

РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ АЛГОРИТМА КОНТРОЛЯ ТЕЧИ ТРУБОПРОВОДОВ ПО ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА

П.А. Дворников*, С.Н. Ковтун*, А.А. Бударин*, В.П. Полионов*,
Н.Н. Титаренко*, Д.М. Швецов*, Н.Г. Роцин**, А.Л. Матвеев**,
Е.Л. Матвеев**

*ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск

**Общество с ограниченной ответственностью «Инженерно-сервисный центр
диагностики оборудования АЭС НИКИЭТ», г. Москва



Объектом исследования являются динамические процессы, происходящие в теплоизоляции при разгерметизации трубопровода энергетических установок. Моделирование всевозможных вариантов течи проводилось с помощью адаптированного расчетного кода КУПОЛ-М, разработанного в ГНЦ РФ-ФЭИ.

Ключевые слова: контроль течи теплоносителя, влажность, датчик влажности, температура, трубопровод, теплоизоляция, энергетические установки.

Key words: coolant leak control, humidity, humidity sensor, temperature, pipeline, thermal insulation, power plants.

ВВЕДЕНИЕ

Предотвращение глобальных катастроф, вызванных авариями на потенциально опасных объектах нефтегазовой и химической отраслей, объектах энергетики, является мировой задачей. Поэтому требования к системам безопасности непрерывно ужесточаются, что приводит к необходимости разработки новых технологий, средств мониторинга и надежной диагностики технического состояния оборудования таких объектов.

На всех потенциально опасных объектах ТЭК одними из самых высоконагруженных элементов были и остаются сосуды и трубопроводы, работающие в чрезвычайно сложных условиях в штатных и аварийных ситуациях. Особенно опасны нарушения штатной эксплуатации, связанные с нарушениями целостности и, тем более, разрывами трубопроводов контуров давления. Поэтому актуальна проблема разработки надежных средств обнаружения на ранней стадии появления аномальных зон, в которых образовались и развиваются эксплуатационные дефекты.

Определение места течи технологического продукта относится к наиболее трудоемкой операции в области неразрушающего контроля. Выполненный в МЭК 61250 анализ [1–6] различных методов контроля течи привел к целесообраз-

© П.А. Дворников, С.Н. Ковтун, А.А. Бударин, В.П. Полионов, Н.Н. Титаренко, Д.М. Швецов, Н.Г. Роцин, А.Л. Матвеев, Е.Л. Матвеев, 2012

ности применения комплексных систем контроля, в которых используются разные по физической природе методы исследования, что позволит исключить недостатки одного метода, взаимодополнить методы и реализовать тем самым принцип «избыточности» для повышения надежности контроля систем и агрегатов.

Как показывает сравнительный анализ существующих методов, метод контроля течи по влажности является одним из наиболее перспективных. Он описан и регламентирован в международном стандарте IEC-1250 (IEC-94) [1–3].

Анализ достоинств и недостатков известных влажностных систем контроля течи с точки зрения удовлетворения требованиям концепции безопасности «течь перед разрушением» во многом определил технические решения, заложенные в разработку влажностной системы контроля течи для ВВЭР. При ее разработке, исходя из опыта, были приняты следующие предпосылки:

- система должна быть пространственно распределенной по контролируемому оборудованию;
- узлы, прежде всего электроника, чувствительные к эксплуатационным факторам (излучение, температура), должны быть вынесены за пределы защитной оболочки АЭС;
- влажный воздух (парогазовая смесь) к устройствам измерения влажности целесообразно транспортировать с помощью пассивных методов;
- система должна обеспечивать контроль течи как по относительной влажности, так и по температуре и абсолютной влажности;
- основные технические решения должны быть обоснованы расчетным и экспериментальными методами;
- система должна быть максимально унифицированной для использования на действующих, строящихся и проектируемых АЭС с ВВЭР, при этом должен обеспечиваться контроль трубопроводов с различными типами теплоизоляции, в том числе с традиционной (матовой) и новой (блочной) теплоизоляцией.

Известные интегральные влажностные системы контроля ALLY™ фирм «Westinghouse» (США) и «MGP Instruments» (Франция), основанные на разности показаний различных гидрометрических ячеек, не дают возможности определить место течи с требуемой точностью и отличить множественные малые течи в различных местах помещения от течи большой величины. Известная локальная система влажностного контроля течи FLUS фирмы «Siemens» (Германия) обладает высокой чувствительностью обнаружения факта и места при малых течах (~ 0,1 л/мин), но не способна вести оперативный контроль течи в заданном диапазоне (до 3,8 л/мин и выше). К числу недостатков данной системы следует также отнести значительное время обнаружения течи (более 0,5 часа) и тот факт, что система является дополнительным источником вероятности разгерметизации через проходки для шлангов.

Для подсистемы контроля течи по влажности воздуха (СКТВ) [4–7] информативным признаком течи водяного теплоносителя является повышение абсолютной влажности воздуха в теплоизоляции трубопровода. Подсистема постоянно измеряет относительную влажность и температуру воздуха в вытяжном патрубке и вычисляет абсолютную влажность воздуха.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСИ

Математическая модель описания распространения парогазовой смеси основана на составлении математических уравнений, описывающих основные физи-

ческие процессы и законы, происходящие в теплоизоляции. Численные алгоритмы решения математических задач, реализованных в виде проблемно ориентированных комплексов программ, дают возможность получить количественные результаты, имитируя тот или иной натурный эксперимент. Вычислительный эксперимент – это сочетание и сбалансированное использование всех известных методов исследования, включая методы обработки и интерпретации данных натурального эксперимента. Теоретические представления, методы современного математического анализа и программирования на базе единого рабочего цикла существенным образом повышают эффективность исследования.

Наличие эффективного алгоритма и программы расчетов, как правило, целиком определяет возможности применения той или иной модели; отсутствие соответствующего математического аппарата зачастую приводит к необходимости отказа от выбранной концепции моделирования или ее упрощению.

В СКТВ для целей контроля течи трубопроводов энергетических установок измеряется влажность воздуха в гетерогенной теплоизоляции, объем которой многократно меньше объемов воздуха в помещениях первого контура. Для повышения надежности обнаружения течи, возможности определения ее места и величины на каждом контролируемом участке трубопровода устанавливаются два-три выносных зонда (ЗВ), максимально разнесенные по длине трубопровода. Чувствительные к относительной влажности и температуре воздуха элементы выносного зонда (сенсоры) сообщаются посредством патрубков с теплоизоляцией трубопровода.

Такое техническое решение, как использование в качестве контролируемого объема непосредственно гетерогенной теплоизоляции трубопровода существенно упрощает проблемы, связанные с определением места и величины течи теплоносителя, снижает требования к аппаратуре для регистрации параметров воздуха. Применение вытяжных патрубков позволяет использовать пассивную транспортировку парогазовой смеси, а также организовать щадящий температурный режим для выносных зондов и тем самым повысить надежность их работы.

Согласно рис. 1, в верхней части трубопроводов установлены вытяжные патрубки высотой около 0,4 м, заканчивающиеся выносными зондами. При возникновении течи в координате X_T пар будет заполнять подызоляционное пространство и подниматься по вытяжным патрубкам к сенсорам влажности и температуры. Ожидаемое изменение влажности и температуры воздуха в подызоляционном пространстве при указанной пороговой течи 1 л/мин может достигать нескольких десятков процентов. Аппаратурная регистрация таких изменений параметров воздуха (относительная влажность, температура) при этом существенно упроща-

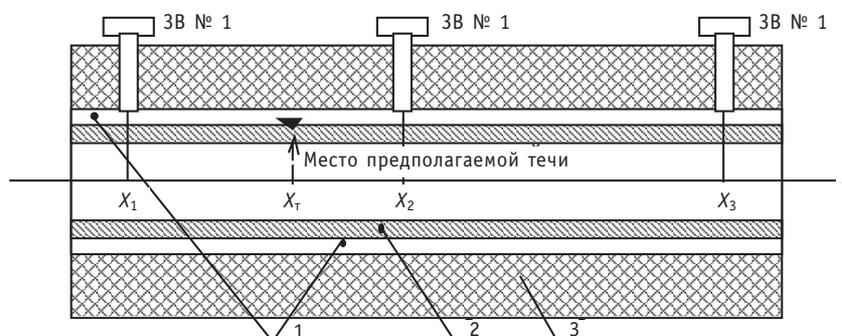


Рис. 1. Упрощенная схема установки зондов выносных на участке трубопровода: 1 – подызоляционное пространство; 2 – трубопровод; 3 – тепловая изоляция; ЗВ № 1, ЗВ № 2, ЗВ № 3 – зонды выносные

ются. В принятом техническом решении существенно проще и надежнее разрешаются проблемы, связанные с определением местоположения течи теплоносителя.

В данной работе с помощью расчетного кода КУПОЛ-М [8, 9] была рассчитана матрица различных ситуаций возникновения течи теплоносителя через неплотности в трубопроводе энергетической установки типа ВВЭР-1000. Параметры имитационной модели приведены в табл. 1. В таблице 2 приведены варианты расчета, характеризуемые расстоянием от места течи, ориентацией отверстия по азимутальному углу трубы и величины течи.

Таблица 1

Геометрические размеры имитационной модели участка трубопровода

| Параметр модели | Величина |
|--|--|
| Длина рассматриваемого участка трубопровода, м | 9,0 |
| Внешний радиус трубопровода, м | 0,495 |
| Толщина пористой изоляции, м | 0,15 |
| Температура на поверхности трубопровода, °С | 300 |
| Температура на внешней стороне теплоизоляции, °С | 60 |
| Число патрубков в системе | 3 |
| Продольные координаты патрубков x_2 , м | $x_2 = x_1 = 1,5$; $x_2 = x_2 = 4,5$; $x_2 = x_1 = 7,5$ |

Таблица 2

Матрица расчета ситуаций течи

| Положение зондов \ Ориентация отверстия | 1,5 м | 4,5 м | 7,5 м |
|---|---------------------|---------------------|---------------------|
| $\vartheta = 0^\circ$ (верх) | 1,5; 2; 3; 4 кг/мин | 1,5; 2; 3; 4 кг/мин | 1,5; 2; 3; 4 кг/мин |
| $\vartheta = 90^\circ$ (бок) | 1,5; 2; 3; 4 кг/мин | 1,5; 2; 3; 4 кг/мин | 1,5; 2; 3; 4 кг/мин |
| $\vartheta = 180^\circ$ (низ) | 1,5; 2; 3; 4 кг/мин | 1,5; 2; 3; 4 кг/мин | 1,5; 2; 3; 4 кг/мин |

Полученная в результате расчетов матрица подставляет собой 36 различных переходных процессов (величины течи 1–4 кг/мин, расстояния от места течи до ЗВ – 0, 3, 6 м, ориентация места течи – 0, 90, 180°). Результаты расчета отдельных ситуаций представляли собой динамику изменения абсолютной, относительной влажности и температуры в местах размещения выносных зондов (ЗВ, рис.1). При расчетах принято, что фоновая абсолютная влажность (ρ_f) равна 0,064 кг/м³, что соответствует относительной влажности (ϕ_f) – 50% и температуре (T_f) – 60°С.

В таблицах 3–8 приведены рассчитанные скорости нарастания абсолютной влажности $d\rho/dt$ (кг/м³/с) после достижения порога абсолютной влажности вблизи выносных зондов.

Из приведенных данных видно, что времена достижения порога 3 фонов даже для наиболее инерционного сценария меньше заданных трех минут. Поскольку к определению времени возникновения течи не предъявляются высокие требования, то за момент течи можно принять время первого достижения порога. При необходимости, время начала течи может быть уточнено с использованием данных, приведенных в следующем разделе.

Выполненные по коду КУПОЛ-М расчеты показали, что предложенная пассивная система транспортировки воздуха из подызоляционного пространства трубо-

Таблица 3

Рассчитанные скорости нарастания абсолютной влажности $d\rho/dt$ (кг/м³/с) вблизи заданных порогов у первого выносного зонда после начала течи 1.5 кг/мин в зависимости от ее положения

| Место течи | $\rho_{\text{порог}} = 0,2 \text{ кг/м}^3$ | | $\rho_{\text{порог}} = 0,3 \text{ кг/м}^3$ | | $\rho_{\text{порог}} = 0,4 \text{ кг/м}^3$ | |
|------------------------------------|--|------------|--|------------|--|------------|
| | t_1 | $d\rho/dt$ | t_2 | $d\rho/dt$ | t_3 | $d\rho/dt$ |
| $x_T = x_T; \vartheta = 0^\circ$ | 2.7 | 6.4E-02 | 4.3 | 6.1E-02 | 6.1 | 5.3E-02 |
| $x_T = x_T; \vartheta = 90^\circ$ | 12.3 | 1.7E-02 | 20.2 | 9.8E-03 | 34.8 | 4.4E-03 |
| $x_T = x_T; \vartheta = 180^\circ$ | 56.0 | 2.2E-03 | 105.7 | 1.9E-03 | 169.7 | 1.3E-03 |
| $x_T = 3,5; \vartheta = 0^\circ$ | 19.7 | 9.6E-03 | 34.4 | 6.4E-03 | 51.9 | 5.3E-03 |
| $x_T = 3,5; \vartheta = 90^\circ$ | 50.6 | 2.8E-03 | 81.7 | 3.4E-03 | 114.4 | 2.6E-03 |
| $x_T = 3,5; \vartheta = 180^\circ$ | 98.3 | 2.0E-03 | 140.4 | 2.5E-03 | 188.0 | 1.9E-03 |

Таблица 4

Рассчитанные скорости нарастания абсолютной влажности $d\rho/dt$ (кг/м³/с) вблизи заданных порогов у второго выносного зонда после начала течи 1.5 кг/мин в зависимости от ее положения

| Место течи | $\rho_{\text{порог}} = 0,2 \text{ кг/м}^3$ | | $\rho_{\text{порог}} = 0,3 \text{ кг/м}^3$ | | $\rho_{\text{порог}} = 0,4 \text{ кг/м}^3$ | |
|------------------------------------|--|------------|--|------------|--|------------|
| | t_1 | $d\rho/dt$ | t_2 | $d\rho/dt$ | t_3 | $d\rho/dt$ |
| $x_T = x_T; \vartheta = 0^\circ$ | 40.6 | 3.1E-03 | 61.0 | 5.6E-03 | 83.0 | 3.6E-03 |
| $x_T = x_T; \vartheta = 90^\circ$ | 76.8 | 3.2E-03 | 106.5 | 3.5E-03 | 140.9 | 2.3E-03 |
| $x_T = x_T; \vartheta = 180^\circ$ | 124.7 | 1.9E-03 | 164.3 | 2.6E-03 | 209.1 | 1.7E-03 |
| $x_T = 3,5; \vartheta = 0^\circ$ | 8.2 | 2.9E-02 | 12.1 | 2.0E-02 | 19.5 | 1.2E-02 |
| $x_T = 3,5; \vartheta = 90^\circ$ | 29.4 | 3.9E-03 | 57.0 | 3.6E-03 | 87.8 | 2.5E-03 |
| $x_T = 3,5; \vartheta = 180^\circ$ | 87.6 | 1.6E-03 | 137.3 | 2.1E-03 | 193.2 | 1.4E-03 |

Таблица 5

Рассчитанные скорости нарастания абсолютной влажности $d\rho/dt$ (кг/м³/с) вблизи заданных порогов у третьего выносного зонда после начала течи 1.5 кг/мин в зависимости от ее положения

| Место течи | $\rho_{\text{порог}} = 0,2 \text{ кг/м}^3$ | | $\rho_{\text{порог}} = 0,3 \text{ кг/м}^3$ | | $\rho_{\text{порог}} = 0,4 \text{ кг/м}^3$ | |
|------------------------------------|--|------------|--|------------|--|------------|
| | t_1 | $d\rho/dt$ | t_2 | $d\rho/dt$ | t_3 | $d\rho/dt$ |
| $x_T = x_T; \vartheta = 0^\circ$ | 127.6 | 2.9E-03 | 164.6 | 2.4E-03 | 226.7 | 1.1E-03 |
| $x_T = x_T; \vartheta = 90^\circ$ | 152.1 | 2.1E-03 | 200.1 | 2.0E-03 | 267.5 | 9.8E-04 |
| $x_T = x_T; \vartheta = 180^\circ$ | 193.6 | 1.6E-03 | 249.3 | 1.6E-03 | 321.8 | 1.0E-03 |
| $x_T = 3,5; \vartheta = 0^\circ$ | 63.5 | 3.4E-03 | 91.4 | 3.3E-03 | 130.8 | 1.9E-03 |
| $x_T = 3,5; \vartheta = 90^\circ$ | 107.1 | 2.4E-03 | 144.7 | 2.6E-03 | 196.6 | 1.3E-03 |
| $x_T = 3,5; \vartheta = 180^\circ$ | 161.0 | 1.4E-03 | 209.9 | 1.9E-03 | 276.9 | 1.1E-03 |

провода с помощью вытяжных патрубков практически не оказывает влияния на характеристики теплоизоляции. Разработанная конструкция вытяжных патрубков с дроссельными шайбами позволяет ограничить величину дополнительного выноса тепла с участка трубопровода.

Таблица 6

Рассчитанные скорости нарастания абсолютной влажности $d\rho/dt$ (кг/м³/с) вблизи заданных порогов у первого выносного зонда после начала течи в точке $x_T = x_1$; $\vartheta = 180^\circ$ в зависимости от ее величины

| Величина течи, кг/мин | $\rho_{\text{порог}} = 0,2 \text{ кг/м}^3$ | | $\rho_{\text{порог}} = 0,3 \text{ кг/м}^3$ | | $\rho_{\text{порог}} = 0,4 \text{ кг/м}^3$ | |
|-----------------------|--|------------|--|------------|--|------------|
| | t_1 | $d\rho/dt$ | t_2 | $d\rho/dt$ | t_3 | $d\rho/dt$ |
| 1,5 | 56.0 | 2.2E-03 | 105.7 | 1.9E-03 | 169.7 | 1.3E-03 |
| 2,0 | 31.0 | 6.0E-03 | 51.7 | 4.8E-03 | 73.6 | 4.2E-03 |
| 3,0 | 19.1 | 1.1E-02 | 28.5 | 8.9E-03 | 41.2 | 6.5E-03 |
| 4,0 | 14.6 | 1.3E-02 | 21.8 | 1.4E-02 | 30.8 | 9.0E-03 |

Таблица 7

Рассчитанные скорости нарастания абсолютной влажности $d\rho/dt$ (кг/м³/с) вблизи заданных порогов у второго выносного зонда после начала течи в точке $x_T = x_1$; $\vartheta = 180^\circ$ в зависимости от ее величины

| Величина течи, кг/мин | $\rho_{\text{порог}} = 0,2 \text{ кг/м}^3$ | | $\rho_{\text{порог}} = 0,3 \text{ кг/м}^3$ | | $\rho_{\text{порог}} = 0,4 \text{ кг/м}^3$ | |
|-----------------------|--|------------|--|------------|--|------------|
| | t_1 | $d\rho/dt$ | t_2 | $d\rho/dt$ | t_3 | $d\rho/dt$ |
| 1,5 | 124.7 | 1.9E-03 | 164.3 | 2.6E-03 | 209.1 | 1.7E-03 |
| 2,0 | 90.6 | 3.7E-03 | 118.0 | 4.0E-03 | 143.4 | 3.6E-03 |
| 3,0 | 56.4 | 6.1E-03 | 71.8 | 7.0E-03 | 88.3 | 5.8E-03 |
| 4,0 | 42.6 | 9.4E-03 | 54.8 | 9.0E-03 | 66.4 | 8.3E-03 |

Таблица 8

Рассчитанные скорости нарастания абсолютной влажности $d\rho/dt$ (кг/м³/с) вблизи заданных порогов у третьего выносного зонда после начала течи в точке $x_T = x_1$; $\vartheta = 180^\circ$ в зависимости от ее величины

| Величина течи, кг/мин | $\rho_{\text{порог}} = 0,2 \text{ кг/м}^3$ | | $\rho_{\text{порог}} = 0,3 \text{ кг/м}^3$ | | $\rho_{\text{порог}} = 0,4 \text{ кг/м}^3$ | |
|-----------------------|--|------------|--|------------|--|------------|
| | t_1 | $d\rho/dt$ | t_2 | $d\rho/dt$ | t_3 | $d\rho/dt$ |
| 1,5 | 193.6 | 1.6E-03 | 249.3 | 1.6E-03 | 321.8 | 1.0E-03 |
| 2,0 | 143.1 | 2.9E-03 | 181.0 | 2.8E-03 | 216.7 | 2.6E-03 |
| 3,0 | 91.8 | 4.8E-03 | 111.4 | 6.1E-03 | 131.7 | 4.9E-03 |
| 4,0 | 70.4 | 8.0E-03 | 84.8 | 6.9E-03 | 99.3 | 7.1E-03 |

ПОРОГОВЫЙ АЛГОРИТМ КОНТРОЛЯ ТЕЧИ

Фиксация факта и момента возникновения течи

В основу алгоритма установления факта течи, величины и местоположения течи СКТВ заложена модель, согласно которой при возникновении течи перегретый пар распространяется в обе стороны от места течи по воздухопроницаемой теплоизоляции трубопровода. При достижении парогазовым фронтом мест установки датчиков часть парогазовой смеси будет проходить через чувствительные объемы датчиков, что приведет к росту их показаний. Поскольку датчики находятся на различных расстояниях от места течи, то моменты увеличения показаний соответствующих каналов будут различными и зависимыми от скорости распространения парогазового фронта, т.е. от величины течи. Факт течи, зарегистрированный подсистемой,

подтверждается в случае, когда фиксируется течь на участке тремя датчиками. Моменты времени достижения уставок по росту показаний трех ближайших датчиков фиксируются и используются для вычисления величины и координат течи.

Факт течи предлагается фиксировать по достижении заданных порогов абсолютной влажности, сопровождающемся характерными изменениями относительной влажности и температуры, что является их отличием от временного тренда. Выбор величины порога является отдельной задачей. Низкое (близкое к фоновому) значение порога повышает оперативность контроля и вероятность обнаружения течи, и появляется возможность контролировать меньшие величины течей, но при этом повышается вероятность ложного срабатывания. Завышенное значение уставок снижает вероятность ложной тревоги, однако при этом повышается вероятность того, что малая течь может оказаться незафиксированной, и увеличивается время фиксации факта течи. Таким образом, существуют некие оптимальные уровни порогов срабатывания, которые определяются свойствами СКТВ и предъявляемыми к системе требованиями.

Определение места течи

В приближении постоянной линейной скорости распространения парогазового фронта (ПГФ) в изоляционном пространстве трубопровода координату течи X_T можно определить из следующей системы уравнений:

$$X_T = X_1 + \text{sign}(X_1 - X_T) \cdot W(t_1 - t_T), \quad (1)$$

$$X_T = X_2 + \text{sign}(X_2 - X_T) \cdot W(t_2 - t_T), \quad (2)$$

$$X_T = X_3 + \text{sign}(X_3 - X_T) \cdot W(t_3 - t_T), \quad (3)$$

где t_1, t_2, t_3 – времена фиксации факта течи; W – скорость ПГФ; t_T – время начала течи.

На первом этапе целесообразно определить координату течи относительно размещения ЗВ СКТВ. Блок-схема алгоритма определения участка течи по временам фиксации факта течи отдельными ЗВ приведена на рис. 2.

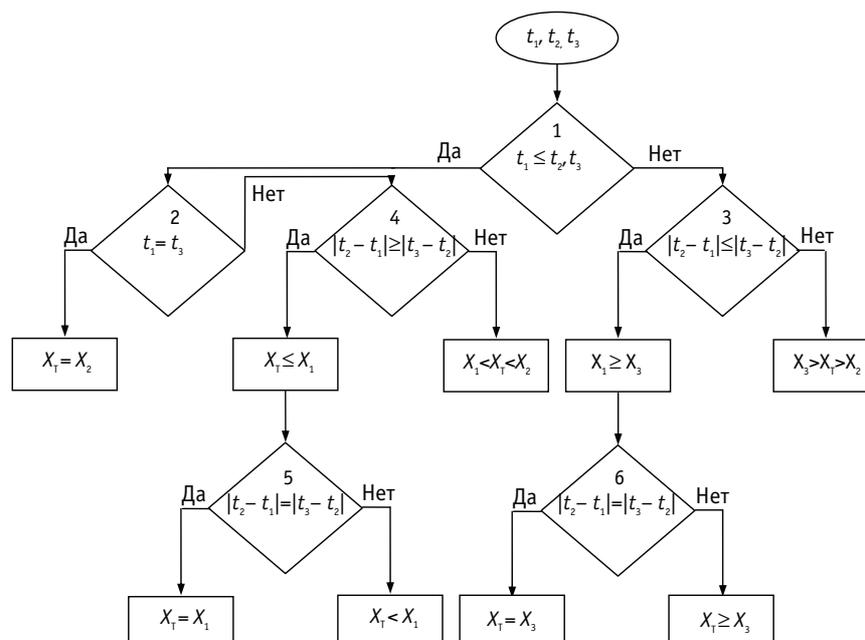


Рис. 2. Блок-схема алгоритма определения участка течи относительно ЗВ

Блок 1 определяет место течи относительно X_2 , блоки 2 и 3 – относительно X_1 и X_3 соответственно. Таким образом, реализация данной блок-схемы позволяет однозначно определить участок течи относительно ЗВ. Значение участка течи позволит определить значения $\text{sign}(X_i - X_T)$ и конкретизировать вид системы уравнений (1)–(3).

Система трех уравнений может быть решена относительно X_T . Пусть, для определенности течь зафиксирована на отрезке между X_1 и X_2 , тогда система уравнений (1)–(3) примет вид

$$X_T = X_1 - W(t_1 - t_T), \quad (4)$$

$$X_T = X_2 + W(t_2 - t_T), \quad (5)$$

$$X_T = X_3 + W(t_3 - t_T). \quad (6)$$

После ряда преобразований получим выражение для определения X_T

$$X_T = \frac{X_2 + X_1}{2} - \frac{(X_3 - X_2) \cdot (t_2 - t_1)}{2(t_3 - t_2)}. \quad (7)$$

Определение величины расхода

В основе существующего оценочного алгоритма контроля течи СКТВ лежит измерение скорости парогазового фронта (ПГФ) и переход к расходу через расчетную величину плотности парогазовой смеси (ПГС) в изоляционном пространстве трубопровода. Определение изменения плотности ПГС является сложной задачей.

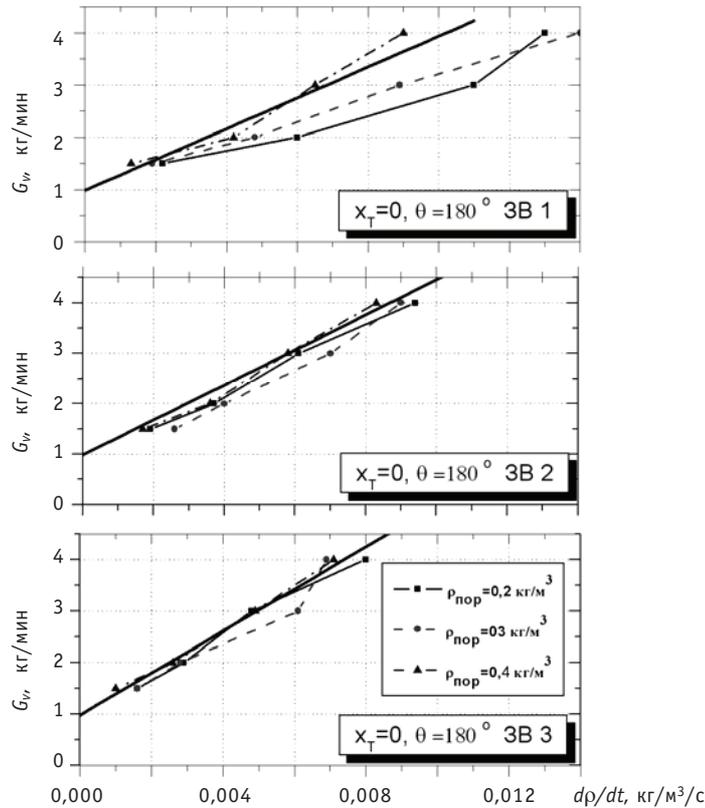


Рис. 3. Зависимость рассчитанной величины течи от порогового значения скорости нарастания абсолютной влажности dp/dt (данные по производным взяты из табл. 3–8). Сплошная прямая – аппроксимация величины течи по соотношению (8)

Поэтому предполагается расчетным методом определить зависимость скорости ПГФ непосредственно от величины расхода для различных сценариев возникновения течи, для чего был проведен поиск соотношений, связывающих регистрируемые параметры с величиной течи для размещенных ситуаций течи.

С хорошей точностью величину расхода течи можно определить, если привлечь для анализа имеющиеся данные по производным $d\rho/dt$, полученным по достижении заданных порогов абсолютной влажности (рис. 3). Из рисунка 3 видно, что скорость нарастания абсолютной влажности пропорциональна величине течи.

Если известны измеряемые каждым выносным зондом ($j = 1-3$) значения производных $d\rho/dt$ (кг/м³/с), тогда величину течи можно рассчитать по формуле

$$G_v^{(j)} = 0,984 + 295,2 \frac{d\rho^{(j)}}{dt} e^{0,054 \cdot |x_j - x_T|}, \text{ кг/мин.} \quad (8)$$

По трем рассчитанным значениями $G_v^{(1)}, G_v^{(2)}, G_v^{(3)}$ с помощью оптимизационной процедуры нетрудно получить координату течи x_T , а также ее величину G_v .

В таблице 9 во втором столбце приведены рассчитанные по (7) прогнозируемое положение течи x_T и по (8) величина течи (четвертый столбец).

Приведенные в табл. 9 данные показывают, что ошибка при определении величины течи по соотношению (8) не превышает 10%.

Таблица 9

Погрешность определения расхода по уравнению (8)

| G_v | x_T | $\Delta x_T/x_T, \%$ | $G_{\text{расч}}$ | $\Delta G/G, \%$ |
|-------|-------|----------------------|-------------------|------------------|
| 1,5 | 2,48 | 65,3 | 1,40 | 6,7 |
| 2,0 | 1,57 | 4,7 | 2,17 | 8,5 |
| 3,0 | 1,37 | -8,7 | 2,93 | 2,3 |
| 4,0 | 1,38 | -8,0 | 3,73 | 6,8 |

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В основу алгоритма диагностирования течи в СКТВ положены полученные на основе расчетов по коду КУПОЛ-М имитационные модели, описывающие поведение параметров воздуха (относительная и абсолютная влажность, температура) в зависимости от величины, места и продолжительности течи теплоносителя.

При определении координаты течи требуется первоначально определять участок трубопровода, где возникла течь, по предложенной блок-схеме с последующим решением системы уравнений. Отклонение определения координаты течи в диапазоне течей от 2 до 4 кг/мин всех рассмотренных параметров составляет $\pm 0,2$ м, при уменьшении течи до 1 кг/мин отклонение составляет 1 м. Напомним, что в соответствии с действующей нормативно-технической документацией координата течи должна быть определена с точностью ± 2 м.

Величина течи в рамках принятой модели определяется с погрешностью не более $\pm 10\%$.

Конкретными потребителями подсистемы СКТВ могут быть

- объекты промышленности и энергетики с оборудованием, эксплуатируемым в среде под давлением (контроль технологических трубопроводов, сосудов, теплообменных аппаратов, камер нейтрализации, магистралей газов и жидкостей, трубопроводов пара и горячей воды);

- тепловые и атомные электростанции (контроль протечек теплоносителя в трубопроводах, парогенераторах и оборудовании энергоустановок).

Данная статья подготовлена при выполнении Государственного контракта от 05.08.2011 №16.526.11.6006 в рамках федеральной целевой программы.

Литература

1. ПН АЭ Г 01-011-97 (ОПБ-88/97). «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций». 1997.
2. Nuclear power plant diagnostics. Final report. – IAEA. Vienna, 1999.
3. Руководство по применению концепции безопасности течь передразрушением к трубопроводам АЭУ, Р-ТПР-01-99. – М., 1999.
4. Морозов С.А., Ковтун С.Н., Дворников П.А., Бударин А.А., Кудряев А.А., Кондратович Ф.В., Полионов В.П. Система влажностного контроля течи (СКТВ) водяного теплоносителя/Препринт ФЭИ-3080. – Обнинск: ГНЦ РФ: ФЭИ, 2006.
5. Морозов С.А., Ковтун С.Н., Дворников П.А., Бударин А.А., Кудряев А.А., Кондратович Ф.В., Полионов В.П. Разработка влажностной системы контроля течи трубопроводов ВВЭР//Атомная энергия. – Т. 103. – Вып. 5. – С. 291-294.
6. Морозов С.А., Ковтун С.Н., Дворников П.А. и др. Разработка системы влажностного контроля течи водяного теплоносителя//Известия вузов. Ядерная энергетика. 2008. – №2. – С. 30-35.
7. Дворников П.А., Ковтун С.Н., Бударин А.А., Шутов С.С., Шутов П.С., Кудряев А.А., Кондратович Ф.В. Средства технического диагностирования течей теплоносителя для АЭС с РУ ВВЭР-1000: Тез. конф. «Модернизация оборудования и арматуры АЭС, ТОиР, продление продолжительности эксплуатации» (Варна, Болгария, 17-24 июня, 2011 г.).
8. Ефанов А.Д., Лукьянов А.А., Шаньгин Н.Н., Зайцев А.А., Юрьев Ю.С., Безлепкин В.В. Верификация контейментного кода КУПОЛ-М/Препринт ФЭИ-2628. – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 1997.
9. Ефанов А.Д. и др. Расчеты нестационарного тепломассопереноса в защитных оболочках с использованием кода КУПОЛ-М//Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика ядерных реакторов. – 1999. – №2. – С. 96.

Поступила в редакцию 28.06.2012

ABSTRACTS OF THE PAPERS**УДК 621.039.51**

New Technique to Reformat Multigroup Cross-Sections for Monte-Carlo Calculation \I.R. Suslov, I.V. Tormyshev, K.G. Mel'nikov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 8 pages, 3 tables, 2 illustrations. – References, 21 titles.

New method to calculate equiprobability bins from Legendre expansion scattering cross-sections is proposed. The method uses a correction of equiprobability bins boundaries to provide a conservation of the first angular moment. The code CRSRD-ST to reformat cross sections from DTF to ACE format with proposed technique is developed. Numerical results shows the method proposed significantly improves an agreement between deterministic and Monte-Carlo calculations.

УДК 621.039.51

Boundary Resonance Effects in the Fast Reactor with the Heterogeneous Core \A.A. Bezborodov, E.V. Dolgov, D.A. Klinov, V.V. Kolesov, V.Yu. Stogov, I.R. Suslov, V.I. Folomeev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 10 pages, 2 tables, 4 illustrations. – References, 10 titles.

Boundary resonance effects is considering with the application of the high-speed subgroup approximation technique employment in practical tasks for description of neutron cross-sections interactions with media nuclides nuclei in resonance part of energy for physical simulation of the fast reactor plants with the heterogeneous core.

УДК 621.039.51

Energy Deposition Evaluation in the Target with Uranium-Containing Material for the ⁹⁹Mo Production in WWR-C Reactor with the Improved Design of Target \O.Yu. Kochnov, V.V. Kolesov, R.V. Fomin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 7 pages, 2 tables, 9 illustrations. – References, 2 titles.

Increased production of the ⁹⁹Mo in the context of rising global demand is an urgent task. The new type of target for ⁹⁹Mo producing in WWR-c reactor technological channels was developed. A series of calculations to estimate energy deposition for standard and modified target were done. A considerable energy deposition increasing in modified target was found.

УДК 621.039.56

Method of ¹⁶N Generation for Test of Radiation Controlled Channels on Nuclear Power Stations with Water-Cooled Reactors \V.A. Khryachkov, I.P. Bondarenko, P.A. Dvornikov, B.V. Zhuravlev, S.N. Kovtun, T.A. Khromyleva, A.V. Pavlov, N.G. Roschin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 5 pages, 3 illustrations. – References, 3 titles.

The preferences of ¹⁹F(n,α)¹⁶N nuclear reaction use for radiation control channels test on water-cooled power reactors are analyzed. The new measurements for more accurate determination of ¹⁹F(n,α)¹⁶N reaction cross section energy dependence have been carried out. A set of new methods for background reducing and improvement of events determination reliability was developed.

УДК 621.039.524.44:697.93

Calculation-based Justification for the Algorithm of Pipelines Leak Control by Air Humidity \P.A. Dvornikov, S.N. Kovtun, A.A. Budarin, V.P. Polionov, N.N. Titarenko, D.M. Shvetsov, N.G. Roshchin, A.L. Matveev, E.L. Matveev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 10 pages, 9 tables, 3 illustrations. – References, 9 titles.

Dynamic processes in thermal insulation of power plants pipelines caused by depressurization are the goal of the research. Simulation of various leaks was realized by using adapted computer code KUPOL-M developed in SSC RF IPPE.

УДК 621.039.58

Analysis of the Errors Committed by NPP MCR Operators during Implementation of Operating Procedures \N.V. Pleshakova, A.N. Anokhin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya