

КОНСЕРВАТИВНОЕ ОБОСНОВАНИЕ КВАЛИФИКАЦИИ БРУ-А ВВЭР-1000 В РЕЖИМАХ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ДВУХФАЗНОЙ СРЕДЫ

© 2010 г. В. И. Скалозубов, А. А. Ключников, Хадж Фараджаллах Даббах А.*

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

Впервые представлены обоснования и условия возникновения гидроударов в системе БРУ-А ВВЭР, вызванных межканальной теплогидродинамической неустойчивостью двухфазной среды. Консервативно полагается, что возникновение гидроударов, вызванных неустойчивостью двухфазного потока, определяет неработоспособность клапанов БРУ-А на закрытие. Установлено, что режимы гидроударов в БРУ-А ВВЭР 1000 (В-320) при полностью открытых клапанах являются нехарактерными для условий аварий с межконтурными течами.

Ключевые слова: быстродействующее редуцирующее устройство сброса среды в атмосферу (БРУ-А), водо-водяной энергетический реактор (ВВЭР), гидроудары, теплогидродинамическая неустойчивость, двухфазный поток.

В соответствии с международным опытом основной причиной необходимости дополнительной квалификации БРУ-А в режимах двухфазных потоков является возможность возникновения гидроударов [1, 5]. В известных экспериментах по квалификации БРУ-А ВВЭР в двухфазных потоках такие режимы не моделировались [2].

Возможной причиной возникновения гидроударов и повышенного вибрационного состояния элементов БРУ-А могут быть различные виды теплогидравлической неустойчивости потока: аperiodическая, межканальная колебательная и др. Конструкция системы трубопроводов БРУ-А 1115, 960 [6, 7] имеет два идентичных параллельных паропровода, которые при стабильном двухфазном потоке практически исключают возможность возникновения нестационарных гидроударов. Нестационарные гидроудары могут возникнуть как следствие теплогидродинамической неустойчивости двухфазного потока в трубопроводной системе БРУ-А. В соответствии с имеющимся теоретическим и экспериментальным опытом изучения различных видов теплогидродинамической неустойчивости ([9, 10]) условия в системе БРУ-А определяют возможность возникновения *межканальной теплогидродинамической неустойчивости (МТН) адиабатно вскипающего потока*, при которой автоколебания расходов в параллельных паропроводах находятся в противофазе, что и определяет возможность возникновения нестационарных гидроударов на рабочие органы клапанов БРУ-А.

Основные положения метода квалификации БРУ-А при двухфазных гидроударах

Для квалификации БРУ-А консервативно принимается, что при возникновении МТН нестационарные гидроудары нарушают работоспособность рабочих органов клапанов, не квалифицированных для условий двухфазных потоков.

Механизм возникновения МТН в системе БРУ-А можно охарактеризовать на основе общепринятого термодинамического принципа Рэлея (см. например, [9,10]), согласно которому, если в изолированную систему одновременно подводится (отводится) масса и увеличивается (уменьшается) давление, то в системе возникают самоподдерживающиеся автоколебания за счет преобразования внутренней энергии потока. Применительно к двухфазным потокам в системе параллельных паропроводов БРУ-А механизм возникновения МТН следующий:

1. 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 ($\uparrow \delta P_{тр}$). При определяющем влиянии диссипативных потерь на трение такая цепь событий приведет к относительному снижению давле-

ния ($\downarrow \delta P$) в 1-м канале, что в соответствии с критерием Рэлея определяет устойчивость процесса:

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

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 во 2-м канале:

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

2. 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:

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

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

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

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

$$\left. \begin{array}{l} \uparrow \delta G_{ж} \Rightarrow \uparrow \delta M \Rightarrow \uparrow \delta H \Rightarrow \uparrow \delta \Delta P_{1-2} \\ \text{или} \\ \downarrow \delta G_{ж} \Rightarrow \downarrow \delta M \Rightarrow \downarrow \delta H \Rightarrow \downarrow \delta \Delta P_{1-2} \end{array} \right\} \text{процесс неустойчив}$$

Доминирование приведенных механизмов развития МТН зависит от состояния двухфазного потока и конструктивно-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 [9, 10 и др.].

Суть метода заключается в следующем:

1. Математическая модель двухфазного потока в виде нестационарных уравнений теплогидродинамики, а также соответствующих начальных и граничных условий потока линеаризуется и трансформируется интегральным преобразованием Лапласа по параметру $s = j\omega$, характеризующему частоту возмущений ω ($j^2 = -1$).

В результате определяется характеристическое уравнение F_y системы, знаки корней a_k которого определяют устойчивость процесса. Если хотя бы один $a_k > 0$, то система неустойчива.

2. Для анализа знаков корней характеристического уравнения используется классический метод D-разбиения (подробно изложенный, например, в [9, 10]), основанного на анализе поведения годографа характеристического уравнения в комплексной плоскости $\text{Re}(F_y) - \text{Im}(F_y)$ в области ожидаемых частот возмущений.

3. Границы области теплогидродинамической неустойчивости определяются варьированием режимных параметров двухфазного потока. В данном случае варьировались значения стационарного расхода двухфазного потока в диапазоне от 10 до 100 % от максимальной пропускной способности БРУ-А.

Критерием расчетно-экспериментальной квалификации БРУ-А 1115, 960 при нестационарных двухфазных гидроударах является отсутствие возникновения межканальной теплогидродинамической неустойчивости.

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, т.к. 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 конструктивно-техническими характеристиками;

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

Начальные и граничные условия модели для 1-го и 2-го каналов следующие:

$$\begin{aligned} P_I(z=0, t=0) &= P_{II}(z=0, t=0) = P_0 - \xi_{\text{ВХ}} \frac{G^2}{2\rho F^2} \\ G_{\text{ПОI}}(z=0, t=0) &= G_{\text{ПОII}}(z=0, t=0) = G_{\text{ПО}} \\ G_{\text{ЖOI}}(z=0, t=0) &= G_{\text{ЖOII}}(z=0, t=0) = G_{\text{ЖO}} \\ \varphi_I(z=0, t=0) &= \varphi_{II}(z=0, t=0) = \varphi_0 \\ P_I(z=L) &= P_{II}(z=L) = P_a + \xi_{\text{ВЫХ}} \frac{G^2}{2\rho F^2} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} \frac{d\tilde{y}}{dz} &= A\tilde{y} \quad , \\ \tilde{y}(z=0) &= \tilde{y}_0 \end{aligned} \quad (1)$$

где $\delta\tilde{y} = \text{col}\{\delta\tilde{G}_{\text{ж}}, \delta\tilde{P}, \delta\tilde{G}_{\text{п}}, \delta\tilde{\phi}\}$; P – давление в потоке; $G_{\text{ж}}$ – расход жидкости; $G_{\text{п}}$ – 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 (1) имеет вид

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

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

$$F_y(s) = f_{21}(z=L) = 0. \quad (2)$$

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.

Основные выводы

В результате проведенного расчетно-экспериментального обоснования условий возникновения гидроударов, вызванных межканальной теплогидродинамической неустойчивостью двухфазного потока, установлено:

1. Консервативный критерий квалификации БРУ-А по отсутствию нестационарных гидроударов выполняется при расходах двухфазной среды более 30 % максимальной пропускной способности.

2. Расходы двухфазного потока менее 30 % максимальной пропускной способности (область межканальной неустойчивости системы БРУ-А) являются нехарактерными для аварий, в которых срабатывание БРУ-А может происходить в режимах двухфазного истечения через клапаны.

3. Для расширения области максимальной теплогидродинамической устойчивости системы БРУ-А необходимо увеличить гидравлические сопротивления на входе в параллельные паропроводы (ξ_{BX}). Этот результат имеет достаточное экспериментальное подтверждение для рассматриваемых условий квалификации. Эффективным мероприятием по расширению области межканальной теплогидродинамической устойчивости является установка дроссельных шайб на паропроводе от парогенератора до параллельных паропроводов БРУ-А.

4. Определение более реалистичных условий возникновения недопустимых гидроударов (в отношении работоспособности по закрытию клапанов) возможно на основе дальнейших разработок нелинейного анализа межканальной теплогидродинамической неустойчивости в системе БРУ-А.

5. Полученные результаты могут быть адаптированы и для клапанов других систем в режимах двухфазного истечения с учетом их конструктивно-технических характеристик (в частности, предохранительные клапаны компенсаторов давления).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Safety issues and their ranking for WWER 1000 model 320 NPP* : IAEA-EBP-WWER-05. – Vienna: IAEA, 1996.
2. *Qualification of the Secondary Relief Valve for Water Discharge operation*: EEXDC 0038E.
3. *Qualification of Active Mechanical Equipment Used in NPP*: QME-1. – ASME Books, 2007.
4. *Моделирование аварий на ЯЭУ АЭС* / В. Н. Васильченко, В. В. Ким, В. И. Скалозубов. – Одесса: «Резон 2000», 2002. – 466 с.
5. *ETE Road Map. According to Chapter IV and V of the “Conclusions of the Melk Process and Follow-Up”*. Item 2//Qualification of Valves Final Monitoring Report to the Federal Ministry of Agriculture, Forestry, Environment and Water. Management of Austria. – Vienna, May 2005.
6. *Арматура для АЭС «Чеховский завод энергетического машиностроения»*: каталог. – М.: ЧЗЭМ, 2005. – 81 с.
7. *Паспорт на клапан запорно-дроссельный*. Обозначение 960-300/350-Э (БРУ-А). Заводской номер № 605997. Блок № 3 ЗАЭС.
8. *Клапан запорно-дроссельный*. Паспорт 1115-300/350-Э ПС (БРУ-А). – Чехов: ЧЗЭМ, 1988.
9. *Хабенский В.Б., Герлига В.А.* Нестабильность потока теплоносителя в элементах энергооборудования / РАН «Наука», 1994.
10. *Герлига В.А., Скалозубов В.И.* Двухфазные потоки в энергооборудовании АЭС. - М.: Энергоатомиздат, 1992.

КОНСЕРВАТИВНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ КВАЛІФІКАЦІЇ ШРУ-А ВВЕР-1000 В РЕЖИМАХ НЕСТІЙКОСТІ ДВОФАЗНОГО СЕРЕДОВИЩА

В. І. Скалозубов, О. О. Ключников, Хадж Фараджаллах Даббах А.*

Уперше представлено обґрунтування та умови виникнення гідроударів у системі ШРУ-А ВВЕР, викликаних міжканальною теплогідродинамічною нестійкістю двофазного середовища. Консервативно вважається, що виникнення гідроударів, викликаних нестійкістю двофазного потоку, визначає непрацездатність клапанів ШРУ-А на закриття. Установлено, що режими гідроударів у ШРУ-А ВВЕР 1000 (В-320) при повністю відкритих клапанах є нехарактерними для умов аварій з міжконтурною течєю.

Ключові слова: швидкодіюча редуційна установка скидання пари до атмосфери, вододяний енергетичний реактор, гідроудари, теплогідродинамічна нестійкість, двофазний потік.

**CONSERVATIVE GROUND OF QUALIFICATION BRU-A VVER-1000
IN MODES OF INSTABILITY OF DIPHASIC ENVIRONMENT**

V. I. Skalozubov, O. O. Klyuchnykov, Haj Farajallah Dabbach A.

The article first presents grounds and conditions of origin of hydraulic shocks in the VVER system of safety relief valves, caused interchannel heat hydrodynamic instability of biphasic medium. It is supposed conservatively that origin of hydraulic shocks caused instability of biphasic stream determines the unavailability to close of safety relief valves. It is established that the modes of hydraulic shocks in safety relief valves of VVER 1000 (B-320) at the fully opened valves are not typical for the conditions of accidents with intercontour leakages.

Keywords: fast-acting reducing valve, water-moderated reactor, hydraulic shock, heat-hydrodynamic instability, biphasic flow.

Поступила в редакцію 28.09.09