

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ В НОРМАХ БЕЗОПАСНОСТИ МАГАТЭ И РОССИИ ПРИ УПРАВЛЕНИИ СТАРЕНИЕМ КОНСТРУКЦИЙ, СИСТЕМ И ЭЛЕМЕНТОВ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

© 2021 г. В.М. Ушаков^{1,*}, С.Г. Евтушенко^{1,**}

¹Государственный научный центр АО «НПО «ЦНИИТМАШ»»,
Россия 115088 Москва, ул. Шарикоподшипниковская, 4
E-mail: *VMUshakov@cniitmash.com; **SGEvtushenko@cniitmash.com

Поступила в редакцию 03.11.2020; после доработки 17.11.2020
Принята к публикации 15.12.2020

Представлен аналитический обзор норм безопасности международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) и документов РФ в области управления ресурсом атомных станций. Показано значение неразрушающего контроля в системе управления старением конструкций, систем и элементов атомных станций. Отмечены проблемы управления старением, которые могут быть решены с помощью неразрушающего контроля. Отмечен системный подход обеспечения безопасности на всех жизненных этапах атомных станций: проектирование, конструирование, производство (изготовление), монтаж, эксплуатация (включая продление срока), реконструкция и вывод из эксплуатации.

Ключевые слова: атомная станция, безопасность, управление старением (ресурсом), неразрушающий контроль, конструкции, МАГАТЭ, системы и элементы атомных станций.

DOI: 10.31857/S013030822102007X

Безопасность атомных станций (зарубежных и на территории РФ) является приоритетной задачей на протяжении всего жизненного цикла от проектирования до вывода (включительно) из эксплуатации. МАГАТЭ (INTERNASIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY — далее IAEA) разрабатывает серию норм по безопасности с начала 90-х годов прошлого века. Особое значение придается проблеме управления старением конструкций, систем и элементов АС. В документах [1—9] МАГАТЭ (IAEA) рассмотрены вопросы управления старением конструкций, систем и элементов (КСЭ). В данной статье изложены результаты анализа и сравнения требований документов МАГАТЭ (IAEA) по управлению старением и аналогичных документов РФ в части применения неразрушающего контроля в решении указанной проблемы. Прежде всего, необходимо оценить основные понятия. Согласно [1], имеет место физическое и моральное старение КСЭ. Физическое старение — это общий процесс постепенного ухудшения во времени физических характеристик КСЭ вследствие механизмов деградации. Моральное старение КСЭ определяется развитием знаний и техники и связанных с этим изменением требований, норм и стандартов. Управление старением — это координация мероприятий, связанных с пониманием, обнаружением, предотвращением и смягчением эффектов старения КСЭ АС.

Согласно документам РФ по управлению старением (управлению ресурсом):

механизмы старения — процессы, приводящие к необратимым изменениям свойств конструкционных материалов при эксплуатации;

деградация — негативные структурные изменения конструкционных материалов или самих конструкций оборудования под воздействием механических нагрузок, температуры и /или окружающей среды;

старение — это процесс накопления во времени изменений механических и/или физических характеристик конструкционных материалов оборудования и трубопроводов;

ресурс — суммарная наработка оборудования и трубопроводов от начала их эксплуатации до момента времени, при котором наступит необратимое нарушение установленных нормативными документами условий прочности или работоспособности;

управление ресурсом — комплекс организационно-технических мероприятий, направленных на сохранение или уменьшение темпов выработки ресурса оборудования и трубопроводов в процессе их эксплуатации.

Управление старением действует в процессе ориентирования, технического обслуживания и понимания, надзора и испытаний (аттестация оборудования), эксплуатационного контроля и вывода из эксплуатации.

Нормы МАГАТЭ (IAEA) предписывают учет эффектов старения КСЭ, которые должны быть заключены на стадии проектирования АЭС. Одним из факторов обеспечения безопасности АЭС

является аттестация оборудования. В программе аттестации должны участвовать эффекты старения в течение ожидаемого срока службы узлов, важных для безопасности. Согласно [1], управление старением КСЭ в течение всего жизненного цикла АЭС (при проектировании, строительстве, вводе в эксплуатацию (в том числе продленной) и выводе из эксплуатации следует осуществлять с предвидением и прогнозированием (п. 3.1), опираясь на опыт других АЭС и отраслей промышленности, а также учитывая результаты полученных исследований и разработок (п. 3.3в). Управление старением предполагает выявление значительных эффектов старения и деградации металла с использованием контроля (в том числе неразрушающего) конструкций или элементов. В п. 4.36 документа [1] указано: «следует разработать и ввести перечень или базу данных результатов неразрушающего контроля при выявлении, определении характеристик и анализа тенденций деградации конструкций или элементов; база данных должна обеспечивать техническую базу для выводов и заключений для принятия решений по управлению старением». Для реализации процесса управления старением разрабатывается программа управления старением, в которой следует определить методы обнаружения (включая неразрушающие методы), мониторинга, предотвращения и смягчения последствий старения и механизмов деградации для каждой конструкции или элемента.

Для выполнения корректирующих действий в рамках управления старением следует установить критерии допустимости (нормы оценки) для контроля и мониторинга эффектов старения (п. 5.47 в документе [1]). Нормы оценки неразрушающего контроля согласно Российским документам задаются в правилах контроля, в технических условиях, стандартах, конструкторской документации или иных аналогичных документах на стадии проектирования (конструирования) оборудования, трубопроводов или иных элементов АЭС. В документе МАГАТЭ [2] описаны меры по реализации безопасности АЭС при проектировании. Управление старением (п. 31 в [2]) по управлению старением закладывается при проектировании и является обязательным на всех стадиях жизненного цикла АЭС.

В документе [3] указывается, что МАГАТЭ (IAEA) начало осуществлять свою программу по нормам безопасности с 1958 года. Значение и необходимость строжайшего выполнения норм безопасности усилились после аварии на АЭС «Фукусима-дайити» (Япония). Был разработан План действий МАГАТЭ (IAEA) по ядерной безопасности, который был утвержден Советом управляющих и одобрен Генеральной конференцией МАГАТЭ (IAEA) в сентябре 2011 г. Комиссия по нормам безопасности одобрила предложение о пересмотре, внесении изменений действующих Норм безопасности. Нормы МАГАТЭ (IAEA) представляют собой новую редакцию с учетом изменений, внесённых в ранее действующие нормы № NS-R-2 (выпущенных в 2003 г.). В [3] изложены обязанности эксплуатирующей организации АЭС (главная ответственность эксплуатирующей организации (ЭО) — это безопасность АЭС). Безопасность включает анализ совокупных последствий эффектов старения с учетом действующих национальных и международных норм (п.4.44 в [3]). Управление старением осуществляется на основе программы управления старением (ПУС). Нормы [3] рекомендуют использовать системный подход в разработке, реализации и непрерывном совершенствовании ПУС. В качестве части ПУС проводятся оценка и анализ температурных и радиационных условий, эффектов коррозии и других ухудшений параметров, влияющих на долговременную надежность оборудования или конструкций АЭС (п. 4.51 в [3]). В рамках реализации ПУС может быть использован неразрушающий контроль.

В руководстве по безопасности [4] описаны процедуры по техническому обслуживанию, надзору и инспекции (ТОНИИ) при эксплуатации АЭС. ТОНИИ предполагает получение исходных данных для конструкций, элементов и компонентов до эксплуатации АЭС как основу для сравнения при последующих проверках во время эксплуатации. Данное положение касается и неразрушающего контроля, т.к. НК является частью программы ТОНИИ. В программе рекомендуется использование новых подходов в деятельности ТОНИИ, в т.ч. применение неразрушающих испытаний (см. п. 3.4): «выборочный контроль и оценка результатов программы ТОНИИ (...включая неразрушающие испытания...), рассмотрение предложений о новых подходах к деятельности ТОНИИ (т.е. ориентированное на надежность техобслуживание...или новые методы неразрушающих испытаний)». Данное положение соответствует общей концепции норм безопасности МАГАТЭ (IAEA), которая предполагает поиск новых решений с целью повышения безопасности и базируется на опыте эксплуатации АЭС и результатов научных исследований, в том числе и в области неразрушающего контроля конструкций, систем и компонентов АЭС. В документе [4] (п. 10.17 и 10.18) отмечена необходимость применения визуального и измерительного контроля (включая телевизионного), капиллярного, магнитопорошкового, вихретокового, ультразвукового, радиографического, а также электроконтактного метода. Следует подчеркнуть, что согласно документам РФ, действующим в системе оценки соответствия в области использования атомной энергии, электроконтактный метод не относится к мето-

дам неразрушающего контроля, обязательным к применению для оборудования и трубопроводов АЭС России. Метод электроконтактной потенциометрии получил развитие в РФ (см., например, [19, 20]), поэтому становится актуальным вопрос возможности внесения указанного метода в список методов неразрушающего контроля, обязательных к применению на АЭС. В п. 10.35 норм безопасности [4] МАГАТЭ (IAEA) указывается на необходимость дополнительного обследования выявленных дефектов, превышающих критерии приемки, другими неразрушающими методами и методиками для установления характера дефектов (размер, форма и ориентация). В настоящее время бурное развитие получили ультразвуковые методы оценки типа (вида) дефектов, их размера, ориентации, основанные на применении фазированных решеток, дифракционно-временной метод (TOFD—time-of-flight-diffraction) и др. К сожалению, в нормативных документах России [15—16] или других по управлению старением (управлению ресурсом АЭС) нет рекомендации, аналогичной данному п. 10.35 [4] или документу [5]. Отсутствует, например, нормативный документ по применению TOFD-метода, хотя за рубежом такой документ действует с 1993 г., впервые разработанный в Британии [21] и введенный в документы серии EN.

В документе [6] рассмотрены 14 фактов безопасности АЭС, среди которых 4-й – управление старением. Указанные факторы должны учитываться при периодическом анализе безопасности (ПАБ). Исходные данные металла оборудования, его основные характеристики, параметры и результаты НК рекомендуется ввести в базовые документы при ПАБ. Базовые документы должны быть подготовлены к моменту ввода АЭС в эксплуатацию (до загрузки топлива). Программа управления старением должна обеспечить своевременное обнаружение и прогноз деградации в результате старения. При этом «следует проверить, достигается ли эффективный контроль в деградации вследствие старения за счет систематического управления старением...» (п. 5.50). В этом процессе, безусловно, имеется место для неразрушающего контроля (см. п. 4.36 документа [1]).

В нормах безопасности [7] дана классификация конструкции, систем и компонентов атомных электростанций с точки зрения их влияния на безопасность. Испытания и контроль при изготовлении КСК должны гарантировать, что КСК не имеет дефектов, способных привести к разрушению или ускорению старения. При эксплуатации КСК важных для безопасности на основе программы управления старением при систематическом подходе и на основе комплексных мероприятий, в т.ч. с использованием неразрушающего контроля, должны выполняться требования документов IAEA, структурированных согласно рис. 1 [7]. Опыт применения руководства по безопасности [5] по управлению старением АЭС обобщен и использован при разработке документа [1], введенного взамен [5] в 2018 г.

В справочнике МАГАТЭ [8] представлена терминология по безопасности АЭС. Библиографические списки в документах МАГАТЭ показывают, что МАГАТЭ регулярно выпускает документы серии «Безопасность АЭС», начиная с 1992 г.

Обобщенный международный опыт управления старением (IGBLL) на основе указанных документов показан в [9], в котором есть сборник проверенных на практике программ управления старением (ПУС), разработанных и внедренных в странах-членах IAEA на реакторных энергетических установках аналогичных ВВЭР (водо-водяной энергетический реактор) в России. Публикация [9] содержит общий образец анализа управления старением, сборник проверенных ПУС, сборник типовых анализов ограниченного во времени старения. Подчеркивается, что ПУС охватывает не только оборудование АЭС, но и механические, электрические и контрольно-измерительные элементы. Приводятся примеры соответствующих таблиц. Делается упор на системное управление старением, что означает обеспечение необходимых функций безопасности в течение всего срока эксплуатации АЭС и вывода из эксплуатации.

Программа управления старения охватывает конкретные механизмы старения (коррозию, коррозионное растрескивание под напряжением, термическое и радиационное старение). ПУС используется для конкретной конструкции, элемента или компонента АЭС. Эффективная ПУС включает техническое обслуживание, эксплуатационный контроль, испытания и надзор.

В публикации [9] указывается на различный подход ПУС в различных странах-членах IAEA, деятельность которых регламентируется национальными и международными нормами по безопасности АЭС.

В некоторых государствах-членах IAEA, таких как США, управление старением сосредоточено на пассивных КСЭ. В других странах управление старением охватывает активные и пассивные КСЭ, но в любом случае необходим обмен опытом эксплуатации и результатам научных исследований и разработок, направленных на обеспечение безопасности АЭС.

Также как и нормы IAEA, документы РФ [10—14] по управлению старением направлены на обеспечение безопасности. В документах РФ вместо термина «управление старением» исполь-

зуется — «управление ресурсом АЭС», а вместо «конструкции, системы, элементы (компоненты)» — «оборудование, трубопровода или элементы АЭС». В федеральных нормах и правилах [10] (п. 8) в частности указывается, что «управление ресурсом должно основываться на:

- а) соблюдении федеральных норм и правил;
- б) поддержании оборудования и трубопроводов АС в исправном состоянии ... путем выявления повреждений ...;
- в) установлении механизмов образования и развития дефектов ...;
- г) выявлении доминирующих механизмов старения, деградации и повреждений оборудования и трубопроводов ...;
- д) постоянном совершенствовании мониторинга процессов старения, деградации и повреждений» и другие.

Для реализации требований п. 8 документа [10], а в правилах [15] так же, как в нормах МАГАТЭ по безопасности [1—9], управление ресурсом закладывают при проектировании (конструировании) оборудования и трубопроводов реакторных установок АС, в т. ч. и требования по неразрушающему контролю. При производстве (изготовлении) и монтаже оборудования и трубопроводов в обязательном порядке они подлежат неразрушающему контролю согласно системы оценки соответствия в области использования атомной энергии. Правила контроля содержат сведения для осуществления неразрушающего контроля основного металла, сварных соединений, наплавов и др., а именно: объем и методы неразрушающего контроля, нормы оценки качества по результатам неразрушающего контроля (см. например, [16]).

Требования и содержание программы управления старением согласно [10] в целом соответствует аналогичным требованиям документов МАГАТЭ (IAEA) (см., например, п. 11—13, 20—22 в [10]). Из документа [10] также следует, что эксплуатационные неразрушающий контроль на АС является составной частью программы управления ресурсом АС. Типовые и рабочие программы эксплуатационного неразрушающего контроля (ЭНК) должны соответствовать программе управления ресурсом. Результаты научных исследований (п. 20 в [10]) по неразрушающему контролю вполне могут быть использованы для «проведения мониторинга прогнозирования деградации оборудования и трубопроводов...», чтобы «обеспечить выявление механизмов деградации на ранней стадии их проявления...» (см. п. 33 в [10]).

В руководстве по безопасности [11] представлены критерии оценки технического состояния при управлении ресурсом оборудования и трубопроводов атомных станций. Подчеркивается, что «выявление доминирующих (определяющих) механизмов старения, деградации и повреждений оборудования и трубопроводов» является неотъемлемой частью программы управления ресурсом. В документе [11] аналогично нормам по безопасности IAEA система управления старением (ресурсом) рекомендуется при проектировании, конструировании, производстве (изготовлении), сооружении (включая монтаж, наладку, ввод в эксплуатацию, реконструкцию, ремонт), эксплуатации и выводе из эксплуатации. В приложении 4 документа [11] дан примерный перечень параметров для определения ресурсных характеристик, а в приложении 5 — примерный перечень критериев оценки ресурса оборудования и трубопроводов АС, работающих под давлением. Неразрушающий контроль может быть использован для оценки «качественного изменения структуры металла, приводящего к появлению новых механизмов его деградации...», п. 9 приложения 4 (или 5) в [11]. Общую и локальную толщину стенки (п. 2 и 3 приложения 5) оценивают с применением УЗ толщинометрии. Рекомендуется определить «качественные изменения структуры металла» (п. 10, приложение 5). Обзор, представленный в статье [17], показал, что для указанной цели допустимо применение неразрушающих методов контроля (акустических, электромагнитных, электрических). Такой подход позволит реализовать рекомендации [11] по мониторингу ресурсных характеристик оборудования и трубопроводов АС (см. приложение 5, п. 10 и 11 [11]).

Общую и локальную толщину стенок оборудования трубопроводов АС измеряют при проведении планово-предупредительных работ. В практике УЗ толщинометрии отмечаются существенные трудности. Имеются случаи невозможности выполнения измерений толщины из-за отсутствия донного эхосигнала от внутренней поверхности объекта контроля, т.к. величина сигнала зависит от толщины отложений и отражающих свойств этих отложений.

Определение коррозионного (эрозионного - коррозионного) износа стенки объекта контроля становится затруднительным или невозможным. Решения указанной задачи изложена в методике [18]. Однако статистические данные по эффективности применения технологии фазированных решеток по измерению профиля контролируемой внутренней поверхности отсутствуют.

В ГОСТе [12] указывается, что управление старением основывается на «установлении механизмов образования и роста дефектов, способных привести к разрушению или отказу элементов,

выявлении доминирующих (определяющих) механизмов старения, деградации и проведении элементов и др. (п. 5.3). В изучении указанных процессов может быть успешно использован неразрушающий контроль. В п. 5.5 [12]: «способы мониторинга направлены на сдерживание деградации элементов в рамках контроля технического состояния» на основе «выявления деградации элементов посредством входного и эксплуатационного контроля, посредством технического освидетельствования, проверок, испытаний, ... вибрационного контроля и технического диагностирования». Таким образом, существующая на АС и успешно действующая система входного, эксплуатационного контроля, технического диагностирования является составной частью управления ресурсом (старения) элементов блока АС. При этом «рабочие программы эксплуатационного неразрушающего контроля ... должны учитывать требования программы управления старением» (п. 8.10 в [12]).

В руководствах по безопасности [13, 14] рассмотрены вопросы мониторинга ресурсных характеристик применительно к арматуре и насосам АС. В приложении 6 документа [13] даны рекомендуемые методы мониторинга ресурсных характеристик арматуры. Для определения общей и локальной толщины стенки корпуса или других элементов арматуры рекомендуется УЗ толщинометрия, визуальный и измерительный контроль. Это прямое применение методов неразрушающего контроля. Косвенным образом неразрушающий контроль может быть использован в качестве экспериментального метода оценки накопительного усталостного повреждения металла, качественных изменений структуры металла, приводящих к его деградации и ускоренному истощению ресурса арматуры, а также необратимых изменений технических характеристик арматуры вследствие отложений, износа элементов арматуры (см. 4, 10 и 13 приложения 6 в [13]).

Аналогичный подход в части применения неразрушающего контроля в процессе мониторинга ресурсных характеристик возможен и для насосов атомных станций (см. п. 1, 2, 10 и 15 приложения 6 руководства [14]).

Оценивая содержание документов ИАЕА [1—9] и РФ [10—16], в целом можно утверждать, что в них прослеживается системный подход управления старением, составной частью которой является применение НК на всех этапах жизненного цикла АС: проектирование, конструирование, производство, ввод в эксплуатацию, эксплуатация и вывод из эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Безопасность атомных станций является приоритетной задачей. Управления старением, которому уделяется особое внимание, есть один из важнейших элементов — факторов безопасности.

2. Системный подход в реализации управлением старением прослеживается и в нормах безопасности МАГАТЭ, и в документах РФ (Россия является полноправным членом стран, входящих в МАГАТЭ).

3. Согласно нормам безопасности МАГАТЭ (ИАЕА) и документам РФ неразрушающий контроль включен в систему управления старением (ресурсам) АС на всех этапах: проектирование (конструирование), монтаж, эксплуатация, реконструкция (модернизация) и вывод из эксплуатации.

4. Эффективно действующую в атомной энергетике систему обеспечения безопасности (включая управление старением АС) предлагается распространить при поддержке Правительства РФ на все отрасли промышленности России, в которых эксплуатируются потенциально-опасные объекты (нефте- и газопроводы, теплоэнергетическое оборудование тепловых и гидроэлектростанций, резервуары и сосуды, работающие под давлением и многое другое). Например, в работе [22] показано необходимость применения НК на магистральных газонефтепроводах из-за большого количества аварий.

5. В документах МАГАТЭ и РФ прослеживается тенденция расширения функций НК от классического подхода по обнаружению, оценке допустимости несплошностей (дефектов) по результатам НК к применению НК для мониторинга процессов деградации, старения металла оборудования, трубопроводов и иных элементов АС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IAEA, Ageing Management and Development of a programme for Long Term Operation of Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards, Specific Safety Guide Series No. SSG-48, Vienna, 2018.
2. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Safety of Nuclear Power Plants: Desingu, IAEA Safety Standards Series No. SSR-2/1 (Rev. 1), IAEA, Vienna, 2016.

3. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Safety of Nuclear Power Plants: Commissioning and Operation, IAEA Safety Standards Series No. SSR-2/2 (Rev. 1), IAEA, Vienna, 2016.
4. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Maintenance, Surveillance and in-service inspection in Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. NS-G-2.6, IAEA, Vienna, 2002.
5. IAEA, Aging Management for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. NS-G-2.12, Vienna, 2009.
6. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Periodic Safety Review for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. SSG-25, IAEA, Vienna, 2016.
7. IAEA, Safety Classification of Structures, Systems and Components in Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Guide Series No. SSG-30, IAEA, Vienna, 2014.
8. IAEA, Terminology Used in Nuclear Safety and radiation protection, IAEA Safety Glossary, Vienna, 2019.
9. IAEA, Aging Management for Nuclear Power Plants: International Generic Ageing Lessons Learned (IGALL), Safety Reports Series, No. 82. Vienna, 2015.
10. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Требования к управлению ресурсом оборудования и трубопроводов атомных станций. Основные положения. НП-096-15/научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности. М. 2015. 18 с.
11. Управление и методы мониторинга ресурсных характеристик работающих под давлением оборудования и трубопроводов атомных станций. РБ-132-17. М.: НТЦ ЯРБ, 2017. 23 с.
12. ГОСТ Р 58341.1—2019. Элемент блока атомной станции. Порядок управления ресурсом. М.: Стандартинформ, 2019. 28 с.
13. Ростехнадзор. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Установление и методы мониторинга ресурсных характеристик арматуры атомных станций». М. 21 с.
14. Ростехнадзор. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Установление и методы мониторинга ресурсных характеристик насосов атомных станций». РБ-131-17. М. 2017. 22 с.
15. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок». НП-089-15. М. 2015.
16. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Правила контроля металла оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок при изготовлении и монтаже». НП-105-28. М. 2018.
17. Ушаков В.М., Евтушенко С.Г., Жуков А.Д., Юречко А.С. Неразрушающий контроль в управлении старением металла оборудования и трубопроводов атомных станций. Обзор // Контроль. Диагностика. 2020. № 5. С. 6—18. [Ushakov V.M., Evtushenko S.G., Zhukov A.D., Yurechko A.S. The Non-Destructive Testing for Aging Management of Equipment and Pipelines at Nuclear Power Plants. Review // Kontrol. Diagnostika (Testing. Diagnostics) 2020. V. 23. No 5. P. 6—18.]
18. АО «Концерн «Росэнергоатом». Сплошная ультразвуковая толщинометрия металла сварных соединений с применением фазированных решеток. Методика МТ 1.2.1.15.001.1087-2015. М. 2015.
19. Surin V. New potential for potentiometry // Nuclear Engineering International. 2018. 63 (765). P. 30—32.
20. Сурин В.И., Зорина Т.Н., Коротин А.Ф. Поверхностная потенциометрия материалов при длительных усталостных испытаниях / Научная сессия НИЯУ МИФИ-2010. Т. 2. Нанотехнологии. Фундаментальные проблемы науки. М.: НИЯУ МИФИ, 2010. С. 344.
21. Guide to Calibration and Setting up of the ultrasonic time of flight diffraction (TOFD) technique for the detection. Location and sizing of flaws. BS 7706: 1993.
22. Алешин Н.П. Возможность методов неразрушающего контроля при оценке напряженно-деформированного состояния нагруженных металлоконструкций // Сварка и Диагностика. 2011. № 6. С. 44—47.