

Хадж Фараджаллах Даббах А. *, К. В. Скалозубов, С. Л. Волошина

*Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев
* Одесский национальный политехнический университет*

НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ТЕПЛОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ УПРАВЛЕНИИ АВАРИЯМИ С МЕЖКОНТУРНЫМИ ТЕЧАМИ В ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВКАХ С ВВЭР

Приведены основные результаты исследований по вопросам технических обоснований мероприятий повышения безопасности АЭС Украины, связанные с анализом неустойчивости теплогидродинамических процессов при управлении авариями с межконтурными течами.

Ключевые слова: водо-водяной энергетический реактор (ВВЭР), быстродействующее редуцирующее устройство сброса среды в атмосферу (БРУ-А), система аварийного охлаждения зоны (САОЗ), отчеты по анализу безопасности (ОАБ); теплогидродинамическая неустойчивость.

Отраслевыми программами повышения безопасности и модернизации АЭС Украины и рекомендациями МАГАТЭ для энергоблоков с ВВЭР определено первоочередное решение целого ряда задач и внедрение организационно-технических мероприятий, среди которых одним из приоритетных является повышение надежности управления авариями с межконтурными течами. Основные причины такого положения связаны с тем, что:

1) аварии с межконтурными течами (из 1-го контура во 2-й) являются доминантными вкладчиками в показатели безопасности (по результатам углубленного анализа безопасности вероятностными и детерминистскими методами в ОАБ АЭС с ВВЭР);

2) аварии с межконтурными течами являются одними из наиболее сложных как в отношении непосредственной идентификации исходного события, так и в отношении алгоритмов управления аварийными процессами для обеспечения выполнения необходимых функций безопасности;

3) для ликвидации последствий и управления такими авариями ключевыми является надежность работоспособности паросбросных устройств 2-го контура (особенно быстродействующих редуцирующих устройств БРУ-А, отказ которых на закрытие может привести к недопустимым радиационным выбросам в окружающую среду) и САОЗ, обеспечивающих подкритичность реактора, необходимое охлаждение и регулирование давления в процессе развития аварийных процессов.

Поэтому первоочередными вопросами повышения надежности и безопасности управления авариями с межконтурными течами для АЭС с ВВЭР являются:

квалификация (обоснование работоспособности) и модернизация БРУ-А для запроектных условий аварийных процессов;

повышение надежности подачи и регулирования расхода от САОЗ для обеспечения выполнения необходимых функций безопасности.

Проведенный анализ показывает, что достаточно обоснованное решение этих задач связано, в том числе, с моделированием и надежной оценкой условий возникновения неустойчивости теплогидродинамических процессов в системе БРУ-А и САОЗ. Так, для непроектных режимов истечения двухфазной среды в системах БРУ-А возникновение теплогидродинамической неустойчивости может привести к недопустимым (в отношении надежной работоспособности) гидроударам на рабочие органы клапанов БРУ-А, а соответственно и к их отказам. Возникновение теплогидродинамической неустойчивости при регулировании расхода САОЗ в процессе аварий приводит не только к неэффективности регулирования, но и к дополнительным отрицательным эффектам (автоколебательные процессы, высокочастотные циклические динамические и термические нагрузки, термошок конструкций реактора и др.).

© Хадж Фараджаллах Даббах А., К. В. Скалозубов, С. Л. Волошина, 2012

Вопросам изучения механизмов/причин возникновения различных видов теплогидродинамической неустойчивости (ТН), а также определение условий и мероприятий по устранению ТН в энергетическом оборудовании при нормальных условиях эксплуатации посвящено много теоретических и экспериментальных исследований. Однако вопросы моделирования, анализа и устранения причин ТН при аварийных процессах на АЭС с ВВЭР изучены недостаточно (в том числе и в отношении БРУ-А и САОЗ при управлении авариями с доминантными для безопасности межконтурными течами), что и определяет актуальность работы.

Основными причинами и механизмами возникновения разных видов ТН (апериодической, низкочастотной и термоакустической) в двухфазных потоках энергооборудования и трубопроводов являются условия протекания процессов межфазного взаимодействия и теплопереноса, для однофазных несжимаемых сред – неэффективность организации регулирования теплогидродинамических параметров (расхода, давления, температуры, уровня и др.)

Анализ известных методов квалификации БРУ-А в неперекрестных двухфазных режимах определил их применимость только для квазистационарных динамических нагрузок. В отношении надежной работоспособности БРУ-А более значимыми являются нестационарные гидроудары на рабочие органы, которые могут быть вызваны межканальной теплогидродинамической неустойчивостью в системе паропроводов.

Ниже приведен консервативный метод квалификации БРУ-А в условиях нестационарных гидроударов, вызванных межканальной теплогидродинамической неустойчивостью (МТН) двухфазных потоков в системе паропроводов. Основные положения разработанного метода следующие:

1) консервативно полагается, что возникновение межканальной ТН приводит к недопустимым нагрузкам для работоспособности клапанов БРУ-А;

2) анализ неустойчивости проводится в «малом» приближении методом D-разбиения на основе линеаризации неравновесной нестационарной модели двухфазных потоков, верифицированной и валидированной для оборудования ВВЭР.

Применительно к двухфазным потокам в системе параллельных паропроводов БРУ-А механизм возникновения МТН следующий:

Флуктуационное увеличение расхода жидкости ($\uparrow \delta G_{ж}$) в одном канале приводит к флуктуационному увеличению массы ($\uparrow \delta M$) и расхода ($\uparrow \delta G$), а соответственно и к увеличению диссипативных потерь потока на трение ($\uparrow \delta P_{TP}$). При определяющем влиянии диссипативных потерь на трение такая цепь событий приведет к относительному снижению давления ($\downarrow \delta P$) в 1-м канале, что в соответствии с критерием Рэлея определяет устойчивость процесса:

$$\left. \begin{array}{l} \uparrow \delta G_{ж} \Rightarrow \uparrow \delta M \Rightarrow \uparrow \delta G \Rightarrow \uparrow \delta P_{TP} \Rightarrow \downarrow \delta P \\ \text{или} \\ \downarrow \delta G_{ж} \Rightarrow \downarrow \delta M \Rightarrow \downarrow \delta G \Rightarrow \downarrow \delta P_{TP} \Rightarrow \uparrow \delta P \end{array} \right\} \text{ процесс устойчив в 1 - м канале}$$

Во 2-м параллельном канале (паропроводе) при флуктуационном увеличении расхода жидкости в 1-м канале произойдет соответствующее уменьшение расхода, которое в этих условиях приведет к следующей цепи событий в 2-м канале:

$$\left. \begin{array}{l} \downarrow \delta G_{ж} \Rightarrow \downarrow \delta M \Rightarrow \downarrow \delta G \Rightarrow \downarrow \delta P_{TP} \Rightarrow \uparrow \delta P \\ \text{или} \\ \uparrow \delta G_{ж} \Rightarrow \uparrow \delta M \Rightarrow \uparrow \delta G \Rightarrow \uparrow \delta P_{TP} \Rightarrow \downarrow \delta P \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{ процесс устойчив в системе} \\ \text{ параллельных каналов} \end{array}$$

Вместе с тем флуктуационное возмущение расхода жидкости $\delta G_{ж}$ приведет также и к изменению массы паровой фазы (δM_{II}), образующейся в процессе адиабатного вскипания потока, и к соответствующему изменению давления:

$$\left. \begin{array}{l} \uparrow \delta G_{жс} \Rightarrow \uparrow \underline{\delta M} \Rightarrow \uparrow \delta M_{II} \Rightarrow \uparrow \underline{\delta P} \\ \text{или} \\ \downarrow \delta G_{жс} \Rightarrow \downarrow \underline{\delta M} \Rightarrow \downarrow \delta M_{II} \Rightarrow \downarrow \underline{\delta P} \end{array} \right\} \text{процесс не устойчив в 1-м канале}$$

Для 2-го канала и всей системы в данном случае процесс будет также неустойчив:

$$\left. \begin{array}{l} \downarrow \delta G_{жс} \Rightarrow \downarrow \underline{\delta M} \Rightarrow \downarrow \delta M_{II} \Rightarrow \downarrow \underline{\delta P} \\ \text{или} \\ \uparrow \delta G_{жс} \Rightarrow \uparrow \underline{\delta M} \Rightarrow \uparrow \delta M_{II} \Rightarrow \uparrow \underline{\delta P} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{процесс не устойчив в системе} \\ \text{параллельных каналов} \end{array}$$

При относительно небольших расходах потока, когда становится существенной гравитационная составляющая (H) перепада давлений ΔP в параллельных каналах, может возникнуть дополнительная цепь событий, дестабилизирующая устойчивость процесса межканальной циркуляции:

$$\left. \begin{array}{l} \uparrow \delta G_{жс} \Rightarrow \uparrow \delta M \Rightarrow \uparrow \delta H \Rightarrow \uparrow \delta \Delta P_{1-2} \\ \text{или} \\ \downarrow \delta G_{жс} \Rightarrow \downarrow \delta M \Rightarrow \downarrow \delta H \Rightarrow \downarrow \delta \Delta P_{1-2} \end{array} \right\} \text{поток не устойчив}$$

Доминирование приведенных механизмов развития МТН зависит от состояния двухфазного потока и конструкционно-технических параметров системы БРУ-А.

Консервативный метод оценки условий возникновения МТН в системе БРУ-А основан на общеизвестном методе оценки границ области теплогидродинамической неустойчивости двухфазных потоков в «малом приближении», который получил широкое экспериментальное подтверждение и практическое применение для различных видов теплогидродинамической неустойчивости [1 - 4].

Другие основные допущения и положения при оценке критерия квалификации БРУ-А при нестационарных двухфазных гидроударах заключаются в следующем:

1) система параллельных идентичных паропроводов к клапану БРУ-А полагается акустически изолированной, так как объемы паропроводов значительно меньше объема парогенератора и паропроводов транспортной магистрали;

2) область ожидаемых частот возмущений определяется временем прохождения потока в паропроводах и составляет

$$\pm 100\% \frac{G}{\rho FL} .;$$

3) при анализе неустойчивости в трубопроводной системе БРУ-А клапан и участок на входе в параллельные паропроводы рассматривается как сосредоточенные элементы гидравлического сопротивления с коэффициентами местного сопротивления $\xi_{\text{вых}}$ и $\xi_{\text{вх}}$ соответственно, которые определяются конструкционно-техническими характеристиками;

4) в качестве математической модели двухфазного потока трубопроводной системы БРУ-А применяется неравновесная модель, которая входит в состав теплогидравлического кода RELAP5/M3.2, верифицированного и валидированного для условий оборудования и трубопроводов ВВЭР.

При допущениях о пренебрежении внешними потерями тепла, силами гравитации потока и неравновесности на межфазных границах математическая модель неравновесного двухфазного потока RELAP5/M3.2 в одномерном приближении может быть сведена к следующему виду:

$$F \frac{\partial \rho_{ж} \varphi_{ж}}{\partial t} + F \frac{\partial \rho_{II} \varphi_{II}}{\partial t} + \frac{\partial G_{ж}}{\partial z} + \frac{\partial G_{II}}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \rho_{II} F \varphi_{II} \frac{\partial W_{II}}{\partial t} + \rho_{жс} F \varphi_{жс} \frac{\partial W_{жс}}{\partial t} + G_{II} \frac{\partial W_{II}}{\partial z} + G_{жс} \frac{\partial W_{жс}}{\partial z} = \\ & = -\xi \frac{G^2 \Pi_{см}}{8 \rho F^2} - F \frac{\partial P}{\partial z} + \Gamma_{II} F (W_{II} - W_{жс}), \end{aligned} \quad (2)$$

$$F \frac{\partial}{\partial t} [\rho_{жс} \varphi_{жс} i_{жс} + \rho \varphi_{II} i_{II}] + \frac{\partial G_{II} i_{II}}{\partial z} + \frac{\partial G_{жс} i_{жс}}{\partial z} = F \frac{\partial P}{\partial t}, \quad (3)$$

$$F \frac{\partial \rho_{II} \varphi_{II}}{\partial t} + \frac{\partial G_{II}}{\partial z} = F \Gamma_{II}, \quad (4)$$

где $\rho_{жс}$, ρ_{II} – плотность жидкости и пара соответственно; G , G_{II} , $G_{жс}$ – соответственно расход смеси, пара и жидкости ($G = G_{II} + G_{жс}$; $x = G_{II}/G$); W_{II} , $W_{жс}$ – средняя по сечению скорость пара и жидкости; z , t – продольная координата и время; P – давление теплоносителя; ξ – приведенный коэффициент гидродинамических потерь; $\Pi_{см}$ – смоченный периметр сечения проточной части; $i_{жс}$, i_{II} – удельная энтальпия жидкости и пара соответственно; φ – истинное объемное паросодержание ($\varphi_{жс} + \varphi_{II} = 1$); F – площадь проходного сечения проточной части; Γ_{II} – приведенная на единицу площади интенсивность межфазного теплообмена

Начальные и граничные условия модели для I и II каналов:

$$\begin{aligned} P_I(z=0, t=0) &= P_{II}(z=0, t=0) = P_0 - \xi_{BX} \frac{G^2}{2 \rho F^2} \\ G_{II0I}(z=0, t=0) &= G_{II0II}(z=0, t=0) = G_{II0} \\ G_{жс0I}(z=0, t=0) &= G_{жс0II}(z=0, t=0) = G_{жс0} \\ \varphi_I(z=0, t=0) &= \varphi_{II}(z=0, t=0) = \varphi_0 \\ P_I(z=L) &= P_{II}(z=L) = P_a + \xi_{ВЫХ} \frac{G^2}{2 \rho F^2} \end{aligned} \quad (5)$$

В соответствии с представленным методом «малого приближения» модель и краевые условия линейризуются и интегрально преобразуются по $La[y(z, t)] = \tilde{y}(z, s = j\omega)$ к следующему виду:

$$\begin{aligned} \frac{d\tilde{y}}{dz} &= A \tilde{y}, \\ \tilde{y}(z=0) &= \tilde{y}_0 \end{aligned} \quad (6)$$

где $\tilde{y} = col\{\tilde{\delta G}_{жс}, \tilde{\delta P}, \tilde{\delta G}_{II}, \tilde{\delta \varphi}\}$; P – давление в потоке; P_a – атмосферное давление; $G_{жс}$ – расход жидкости; G_{II} – расход пара; φ – истинное объемное паросодержание; A – соответствующая квадратная матрица коэффициентов a_{ij} , зависящая от невозмущенного распределения параметров потока и ожидаемой частоты возмущений ω :

$$A = \begin{pmatrix} a_{11}(z, \omega) & a_{12}(z, \omega) & a_{13}(z, \omega) & a_{14}(z, \omega) \\ a_{21}(z, \omega) & a_{22}(z, \omega) & a_{23}(z, \omega) & a_{24}(z, \omega) \\ a_{31}(z, \omega) & a_{32}(z, \omega) & a_{33}(z, \omega) & a_{34}(z, \omega) \\ a_{41}(z, \omega) & a_{42}(z, \omega) & a_{43}(z, \omega) & a_{44}(z, \omega) \end{pmatrix}$$

Решение уравнений (6) имеет вид

$$\tilde{y} = \Phi(z, \omega) \cdot \tilde{y}_0$$

где фундаментальная матрица решений

$$\Phi = \begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} & f_{14} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} & f_{24} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} & f_{34} \\ f_{41} & f_{42} & f_{43} & f_{44} \end{pmatrix}.$$

Решения фундаментальной матрицы решений определяется численным интегрированием системы уравнений

$$\frac{df_{ij}}{dz} = a_{ij} f_{ij}$$

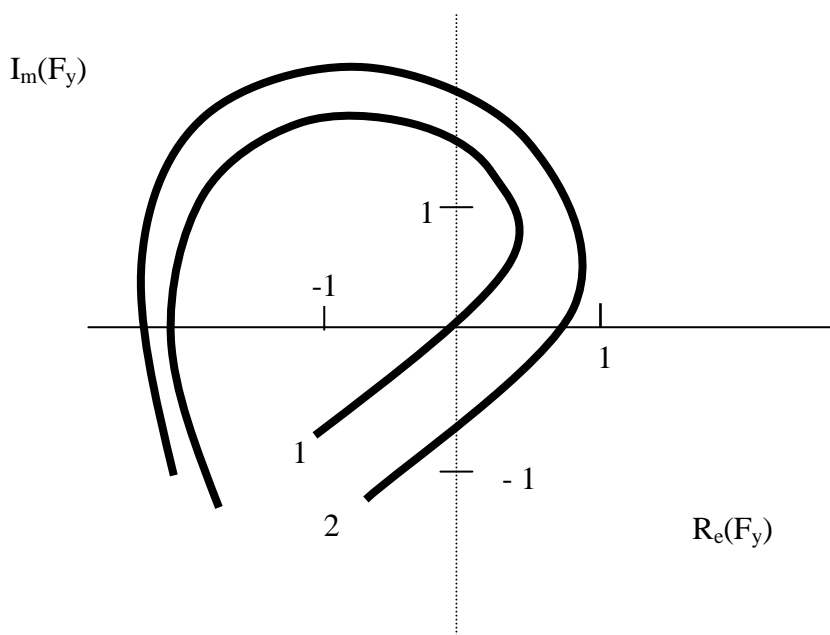
$$f_{ij}(z = 0) = \begin{cases} 1, & \text{если } i = j \\ 0, & \text{если } i \neq j \end{cases}$$

Тогда характеристическое уравнение системы с учетом краевых условий

$$F_y(s) = f_{21}(z = L) = 0. \tag{7}$$

Для анализа поведения годографа характеристического уравнения F_y используется классический метод D-разбиения. Для каждого конкретного режима и фиксированного значения ω численно определяется точка характеристического уравнения на комплексной плоскости F_y . Варьируя значения ω в области ожидаемых частот, можно построить годограф характеристического уравнения для заданного режима. Область, расположенная слева от кривой при ее обходе с возрастанием ω , является претендентом на область устойчивости. Окончательное суждение о выделенной области можно вынести, построив кривые D-разбиения для заведомо устойчивого процесса (например, без двухфазности). Если точки годографа принадлежат устойчивой области, то рассматриваемый режим устойчив. Если через точку заведомо устойчивого процесса проходит кривая D-разбиения, то режим находится на границе устойчивости. Остальные годографы относятся к области неустойчивости.

На рисунке показано поведение годографа характеристического уравнения F_y в комплексной плоскости $R_e(F_y) - I_m(F_y)$ для условий устойчивого потока и на границе неустойчивости.



Поведение годографа характеристического уравнения F_y в комплексной плоскости ожидаемых частот возмущения: 1 – условия на границе устойчивости ($G = 30\%$ максимальной пропускной способности); 2 – устойчивый режим ($G > 30\%$ максимальной пропускной способности).

В результате проведенного анализа условий возникновения ТН также установлено, что использование/планируемое использование для АЭС с ВВЭР регуляторов, осуществляющих регулирование расхода от САОЗ по отклонениям давления теплоносителя и/или запасов температуры теплоносителя до кипения в 1-м контуре, является не только неэффективным, но и отрицательным мероприятием в отношении надежности реакторного оборудования. При указанных уставках регулирования в напорных магистралях САОЗ в определенных условиях межконтурной течи может возникнуть низкочастотная колебательная неустойчивость, приводящая к автоколебательным процессам, последствиями которых являются дополнительные циклические термодинамические нагрузки. При этом скорость расхолаживания конструкций реактора в автоколебательных процессах на порядок (и более) выше допустимых по проекту скоростей при аварийных режимах (60 °С/ч).

Теоретические обоснования условий возникновения автоколебательных процессов, вызванных теплогидравлической неустойчивостью регулирования расхода от САОЗ, подтверждаются известными результатами моделирования аварий с межконтурными течами кодом RELAP 5, верификационного и валидированного для оборудования ВВЭР.

Для обеспечения эффективного и безопасного регулирования расхода от САОЗ при авариях с межконтурными течами целесообразны разработка и применение регуляторов, учитывающих скорость перемещения рабочих органов, скорость изменения теплогидродинамических параметров и конфигурации систем, обеспечивающих охлаждение активной зоны реактора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хабенский В.Б., Герлига В.А. Нестабильность потока теплоносителя в элементах энергооборудования. - СПб: Наука, 1994.
2. Герлига В.А., Скалозубов В.И. Двухфазные потоки в энергооборудовании АЭС. - М.: Энергоатомиздат, 1992.
3. Коврижкин Ю.Л., Скалозубов В.И. Термоакустическая неустойчивость ВВЭР. - Одесса: ТЭС, 2003.
4. Скалозубов В.И., Билей Д.В., Габлая Т.В. и др. Развитие и оптимизация систем контроля атомных электростанций с ВВЭР. – Чернобыль: ИПБ АЭС НАН Украины, 2008.

Хадж Фараджаллах Даббах А., К. В. Скалозубов, С. Л. Волошина

НЕСТІЙКОСТІ ТЕПЛОГІДРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ УПРАВЛІННІ АВАРІЙ З МІЖКОНТУРНИМИ ТЕЧАМИ В ЯДЕРНИХ ЕНЕРГОУСТАНОВКАХ ІЗ ВВЕР

Наведено основні результати досліджень з питань технічних обґрунтувань заходів підвищення безпеки АЕС України, пов'язані з аналізом нестійкості теплогидродинамічних процесів при управлінні аваріями з міжконтурними течами.

Ключові слова: водо-водяний енергетичний реактор (ВВЕР), швидкодіючий редуційний пристрій скидання середовища в атмосферу, система аварійного охолодження зони високого тиску.

Haj Farajallah Dabbach A., K. V. Skalozubov, S. L. Voloshina

INSTABILITY WARMHYDRODYNAMICS PROCESSES IN MANAGING THE ACCIDENT BETWEEN THE CONTOURS LEAKS IN NUCLEAR POWER PLANTS WITH WWER

The paper presents the main results of studies on technical rationale of improving the safety of Ukrainian NPPs associated with the analysis of instability warmhydrodynamics processes in the management of accidents between the contours leaks.

Keywords: water-water power reactor (VVER), high-speed reduction-relief device environment in the atmosphere, system of emergency cooling zone of high pressure.

Поступила в редакцію 20.01.11