

5. Усовершенствование мониторинга качества воды по содержанию тяжелых металлов в системах технического водоснабжения АЭС Украины. Этап 2. Разработка схемы нодализации системы технического водоснабжения ЗАЭС. Вывод зависимостей многолетней и сезонной динамики концентраций тяжелых металлов в воде системы технического водоснабжения: Отчет ОП НТЦ ГП НАЭК «Энергоатом». – 2011. – 100 с.

6. *Беженар Р.В.* Адаптация трехмерной численной модели «ТРИТОКС» для прогнозирования гидротермического режима водоема-охладителя Запорожской АЭС / Р.В. Беженар, В.А. Мороз, Н.А. Мороз // Промышленная теплотехника. – 2013. – Т. 35. – № 3. – С. 30 - 38.

7. *Мороз В.А.* Разработка комплекса математических моделей прогноза гидрохимического состояния системы технического водоснабжения АЭС / В.А. Мороз, Н.А. Мороз, Л.И. Лавриненко, В.С. Кресин // Зб. наук. пр. СНУЯЕтаП. – Севастополь: СНУЯЭиП, 2013. – Вып. 2 (46). – С. 45 – 51.

8. *Караушев А.В.* Теория и методы расчета речных наносов / А.В. Караушев. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 271 с.

Надійшла до редакції 05.09.2013 р.

УДК 658.562.5:621.311.25

АНАЛИЗ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ НА АЭС

**А.А. Скидан, к.т.н., доц., Н.И. Кузнецова, доц., Н.В. Серова-Нашева, к.т.н.,
Т.Н. Шлай, студ.**

Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности

Рассмотрены методы неразрушающего контроля (МНК) различных материалов, применяемых на атомных электростанциях. Приведена подробная классификация каждого вида применяемой на энергообъектах дефектоскопии. Произведен анализ МНК по следующим критериям: стоимость, опасность для здоровья, возможность дистанционного контроля (автоматизации), применяемость на АЭС, представлены возможности комплексного контроля несколькими методами одновременно. Проведенные исследования дали возможность аккумулировать имеющиеся сведения о каждом методе и путем оценивания каждого из них представить их эффективность в зависимости от исследуемого материала. Представленные в табличной форме результаты помогут быстро и главное с большой степенью точности подобрать необходимый МНК в зависимости от конкретных условий. Проанализированы основные достоинства, а также выделены очевидные недостатки дефектоскопии, что также позволяет более полно оценить возможность и, главное, эффективность ее применения.

Введение

Проблема обеспечения максимально возможного срока службы, "замедления" старения энергетических систем, продления их сроков эксплуатации в условиях жестко ограниченных средств (финансовых возможностей, технических, человеческих ресурсов и др.) является одной из наиболее актуальных проблем для ученых, экономистов и технических специалистов различных стран. Последствия возникновения отказов, неисправностей или дефектов в таких системах могут приводить к трагическим последст-

виям: глобальным катастрофам, поражению окружающей среды, человеческим жертвам, большим финансовым и материальным потерям. В связи с этим в настоящее время актуальными являются вопросы повышения надежности оборудования АЭС и, следовательно, безопасности атомной энергетики в целом [1 - 5].

Важными критериями высокого качества деталей и составных частей оборудования являются физические, геометрические и функциональные показатели, а также технологические признаки качества, в частности, отсутствие недопустимых дефектов; соответствие физико-механических свойств и структуры основного материала и покрытия; соответствие геометрических размеров и чистоты обработки поверхности требуемым нормативам и т.п.

Дефекты носят самый разнообразный характер и своевременность их обнаружения часто довольно затруднительна. Одним из путей предотвращения нежелательных последствий от эксплуатации изделий с дефектами является систематическое использование методов неразрушающего контроля.

Широкое применение неразрушающих методов контроля, не требующих вырезки образцов или разрушения объектов исследования (в отличие от разрушающих), позволяет избежать больших потерь времени и материальных затрат, обеспечить частичную или полную автоматизацию операций контроля при одновременном значительном повышении качества и надежности контролируемого оборудования.

В большинстве публикаций, посвященных методам неразрушающего контроля, приводятся различные методы и их сравнение. Однако в данной работе проводится сравнение методов в целях их комплексного применения, что позволит исключить недостатки одного метода, взаимодополнить методы и реализовать тем самым принцип "избыточности" для повышения надежности контроля систем и агрегатов.

Постановка цели и задач научного исследования

Целью данной научной работы является оценка методов на основе анализа МНК материалов, применяемых на АЭС.

Для достижения поставленной цели необходимо рассмотреть каждый из видов дефектоскопии в отдельности и отметить преимущества и недостатки их самостоятельного и комплексного использования на производстве.

Решение поставленной задачи

Решение поставленной задачи необходимо начинать с рассмотрения конкретных МНК и их особенностей.

Неразрушающий контроль, в зависимости от физических явлений, положенных в его основу, подразделяется на следующие виды:

- 1) оптический;
- 2) капиллярный (или проникающими веществами);
- 3) магнитный;
- 4) электрический;
- 5) вихрековый;
- 6) радиоволновой;
- 7) тепловой;
- 8) акустический;
- 9) радиационный [1].

В свою очередь каждый вид подразделяется на множество методов. Количество их постоянно растет. И следовательно, классификации принимают разнообразный характер.

Рассмотрим вкратце принципы действия каждого отдельного МНК.

Оптические методы основаны на наблюдении или регистрации параметров оптического излучения, взаимодействующего с контролируемым объектом (рис. 1).



Рис. 1. Оптический метод

По виду приемника лучистой энергии различают:

- визуальные (лупы, микроскопы, линейки и т.д.);
- детекторные (хим. реагенты, фотоэмульсии и т.д.);
- комбинированные.

По виду излучения:

- а) собственного;
- б) отраженного;
- в) прошедшего.

Сущность *капиллярных методов* заключается в наблюдении проникновения специальных веществ в полости дефектов контролируемого объекта (рис. 2).

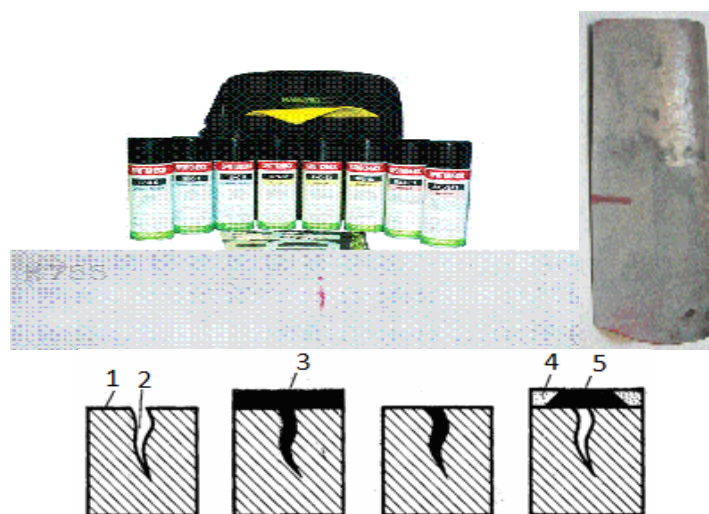


Рис. 2. Капиллярный метод: 1 – поверхность; 2 – дефект; 3 – пенетрант; 4 – проявитель; 5 – следы индикации (признак дефекта)

В зависимости от применяемых индикаторов различают следующие виды дефектоскопии:

- цветная;
- люминесцентная;
- люминесцентно-цветная.

Как подвид выделяется метод течеискания (капиллярное прохождение индикаторной жидкости через сквозной объект).

Магнитные методы основаны на регистрации магнитных полей рассеяния, возникающих над дефектами, или на определении магнитных свойств контролируемых изделий (рис. 3). Различают методы: магнитопорошковый; магнитографический; феррозондовый; индукционный.

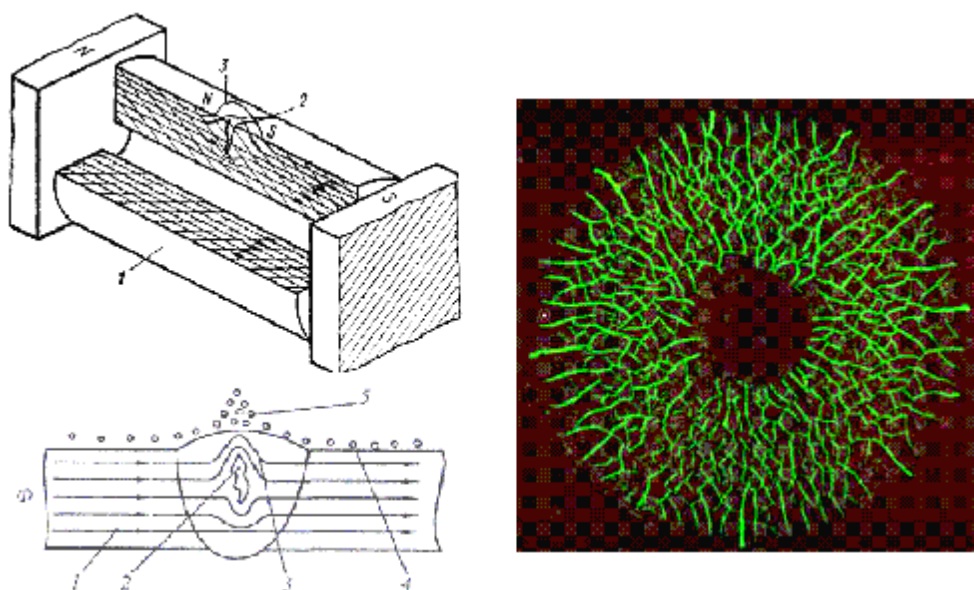


Рис. 3. Схема образования магнитного поля над дефектом: 1 – контролируемая деталь; 2 – трещина; 3 – магнитное поле рассеяния

Электрические методы характеризуются регистрацией параметров электрического поля, взаимодействующего с контролируемым объектом, или поля, возникающего в контролируемом объекте в результате внешнего воздействия.

Различают следующие методы:

- электропотенциальный;
- емкостной (контроль полупроводников и диэлектриков);
- термоэлектрический (контроль химического состава материала);
- электронной эмиссии;
- электроискровой;
- электростатического порошка (метод схож с магнитопорошковым).

Вихрековые методы основаны на анализе взаимодействия электромагнитного поля вихрекового преобразователя с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в контролируемом объекте.

Выделяются основные методы:

- а) прохождения;
- б) отраженного излучения.

Сущность *радиоволновых методов* заключается в регистрации изменений параметров электромагнитных волн радиодиапазона, взаимодействующих с контролируемым объектом.

По характеру взаимодействия объекта с волной различают методы:

- прохождения;
- отражения;
- рассеивания;
- резонансный.

Тепловые методы основаны на регистрации изменений тепловых или температурных полей контролируемых объектов.

По характеру взаимодействия поля с контролируемым объектом выделяют:

- активный;
- пассивный.

Акустические методы имеют в своем основании регистрацию параметров упругих волн, возникающих или возбуждаемых в объекте (рис. 4).



Рис. 4. Акустический метод

Различают следующие методы.

По используемой частоте:

- ультразвуковые (волны с частотой колебаний > 20 кГц);
- обычных частот.

По характеру взаимодействия с объектом:

- активные (эхометод, теневой, зеркально-теневой, эхосквозной, ультразвуковой);
- пассивные (вибрационный, акустической эмиссии и т.д.).

Принцип действия *радиационных методов* основывается на регистрации и анализе проникающего ионизирующего излучения после взаимодействия его с контролируемым объектом. Выделяют следующие методы.

По характеру взаимодействия с веществом: прохождения; отражения.

В зависимости от природы ионизирующего излучения различают:

- рентгеновский;
- гамма;
- бета;
- нейтронное;
- жесткое тормозное (от ускорителя \bar{e} -бетатрона, линейного ускорителя).

По используемому приемнику излучения (ПИ):

- радиографический (ПИ–рентгеновская пленка);

– радиометрический (ПИ–сканирующий сцинтилляционный счетчик частиц и фотонов);

– радиоскопический (ПИ–флюоресцирующий экран с последующим преобразованием изображения в телевизионное).

На рис. 5 представлены наиболее распространенные методы контроля основного оборудования на АЭС.



Рис. 5. Наиболее распространенные методы контроля основного оборудования на АЭС

Преимущества неразрушающих методов контроля:

1. Испытания проводятся непосредственно на изделиях, которые будут применяться в рабочих условиях.

2. Испытания можно проводить на любой детали, предназначенной для работы в реальных условиях, если это экономически обосновано. Эти испытания можно проводить даже тогда, когда в партии имеется большое различие между деталями.

3. Испытания можно проводить на целой детали или на всех ее опасных участках. Многие опасные с точки зрения эксплуатационной надежности участки детали могут быть исследованы одновременно или последовательно, в зависимости от удобства и целесообразности.

4. Могут быть проведены испытания многими НМК, каждый из которых чувствителен к различным свойствам или частям материала или детали. Таким образом, имеется возможность измерить столько различных свойств, связанных с рабочими условиями, сколько необходимо.

5. Неразрушающие методы контроля часто можно применять к детали в рабочих условиях, без прекращения работы, кроме обычного ремонта или периодов простоя. Они не нарушают и не изменяют характеристик рабочих деталей.

6. Неразрушающие методы контроля позволяют применить повторный контроль данных деталей в течение любого периода времени. Таким образом, степень повреждений в процессе эксплуатации, если ее можно обнаружить, и ее связь с разрушением в процессе эксплуатации могут быть точно установлены.

7. При неразрушающих методах испытаний детали, изготовленные из дорогостоящего материала, не выходят из строя при контроле. Возможны повторные испытания во время производства или эксплуатации, когда они экономически и практически оправданы.

8. При неразрушающих методах испытаний требуется небольшая (или совсем не требуется) предварительная обработка образцов. Некоторые устройства для испытаний являются портативными, обладают высоким быстродействием, в ряде случаев контроль может быть полностью автоматизированным. Стоимость НМК ниже, чем соответствующая стоимость разрушающих методов контроля.

9. Большинство неразрушающих методов испытания кратковременны и требуют меньшей затраты человеко-часов, чем типичные разрушающие методы испытаний. Эти методы можно использовать для контроля всех деталей при меньшей стоимости или стоимости, сопоставимой со стоимостью разрушающих методов испытаний лишь небольшого процента деталей в целой партии.

Несмотря на перечисленные выше преимущества, существуют и *недостатки неразрушающих методов контроля*:

1. Испытания обычно включают в себя косвенные измерения свойств, не имеющих непосредственного значения при эксплуатации. Связь между этими измерениями и эксплуатационной надежностью должна быть доказана другими способами.

2. Испытания обычно качественные и редко - количественные. Обычно они не дают возможности измерения разрушающих нагрузок и срока службы до разрушения даже косвенно. Они могут, однако, обнаружить дефект или проследить процесс разрушения.

3. Обычно требуются исследования на специальных образцах и исследование рабочих условий для интерпретации результатов испытания. Там, где соответствующая связь не была доказана, и в случаях, когда возможности методики ограничены, наблюдатели могут не согласиться в оценке результатов испытаний.

Эффективность комплексного применения методов НК. Эффективность методов неразрушающего контроля определяется большим числом факторов, главными из которых являются выявляемость дефектов, производительность, оперативность, безопасность и стоимость.

В зависимости от материалов, видов изделий и их назначения различные методы контроля имеют разную эффективность.

В таблице представим эффективность МНК в зависимости от их способности выявлять дефекты в различных материалах.

Для лучшего визуального восприятия примем следующую систему оценивания методов: 5 – отлично; 4 – хорошо; 3 – удовлетворительно; 0 – неудовлетворительно.

Как видно из таблицы, различные методы НК характеризуются разными значениями технико-экономических параметров: чувствительностью, условиями применения, типами контролируемых объектов и т.д.

С точки зрения опасности для обслуживающего персонала выделяются радиационные методы. Определенной токсичностью обладают методы капиллярные и теческанием. Остальные методы не оказывают заметного влияния на здоровье обслуживающего персонала [2].

Для автоматизации контроля наиболее благоприятны методы вихревого тока, магнитные методы, радиационный и некоторые виды тепловой дефектоскопии. Главные преимущества этих методов заключаются в отсутствии прямого контакта преобразователя с изделием и в предоставлении информации о дефектах в виде показаний приборов. Ультразвуковой метод с этой точки зрения требует контакта преобразователя с изделием, например, через слой воды. Трудность автоматизации других методов контроля заключается в необходимости визуальной обработки информации о дефектах.

**Эффективность НК в зависимости от их способности выявлять дефекты
в различных материалах**

Объекты контроля	Вид НК							
	Радиационный	Акустический	Вихрековый	Магнитный	Капиллярный	Тепловой	Оптический	Радиоволновой
<i>Неферромагнитные материалы</i>								
Проволока диаметром 1-14 мм	4	5	5	0	0	0	4	0
Прутки диаметром 30-100 мм	5	5	5	0	0	4	4	0
Трубы диаметром 30-156 мм	5	5	5	0	0	4	4	0
Листы, плиты толщиной 0,1–3,9 мм	5	5	5	0	0	4	4	0
Отливки	5	4	3	0	0	4	4	0
Металлургические заготовки	5	4	0	0	3	4	4	0
<i>Ферромагнитные материалы</i>								
Прутки диаметром 30-100 мм	5	5	5	5	0	0	5	0
Трубы сварные диаметром 30-156 мм	5	5	5	4	4	0	4	0
Листы, плиты толщиной 0,1–3,9 мм	5	5	5	4	4	0	4	0
Отливки	5	4	0	4	4	0	4	0

Окончание таблицы 1

<i>Диэлектрики</i>								
Резина	5	4	0	0	4	0	4	5
Керамика	5	4	0	0	4	3	4	5
Многослойные материалы	4	5	0	0	0	3	0	5
Бетон, железобетон	5	3	0	0	4	0	4	5
Стеклопластики	3	4	0	0	5	5	5	5
<i>Соединения</i>								
Сварные	5	5	3	5	4	3	0	0
Полные	5	5	3	0	3	3	0	0
Резбовые	0	0	3	5	4	0	0	0

По стоимости выполнения контроля к наиболее дорогим относятся методы радиографические и течеискания. Это связано с длительностью операций контроля, а также с необходимостью капитальных затрат на помещения и оборудование. Если сравнивать, например, затраты на проведение радиационного и ультразвукового контроля сварных соединений толщиной 10...20 мм, то для ультразвукового контроля они будут в 3 - 5 раз меньше, чем для радиационного. Это преимущество возрастает с увеличением толщины сварных соединений.

Визуальные и капиллярные методы контроля изделий из ферромагнитных материалов позволяют обнаруживать дефекты только на поверхности изделия. Магнитными и токовихревыми методами можно обнаружить как поверхностные, так и подповерхностные дефекты. Радиационными и акустическими методами можно обнаружить поверхностные, подповерхностные и внутренние дефекты.

Наибольшее распространение на АЭС получили визуальный, капиллярный, вихрековый, ультразвуковой, радиографический, магнитопорошковый методы контроля [3, 4, 5].

Вследствие высокой важности надежности энергооборудования довольно часто возникает необходимость контроля объекта исследования двумя или более методами: обычно сочетают методы, способные обнаруживать внутренние и поверхностные дефекты (акустический и магнитный контроль; магнитопорошковый метод контроля, акустический и токовихревой контроль и т.д.) или плоские и объёмные дефекты (например, ультразвуковой контроль и радиография). Для контроля внутренних поверхностей используются токовихревые методы или акустический контроль и визуально-оптический осмотр.

Комплексное использование наиболее чувствительных методов не означает, что показатели достоверности будут соответственно наибольшими, а в свою очередь, учет первоочередности технических показателей может привести к противоречиям с экономическими критериями, такими как трудозатраты, стоимость, время контроля и т.д., что, в свою очередь, может привести к тому, что выбранный комплекс методов НК может оказаться с экономической точки зрения неэффективным. Поэтому при формировании комплекса методов неразрушающего контроля разной физической природы возникает проблема оптимизации состава комплекса с учетом критериев их эффективности и затрат ресурсов.

Для реализации различных методов НК разработаны различные приборы: дефектоскопы, толщиномеры, тепловизоры для разных дефектов (трещин, негерметичностей), электронное оборудование (для нахождения ослабления электрических контактов), механическое оборудование, которое имеет различные технико-экономические характеристики и технологии использования для различных типов дефектов и др.

Из анализа имеющихся характеристик вытекает необходимость решения задачи выбора состава (комплекса) методов НК как задачи в оптимизационной постановке.

Комплексное применение методов НК для диагностики и обнаружения дефектов в агрегатах и системах направлено на обеспечение увеличения эффективности и достоверности контроля, продления работоспособности и ресурса.

Задача формирования комплекса различных методов НК для обнаружения совокупности возможных (наиболее опасных дефектов) в системе может быть сформулирована как оптимизационная многоуровневая однокритериальная (многокритериальная) задача дискретного программирования [2].

Решение задачи - оптимальное сочетание различных методов НК, применение которых наиболее эффективно при эксплуатации и анализе ресурса дорогостоящих систем.

Актуальными при проведении НК являются также задачи оптимального распределения объемов контроля на всех этапах жизненного цикла объекта, оптимизации мест и параметров контроля, планирования технического обслуживания системы с учетом экономических показателей.

Выводы

Продление сроков эксплуатации и поддержание значений показателей долговечности, надежности и безопасности сложных дорогостоящих систем может быть достигнуто за счет использования оптимального сочетания различных по своей природе методов неразрушающего контроля. Проблема обеспечения безопасности при эксплуатации систем подразделяется на блоки взаимосвязанных функциональных задач, решение которых позволяет реализовать на практике конкретный механизм поддержания безопасности сложных объектов с учетом жестко ограниченных и доступных ресурсов.

Эффективность применения методов неразрушающего контроля зависит от схем организации контроля, его планирования, использования современных информационных технологий и вычислительной техники, персонала.

Решение задачи выявления дефектов позволяет, кроме выработки рекомендаций по распределению средств, обосновать с экономической точки зрения требования к изделиям по долговечности (выявить зависимости увеличения ресурса, срока службы изделия от дополнительно вкладываемых в него средств), а также оценить достаточность выделяемых средств для создания эффективной (в смысле выбранного критерия) системы эксплуатации изделий.

Для эффективной реализации мероприятий представляется целесообразным создание групп неразрушающего контроля, построение системы обучения и сертификации эксплуатационного персонала методам прогнозирующего контроля и ведение базы данных по контролю технического состояния систем для организации научно-методического сопровождения эксплуатируемых систем в ходе всех этапов контроля технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса.

Подводя итоги, следует отметить, что в настоящее время ни один технологический процесс получения ответственной продукции не внедряется в промышленность без соответствующей системы неразрушающего контроля.

АНАЛІЗ МЕТОДІВ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ НА АЕС

О.А. Скидан, Н.І. Кузнецова, Н.В. Серова-Нашева, Т.Н. Шлай

Розглянуто методи неруйнівного контролю (МНК) різних матеріалів, що застосовуються на атомних електростанціях. Наведена докладна класифікація кожного виду застосовуваної на енергооб'єктах дефектоскопії. Зроблено аналіз МНК за наступними критеріями: вартість, безпека для здоров'я, можливість дистанційного контролю (автоматизації), застосування на АЕС, надані можливості комплексного контролю кількома методами одночасно. Проведені дослідження дали можливість акумулювати наявні відомості про кожен метод і шляхом оцінювання кожного з них показати їх ефективність залежно від досліджуваного матеріалу. Надані в табличній формі результати допоможуть швидко і, головне, з великим ступенем точності підібрати необхідний МНК залежно від конкретних умов. Проаналізовано основні позитивні якості, а також виділені очевидні недоліки дефектоскопії, що також дозволяє більш повно показати можливість і, головне, ефективність її застосування.

ANALYSIS of NPP's NON-DESTRUCTIVE TESTING METHODS

A. Skidan, N. Kuznetsova, N. Serova-Nasheva, T. Shlay

Non-destructive methods (NDMs) of various materials testing used at NPPs were considered. The detailed classification of each defectoscopy type used at power facilities was given. NDMs were analyzed relative to following criteria: cost, health risks, remote control possibility (automation) and applicability to nuclear power plants conditions, the capabilities of simultaneous testing using the several methods. The investigations made enabled to accumulate the available information about each method and by evaluating each of them to submit their effectiveness depending on the material under study. Presented in tabular form results will help to select the required NDM quickly and most importantly with a high degree of accuracy depending on concrete conditions. The main defectoscopy advantages and disadvantages were analyzed what enables to show more full the opportunity and, most importantly, the effectiveness of its application.

Список использованных источников

1. ГОСТ 18353 – 79. Официальное издание. Контроль неразрушающий. Методы // Сборник стандартов. - М.: ИПК Изд-во стандартов, 2005.

2. Каневский И.Н. Неразрушающие методы контроля / И.Н. Каневский, Е.Н. Сальникова. – Владивосток, 2007. – 170 с.

3. ПНАЭГ 7-008-89. Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок.
4. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением. С изменениями и дополнениями. – Киев, 1998.
5. Правила устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды. С изменениями и дополнениями. – Киев, 2007.

Надійшла до редакції 19.07.2013 р.

УДК 532.292.004.415.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕТОКА ЖИДКОСТИ МЕЖДУ ЕМКОСТЯМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОДНОМЕРНЫХ КОДОВ

А.А. Чуклин, Д.В. Шевелев, к.т.н.

*Севастопольская служба научно-технической поддержки,
ОП НТЦ НАЭК «Энергоатом»*

Показана возможность физически корректного моделирования процессов тепломассопереноса в однофазных средах с помощью одномерных компьютерных кодов, широко используемых для моделирования процессов, протекающих на АЭС. Определен диапазон наиболее предпочтительных параметров для задания коэффициента сопротивления при моделировании перетока жидкости между емкостями.

Введение

Для моделирования процессов, протекающих на АЭС, широко используются одномерные компьютерные коды RELAP, MELCOR и другие, которым наряду с их достоинствами присущи некоторые недостатки. Существенной проблемой, возникающей при моделировании неодномерных процессов тепломассообмена и гидродинамики, является учет рециркуляции, влияющей на их динамику. Для создания квазитрехмерных моделей приходится прибегать к более детальной нодализации моделируемых элементов. Одной из задач, стоящих перед разработчиком компьютерной модели энергоустановки, является как выбор «правильного» количества элементов нодализационной схемы, так и задание «корректных» параметров, вводимых в модель элементов.

Данная тематика является весьма актуальной, так как программа по моделированию энергоустановок с помощью кода Melcor была принята к использованию для АЭС с реакторами ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 в рамках региональных проектов МАГАТЭ RER/9/004 и RER/9/020. В Украине решение о начале работ по тяжелым авариям, для анализа которых используются компьютерные коды, было принято в конце декабря 2008 г.

Анализ литературы показал, что, несмотря на широкое применение компьютерных кодов для анализа тяжелых аварий АЭС [1, 2], не уделяется достаточного внимания научному обоснованию оптимальности разбивки нодализационных схем энергоустановок и задания их исходных данных.