

В.Г. ПЕТРОСЯН

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ТЕЧИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ И ВОЗМОЖНОСТЬ ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КОНЦЕПЦИИ «ТЕЧЬ ПЕРЕД РАЗРУШЕНИЕМ»

Предлагаются дополнения к алгоритму определения расхода протечки в диагностической системе контроля течи теплоносителя из первого контура энергоблока №2 Арм. АЭС с введением поправочных коэффициентов.

Ключевые слова: аппроксимация, локализация, протечка, чувствительность системы, вязкость воды, песочная шероховатость, коэффициент ослабления.

1. Необходимость рассмотрения задачи аппроксимации в процессе локализации места и определения расхода протечки. В программном обеспечении (ПО) системы контроля течи теплоносителя (СКТТ), как правило, процесс аппроксимации проводится при заданном начале координатной системы. Однако опыт показывает, что начало отсчета системы также должно быть включено в состав неопределенных параметров наряду с определением коэффициента затухания и свободного члена в принятой зависимости закона ослабления, иначе говоря, процесс аппроксимации производится по максимуму коэффициента корреляции. В результате решения этой экстремальной задачи устанавливается и начало координат наряду с $R_{\text{он}}$ – местоположением протечки.

Определение начала координат в системе при аппроксимации. Процесс аппроксимации обычно проводится при заданном произвольном R . В произвольно заданной координатной системе отмечается местоположение датчиков (расстояние датчиков от принятой неопределенной точки), при котором обычной процедурой определяется значение коэффициента корреляции. Затем путем изменения R по градиентной процедуре из условия $\max R(x)$ определяется число x , тем самым и место установки датчиков от x . Итерационная процедура продолжается до стабилизации $R(x)$ по x . Анализ результатов позволяет корректно определить местоположение каждого датчика рассматриваемого массива данных. Кроме того, становится возможной оценка величины расхождения показания сигналов и установление идентичности датчиков, расположенных в идентичных местах.

Для повышения эффективности процесса локализации изложенные выше вычисления следует проводить заранее, при этом убеждаясь в правильности реализации программы.

Указанные выше дополнения весьма эффективны также для решения задачи расчета расхода протечки и повышения точности и имеют принципиальное значение для повышения эффективности СКТТ [1]

2. Учет флуктуации сигналов в СКТТ. Следующим важным моментом в СКТТ является наблюдение локализации протечки расходящегося процесса,

связанного с флуктуацией значений сигналов, т.е. процесса типа $\Delta \leftrightarrow \Delta X$, где ΔX - повышение значений сигналов в момент $t + \Delta t$, иначе говоря, в момент t разница значений сигналов равна 0, а при $t + \Delta t$ сигналы имеют определенное значение.

Следует отметить, что, не имея сходящегося значения места протечки, нельзя выбрать и значение сигнала в месте протечки, тем самым определить расход протечки. Последний рекомендуется определить по известной зависимости $\Delta x = f(\Delta y)$, где Δx – изменение значения сигналов датчиков в месте установки излучателя или в начале координат; Δy – изменение расхода протечки. Этот момент приводит к неопределенности как при определении места локализации, так и при определении расхода протечки [2].

Известно, что построение функции $\Delta x = f(\Delta y)$ – довольно сложная процедура, и поэтому рекомендуется коэффициент пропорциональности подбирать на основе заводских испытаний. Изложенный подход реализован в алгоритме локализации и определения расхода протечки. Однако опыт эксплуатации СКТТ показал, что, учитывая расходящийся процесс $0 \leftrightarrow \Delta x$, следует ввести соответствующее дополнение к алгоритму, позволяющее ликвидировать $0 \leftrightarrow \Delta x$ путем замены его на $\Delta x = \Delta x / 2$. Это предложение в дальнейшем следует исследовать и выбрать более эффективный метод ликвидации расходимости, далее проверить его на практике, тем более, что этот процесс мало исследован в СКТТ и вообще не рассмотрен.

Проблема определения расхода протечки является важной и при реализации концепции «Течь перед разрывом» (ТПР), поэтому требуются более подробные исследования и повышение точности расчетов, что позволит более точно рассчитать концепцию утечки при использовании концепции ТПР, установлении динамики роста трещины и подготовке информации об утечке.

3. Исследования по определению чувствительности системы контроля течи. Надо отметить, что все приведенные суждения основаны на экспериментальном материале, полученном в результате длительной эксплуатации СКТТ на энергоблоке №2 ААЭС.

Для реализации концепции ТПР важным фактором является установление чувствительности системы контроля течи. В силу этого методам и средствам контроля течи должны удовлетворять определенные требования: быстродействие, надежность, простота в эксплуатации, позволяющие оператору ясно и однозначно устанавливать факт наличия течи и место ее расположения. Например, в нормативных документах проектная течь в рамках концепции ТПР принимается равной 3,8 л/мин, хотя в некоторых случаях, в зависимости от свойств материала трубопроводов, условий эксплуатации и других факторов, может потребоваться более высокая чувствительность системы.

Опыт эксплуатации показал, что на чувствительность средств контроля течи влияют количество датчиков в рассматриваемом массиве, оптимальное их расположение на первом контуре блоков АЭС, методика локализации протечки и точность определения. В связи с этим особое значение приобретают дополнения программного обеспечения СКТТ, изложенные выше и испытанные на энергоблоке №2 ААЭС, что позволяет с заданной чувствительностью определить количество и места установления их в массиве.

Наименьшие течи (до 1 л/ч) могут быть зафиксированы при контроле видеокамерами в инфракрасном свете; чувствительность этого метода тем выше, чем больше разница температур теплоносителя и воздуха в герметичных помещениях. Недостатки этого метода в том, что требуется постоянное наблюдение оператора. Методы контроля течей по влажности и радиоактивности обладают достаточно высокой чувствительностью (примерно 10...100 л/ч для условий реакторов типа ВВЭР-440), однако имеют существенный недостаток, заключающийся в том, что они не указывают место появления течи.

Места появления течи позволяют определить методы контроля, основанные на контроле шумов, например системы СКТТ. Отмечено, что недостатком этого метода является то, что он обладает малой чувствительностью (для условий реакторов ВВЭР-440 от 300 л/ч и выше или 80 г/с). Проведенные нами эксперименты показали, что путем специальных исследований можно определить число акустических датчиков и по выбору расстояния между ними достичь чувствительности до 45 г/с и ниже.

Анализ зависимости величины минимальной чувствительности с числом и расположением датчиков показывает, что в каждом конкретном случае эту проблему следует тщательно исследовать и выдать конкретные предложения по структуре системы контроля течи по акустическим шумам, что является вполне реальным в случае проектирования и применения конкретной системы течи. В ПО СКТТ, действующей на энергоблоке №2 ААЭС, с этой целью введено дополнение, реализующее данное предложение.

Известны условия достаточности чувствительности систем контроля течи в виде

$$Q_{\text{чувств}} \leq Q_{\text{комн}} / 10, \quad Q_{\text{чувств}} \leq Q(\text{Скр} / 2), \\ Q_{\text{чувств}} \leq Q(\text{Скр} - \Delta C_N), \quad Q_{\text{чувств}} \leq Q(\text{Скр}) / 10,$$

где $Q_{\text{комн}}$ – минимальный расход теплоносителя из первого контура, который может быть компенсирован аварийными жидкостными насосами; $Q(\text{Скр}/2)$ – течь, соответствующая трещине в два раза меньше критической; $Q(\text{Скр} - \Delta C_N)$ – течь, соответствующая трещине критического размера, уменьшенного на ΔC_N , равной подросту трещины $(\text{Скр} - \Delta C_N)$ до критического размера в течение одного года эксплуатации; $Q(\text{Скр})$ – течь через трещину критического размера.

В условия достаточности чувствительности входит ряд параметров, которые устанавливаются после реализации другой задачи – оптимизации структуры измерительной аппаратуры. Иначе говоря, в данном случае имеем две взаимосвязанные задачи: первая – установление значения минимально допустимой чувствительности, вторая – оптимизация программно-технического комплекса системы путем реализации иерархического алгоритма локализации течи [3].

Как видно из приведенных условий, для определения предела чувствительности контроля утечки необходимо иметь параметры, входящие в них, причем эта процедура может быть реализована по результатам решения задачи определения оптимальной конфигурации расчетных массивов. Таким образом, необходимо решить две взаимосвязанные задачи по итерационной процедуре:

- определение оптимальной структуры и конфигурации массивов по алгоритмам;

- определение минимальной чувствительности системы, реализующей приведенные условия достаточности чувствительности. Эта процедура может быть реализована итерационно.

Изложенная схема численно не реализована и не испытана вообще, поэтому нет конкретных заключений для утверждений о надежности и точности вычислительной схемы. Отметим, что проблема сначала решается автономно, затем осуществляется синтез двух сложных процессов по практической реализации концепции «Течь перед разрушением».

4. Определение расхода протечки (интенсивность истечения через сквозную трещину). В концепции течь перед разрывом, как важному параметру при авариях, особое внимание уделяется определению объема компенсации теплоносителя.

Динамика жидкости описывается нестационарным уравнением сохранения энергии Бернулли, которое для линии тока, соединяющей открытый конец трубопровода с выходным сечением трещины, имеет вид

$$\Delta P = P - P_{ат} = P_c + P_a = \frac{1}{2}(1 + \xi)\rho V^2 + \rho \int_r \frac{\partial u_s}{\partial t} dr, \quad (1)$$

где P_c – перепад давления, обусловленный конвективными ускорениями и диссипацией энергии на поверхности трещины; P_a – перепад давления, обусловленный локальными ускорениями; ξ - коэффициент гидравлического сопротивления; ρ - плотность жидкости, t/m^3 ; v – скорость течения в струе; u_s – тангенциальная составляющая скорости течения воды в трубопровод; t – время. Если считать $P_a \ll P_c$, то поле течения ведет себя как квазистационарное [4,5].

Решая приведенное уравнение (1) относительно V , находим

$$V = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi}} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}},$$

где ξ определяется выражением

$$\xi = \xi_m + \xi_{тр}, \quad (2)$$

ξ_m – коэффициент местного сопротивления входа жидкости в трещину; $\xi_{тр}$ – коэффициент сопротивления трению, обусловленный вязкими свойствами жидкости. Коэффициент сопротивления для круглых отверстий (цилиндрических и конечных) можно заменить на круглое отверстие с эквивалентным диаметром D_r [4]. Как известно, форма трещины близка к эллипсу, в силу этого D_r можно вычислить по формуле

$$A = \pi C V_{max},$$

где V_{max} – половина максимального раскрытия, которое наблюдается в центре трещины. Коэффициент местного сопротивления имеет следующие значения: $\xi_m = 0,5$ ($h < 0,2 D_r$) – отверстие в тонкой стенке; $\xi_m = 1,0$; $\xi_m = 3...4$ для конически расходящихся отверстий в тонкой стенке.

Для оценки коэффициента сопротивления трению $\xi_{тр}$ необходимо иметь число Рейнольдса [5]

$$Re = \frac{D_r}{\nu} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}, \quad (3)$$

где ν - кинетический коэффициент вязкости для холодной воды, $\nu = 1,01 \cdot 10^{-6}$ м/с.

Отметим, что при $Re > 10$ (3) влияние вязкости воды можно не учитывать и полагать $\xi_{тр} = 0$. Если учесть влияние шероховатости поверхности трещины на коэффициент сопротивления трению $\xi_{тр}$ и принять во внимание суть модели, где струя рассматривается как течение сквозь ряд узких щелей, расположенных вдоль линии трещины, и для нее справедлива формула Дарси - Вейсбаха, то для $\xi_{тр}$ на поверхности трубы в результате будем иметь

$$\xi_{тр} = \mu h_0/D_0, \quad (4)$$

где $D_0 = f(\delta)$ - эквивалентный диаметр трубы; $\mu = \sqrt{2lg/D_0/\Delta + 1,14}$ - поправочный коэффициент; Δ - шероховатость, как правило, песочная, $\delta \rightarrow 0$, $\mu \rightarrow \infty$. Чтобы обойти трудности, связанные с предельным переходом, предлагается использовать выражение

$$\mu = \frac{\Delta}{zD_c},$$

где Z - некоторый коэффициент, характеризующий силу трения на поверхности трещины; при $\Delta > \delta/5$ следует принять $Z = 1$.

Для определения поправочного коэффициента (предложена другая формула, учитывающая Δ как песочную шероховатость [5]:

$$\mu = 0,11 \left(\frac{\Delta}{D_c} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}. \quad (5)$$

Сравнения результатов для коэффициентов (дали следующие значения: $\mu_1 = 0,056$ (определено из первого уравнения для μ); $\mu_2 = 0,1$ (определено из второго уравнения) и $\mu_3 = 0,062$ (соответственно из третьего уравнения). Характеристика трения на поверхности трещины значительно отличается от песочной шероховатости, поэтому рекомендуется пользоваться формулой μ_2 , полагая в ней $Z=1$, понимая под шероховатостью некоторую эквивалентную шероховатость поверхности трещины, которая определяется экспериментально. При анализе кинетики течи следует учитывать коэффициент сжатия $\varepsilon = A_{сж}/A$.

Изложенный алгоритм нами не испытан и не включен в ПО системы контроля течи, хотя он позволил бы построить более эффективный путь определения расхода протечки, что важно при применении концепции «Течь перед разрушением». Для расчета объемного расхода предложена формула

$$Q = \varepsilon \sqrt{\frac{2(P - P_{ат})}{\rho}} \int_0^c \frac{4V^2(x)dx}{\sqrt{(1 + \xi_M)V^2(x) + \Delta_{экв}h}}. \quad (6)$$

Эта формула использована для расчета объемного расхода, в которой выбор ξ_M и $\Delta_{экв}$ предлагается определить экспериментально.

Для оценки минимальной величины протечки в СКТТ по показаниям двух соседних датчиков предложена эмпирическая формула

$$G = L10 \frac{u_1 + u_2 + aX_{эф}}{40}, \quad (7)$$

где L – коэффициент пропорциональности; u_1, u_2 – уровни фоновых шумов и показаний фоновых шумов на соседних датчиках; a – коэффициент ослабления сигналов; $X_{эф}$ – эффективная длина петли.

Из (7) видно, насколько важны точность локализации места протечки и тем самым определение расхода протечки, откуда следует, что от точности локализации утечки в значительной степени зависит и расход протечки. Следовательно, в проблеме локализации утечки особое внимание должно быть уделено ее надежности и экспериментальному подтверждению результатов расчета. На основе этих результатов в ПО СКТТ включен разработанный в институте «Арматом» новый программный комплекс локализации протечки, близкий по форме зависимости значений сигналов от величины протечки [6]. Однако надо отметить, что в дальнейшем следует вопрос этой зависимости проверить экспериментально.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Петросян В.Г., Шахвердян С.В., Асатрян В.Г.** Опыт эксплуатации системы контроля течи теплоносителя (СКТТ) на энергоблоке №2 Армянской АЭС // Теплоэнергетика. -2001.- №12. -С.22-25.
2. **Маркосян Г.Р., Петросян В.Г., Шахвердян С.В., Асланян М.А.** Совершенствование диагностической системы «Alus» для определения места течи теплоносителя из первого контура ВВЭР-440// Теплоэнергетика.-2000.- №5. -С.15-20.
3. **Петросян В.Г., Маркосян Г.Р., Шахвердян С.В.** Иерархический алгоритм локализации протечки из первого контура ВВЭР-440 // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. –2001. – Т.54, №1.-С.47-51.
4. **Справочник по гидравлике / В.А. Большаков и др.** – Киев: Высшая школа, 1984.- 343 с.
5. **Кескинен К.** Динамическая устойчивость труб под воздействием реактивных сил, возникающих при истечении жидкости из сквозной окружной трещины // Теоретические основы инженерных расчетов. 1988. №2. – 72 с.
6. **Петросян В.Г.** Комплекс алгоритмов интегральной системы мониторинга и диагностики АЭС с ВВЭР-440// Изв. НАН РА и ГИУА. Сер.ТН.-2004.- Т.57, №1.- С.94-99.

НИИ «Арматом». Материал поступил в редакцию 10.12.2004.

Վ.Գ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

ՋԵՐՄԱՏԱՐԻ ԱՐՏԱՀՈՍՔԻ ՎԵՐԱՀՄԿՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԸ ԵՎ ՎԵՐՁԻՆԻՄ

ԸՆԴՀԱՆՈՒՄ ԲԱՅԵՐԱՅՈՒՄԻՑ ԱՌԱՋ ԾՋՏԱԳՈՐԾՄԱՆ ՀՆԱՐԱՎՈՐՈՒԹՅՈՒՆԸ ՀԱՅԵՑԱԿԱՐԳՈՒՄ

Առաջարկվում է Հայկական ԱԷԿ-ի երկրորդ էներգաբլոկի ջերմատարի արտահոսքի վերահսկման արագորոշիչ համակարգի առաջին կոնտուրից արտահոսքի ծախսի որոշման ավտորիթմը համալրել լրացուցիչ ուղղող գործակիցներով:

V. G. PETROSYAN

COOLANT LEAKAGE MONITORING SYSTEM AND POSSIBILITIES TO USE IT FOR LBB CONCEPT

A complement to introducing correlation factors to the algorithm of primary coolant leakage flow rate definition is proposed for coolant leakage monitoring system in Armenian NPP unit N 2.