадения (компонент не аутентифицирован).

Пример результатов

Внутренняя ультразвуковая метка использует высокочастотный ультразвуковой преобразователь для сканирования малой площадки на поверхности компонента для построения ультразвукового изображения его подповерхностной микроструктуры. Ультразвуковое изображение подповерхностной микроструктуры служит в качестве уникального «отпечатка» или подповерхностной внутренней метки, по которой компонент может быть идентифицирован и снова верифицирован повторным сканированием той же самой площадки в различные моменты действия режима охраны. Примеры ультразвуковых внутренних меток показаны на рисунке 9. Левое изображение – это ультразвуковая внутренняя метка, построенная для оригинального компонента, среднее изображение – это вторая внутренняя метка, которая верифицирует компонент, и правое изображение – это третья метка, показывающая, что компонент не является оригинальным.

Система ультразвуковых внутренних меток сохраняет изображения сканов ультразвуковых внутренних меток и позволяет пользователю обращаться к этим данным для анализа с целью верификации компонента на площадке. Внутренняя ультразвуковая метка не чувствительна к небольшим царапинам на поверхности, поскольку изображаемая ею микроструктура расположена на глубине нескольких миллиметров под поверхностью компонента; тем не менее, значительные царапины и вмятины на поверхности, которые влияют на микроструктуру, могут повлиять и на метод. По этой причине рекомендуется использовать несколько меток (то есть, в нескольких позициях на изделии).

Готовность к верификации договора

Внутренняя ультразвуковая метка обладает несколькими потенциальными применениями на этапе демонтажа в режиме мониторинга. Система внутренних ультразвуковых меток, показанная на рисунке 10, представляет собой переносное устройство, которое сканирует и анализирует данные изображений для верификации меток компонентов во время инспекции. Такой вид технологии в особенности полезен для отслеживания не-секретных и неядерных компонентов, таких, как аэродинамический корпус, окружающий авиабомбу, показанный на рисунке 10. Технология была проверена в лаборатории и ее характеристики были продемонстрированы на прототипах систем. Однако перед использованием этой системы для верификации по любому будущему договору потребуется провести ее аутентификацию и сертификацию.



Рисунок 10. Фотография системы ультразвуковых внутренних меток. Используемой для сканирования компонента.

Уникальная идентификация изделия для инициализации боеголовок

Изображения ультразвуковых внутренних меток микроструктуры оригинальных компонентов в одном, или более, дискретных положениях, могут быть использованы в качестве надежного метода уникальной идентификации боеголовок или бомб в части инициализации. Внутренние метки уникальны для положения скана на компоненте, и потребуется аккуратно записывать или отмечать положения сканов на компоненте для того, чтобы проводить повторные сканирования в более поздние моменты времени для подтверждения компонента. В том случае, если изделие, учитываемое по договору, помещается в контейнер, то ультразвуковые внутренние метки могут также быть получены для контейнеров, запечатанных сваркой, для уникальной идентификации контейнера, в который помещено изделие, учитываемое по договору.

ВЫВОДЫ

Будущие режимы верификации договоров могут зависеть от подхода на системном уровне к управлению относящихся к ядерному оружию материалов и соответствующих компонентов на протяжении процессов демонтажа, хранения и утилизации. Верификация на каждом этапе режима, вероятно, будет налагать различные требования на измерения и потенциальное хранение данных, так же как и на различные уровни чувствительности информации. Способность включить методы с внутренними информационными барьерами может помочь упростить ключевые компоненты режима верификации. Например, технологии, основанные на низкочастотных электромагнитных индукционных катушках, обладают преимуществом простоты изготовления, легкости концептуализации и простоты эксплуатации. Эти технологии могут быть спроектированы так, чтобы проникать сквозь металлические стенки для проверки хранящихся изделий, учитываемых по договору, чтобы получить указания на изменения и провести измерения содержимого. Они предоставляют объемные измерения, которые

нельзя будет обратиться для получения чувствительных или засекреченных данных о хранящемся изделии. Более того, они позволяют различить металлические и оксидные материалы, так же как и дать указания на идентичность материала без предоставления, например, его изотопного состава.

Основанные на акустике методы предоставляют аналогичные преимущества в своей способности определять информацию, полезную для режима верификации без раскрытия потенциально засекреченной информации. Так же, как и в электромагнитных методах, отсутствие подробной информации следует из физических принципов, которые создают естественный информационный барьер. Локализованные структуры в материалах образуют базис ультразвуковых внутренних меток и их можно будет сравнить с методами шаблонов, используемыми в подходах с информационным барьером. Альтернативные акустические измерения, которые являются пассивными (обнаружение акустического излучения) или активными (ультразвуковые канализированные волны, акустический резонанс) могут предоставить преимущества для обнаружения вмешательства и уникальной идентификации, но в большинстве случаев для того, чтобы технологии были готовы к развертыванию, потребуются дополнительные разработки. Методы, рассмотренные в данной статье, предоставляют ассортимент альтернативных инструментов для режима верификации, который может возникнуть из будущего договора о сокращении ядерных вооружений. Их перечень не является исчерпывающим, и ожидается, что они могут дополнить и усилить существующие методы верификации, которые используются сейчас. Вероятно, что будут обнаружены другие полезные методы, которые также смогут потенциально применяться без информационных барьеров. Те методы, которые будут поддерживать достоверность изделий, учитываемых по договору, или предоставят дополнительные верификационные меры, повысят доверие к потенциальному будущему режиму сокращения вооружений. Можно надеяться, что будущие исследования таких методов продвинул прогресс в будущем договоре сокращения ядерных вооружений.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Части этой работы были поддержаны управлением исследований и разработок по нераспространению Министерства энергетики США, Агентства по уменьшению военной угрозы, и лабораторной программы исследований и разработок Тихоокеанской северо-западной национальной лаборатории. Авторы с благодарностью признают их поддержку. Работа, представленная в данной статье, была выполнена в Тихоокеанской северо-западной национальной лаборатории, управляемой компанией «Battelle» для Министерства энергетики США по контракту Министерства энергетики DE-AC06-76RLO-1830.

Части этой работы были написаны одним автором (Банч) при поддержке Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике по стипендии по технике и дипломатии во время работы в Государственном департаменте США. Автор также хотел бы выразить признательность за полезную поддержку и отзывы от Бюро контроля над вооружениями, верификации и соблюдения Государственного департамента США.

Авторы хотят поблагодарить д-ра Райена Мейера из Тихоокеанской северо-западной национальной лаборатории за его помощь в проведении измерений ультразвуковой канализированной волны обнаружения вмешательства.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. United Nations. Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons, 3 March 1970. UNTS 729, no. 10485.
2. Barack, Obama, "Remarks on Nuclear Weapons." Speech, Hradcany Square, Prague, Czech Republic, 5 April 2009.
3. United States. Treaty Between the United States of America and the Russian Federation on Measures for the Further Reduction and Limitation of Strategic Offensive Arms, 8 April 2010, pt. II, III.
4. K. D. Jarman, S. M. Robinson, B. S. McDonald, A. J. Gilbert, A. C. Misner, W. K. Pitts, T. A. White, A. Seifert, and E. A. Miller, Low-Intrusion Techniques and Sensitive Information Management for Warhead Counting and Verification, Pacific Northwest National Laboratory, *PNNL-20840*, Richland, WA, 2011.
5. J. Mihalcz, and J. Mullens, Nuclear Material Identification System with Imaging and Gamma-Ray Spectrometry for Plutonium, Highly Enriched Uranium, High Explosives, and Other Materials, Oak Ridge National Laboratory, *ORNL/TM-2012/22*, Oak Ridge, TN, 2012.
6. A. Glaser, B. Barak, and R. J. Goldston, "A New Approach to Nuclear Warhead Verification Using a Zero-Knowledge Protocol," 53rd Annual Institute of Nuclear Materials Management Meeting, Orlando, Florida, 4–18 July 2012.
7. G. K. White, Review of Prior US Attribute Measurement Systems, Lawrence Livermore National Laboratories,

- LLNL-CONF-563691, 2012.
8. R. T. Kouzes, "A Dictionary for Transparency," Pacific Northwest National Laboratory, PNNL-13723, 2001.
 9. Там же.
 10. D. D. Close, D. MacArthur, and N. Nicholas, Information Barriers – A Historical Perspective, Los Alamos National Laboratory, LA-UR-01-2180, 2001.
 11. J. Fuller, "Verification on the Road to Zero: Issues for Nuclear Warhead Dismantlement," *Arms Control Today* (2010): 40.
 12. D. G. Langner, S.-T. Hsue, D. W. MacArthur, N. J. Nicholas, R. Whiteson, T. B. Gosnell, Z. Koenig, J. Wolford, M. Aparo, I. Kulikov, J. Puckett, J. Whichello, R. Razinkov, A. Livke, and V. Poplavko, Attribute verification systems with information barriers for classified forms of plutonium in the Trilateral Initiative, Los Alamos National Laboratory, LA-UR-01-5567, 2001.
 13. U.S. International Security Advisory Board, W. J. Perry, Chairman, "Verification Measures – Near-Term Technical Steps," 6 November 2012.
 14. J. Benz, J. Tanner, and L. Duckworth, "Templating as a Chain of Custody Tool for Arms Control," 35th Annual Meeting, ESARDA Symposium, Bruges, Belgium, 28–30 May, 2013.
 15. F. M. Keel, S. Lamontagne, C. A. Pickett, and K. M. Tolk. "Preliminary Results from the 2010 INMM International Containment and Surveillance Workshop," International Workshop on Containment & Surveillance: Concepts for the 21st Century, Baltimore, Maryland 7–11 June 2010.
 16. J. C. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism* (Dover. ISBN 0-486-60637- 6, 1954).
 17. T. Uchimoto, T. Takagi, S. Konoplyuk, T. Abe, H. Huang, and M. Kurosawa, "Eddy Current Evaluation of Cast Irons for Material Characterization," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* (2003): 258–259, 493–496.
 18. D. Vasić, V. Bilas, and D. Ambruš, "Validation of a Coil Impedance Model for Simultaneous Measurement of Electromagnetic Properties and Inner Diameter of a Conductive Tube," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* (2006): 55, 337–342.
 19. D. Vasić, V. Bilas, and B. Šnajder, "Analytical Modelling in Low-Frequency Electromagnetic Measurements of Steel Casing Properties," *NDT & E International* (2007): 40, 103–111.
 20. H. E. Duckworth, *Electricity and Magnetism* (Holt, Rinehart and Winston, 1960), Chapter 14.
 21. K. J. Bunch, L. S. Williams, A. M. Jones, and P. Ramuhalli, "Electromagnetic Signature Technique as a Promising Tool to Verify Nuclear Weapons Storage and Dismantlement under a Nuclear Arms Control Regime," 53rd annual International Nuclear Materials Management Meeting, Orlando, Florida, July 2012.
 22. R. L. Hockey, and J. L. Fuller, "Electromagnetic Coil (EM Coil) Measurement Technique to Verify Presence of Metal/Absence of Oxide Attribute," Symposium on International Safeguards, October 29–November 2, 2001.
 23. R. L. Hockey, "Electromagnetic Coil Technology for Arms Control Applications," 42nd annual International Nuclear Materials Management Meeting, Indian Wells, California, July, 2001.
 24. A. M. Jones, K. J. Bunch, and P. M. Aker, "Simulation and Experimental Validation of Electromagnetic Signatures for Monitoring of Nuclear Material Storage Containers," *Journal of Nuclear Materials Management* (2012): 21.
 25. A. A. Rodríguez, J. Camaño, and A. Valli, "Inverse source problems for eddy current equations," *Inverse Problems* (2011): 28, 1–15.
 26. U.S. Army. *Technical Manual Nondestructive Inspection Methods, Basic Theory*. TM 1-1500-335-23, Table 4-4, 2007.
 27. U.S. Congress, Office of Technology Assessment, "Dismantling the Bomb and Managing the Nuclear Materials." OTA-O-572, 1993.
 28. O. Bukharin and H. M. Hunt, "The U.S.-Russian HEU Agreement: Internal Safeguards to Prevent Diversion of HEU," *Science & Global Security* (1994): 4, 189–212.
 29. United States, Agreement between the government of the United States of America and the government of the Russian Federation concerning the management and disposition of plutonium designated as no longer required for defense purposes and related cooperation. 2000 plutonium management and disposition agreement as amended by the 2010 protocol, Guidance Statement.
 30. Ibid., Annex on Quantities, Forms, Locations, and Methods of Disposition.
 31. Ibid., Annex on Monitoring and Inspection.
 32. U.S. Department of Energy. Stabilization, Packaging, and Storage of Plutonium- Bearing Materials, DOE-STD-3013-2012, 2012.
 33. L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, J. V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics* (4th Ed.), (John Wiley and Sons: New York, 2000).
 34. Y. -H. Pao, "Elastic Waves in Solids." *Transactions of the ASME* (1983): 50, 1152–1164.

35. K. Goebbels, *Materials Characterization for Process Control and Product Conformity* (CRC Press: Boca Raton, Florida, 1994).
36. R. B. Thompson, F. J. Margetan, P. Haldipur, L. Yu, A. Li, P. Panetta, and H. Wasan. 2008. "Scattering of Elastic Waves in Simple and Complex Polycrystals." *Wave Motion* 45(5): 655–674.
37. M. S. Good, N. H. Hansen, P. G. Heasler, H. A. Udem, J. L. Fuller, and J. R. Skorpik, "Intrinsic Signatures of Polymer-based, Fiber-reinforced Composite Structures: An Ultrasonic Approach," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation* (1994): 13, 863–870.