

УДК 621.039.587/.588

С. В. Васильченко¹, Т. В. Габлая², И. Л. Козлов³, В. И. Скалозубов²¹ Институт поддержки эксплуатации АЭС, г. Киев² Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, г. Киев³ Одесский национальный политехнический университет, г. Одесса

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КВАЛИФИКАЦИИ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО ЗАПОРНО-ОТСЕЧНОГО КЛАПАНА В “ЖЕСТКИХ” УСЛОВИЯХ ВОДЫ / ПАРОВОДЯНОЙ СМЕСИ

В работе представлены расчетно-эмпирические методы и критерии квалификации работоспособности быстродействующего запорно-отсечного клапана (БЗОК) при аварийных сценариях с истечением пароводяной среды из заполненного парогенератора. Истечение пароводяной среды через БЗОК возможно в условиях запроектных аварий с межконтурными течами с полными отказами функций регулирования давления и / или изоляции аварийного парогенератора по питательной воде. В результате предварительного анализа по предложенным методам определены критерии квалификации в режимах истечения пароводяной смеси через БЗОК при стабильных процессах и гидроударах.

Ключевые слова: быстродействующий запорно-отсечной клапан, запроектные аварии, квалификация, пароводяная среда.

Один из уроков аварии на АЭС Fukushima Daiichi связан с необходимостью технического обоснования работоспособности (квалификации) систем, важных для безопасности, в запроектных и “жестких” аварийных режимах. В частности, в процессе аварии были выявлены отказы пассивных систем безопасности и контроля, не требующих длительного электроснабжения [1].

Комплексной (сводной) программой повышения безопасности АЭС Украины были определены мероприятия по квалификации арматуры 2-го контура в запроектных и “жестких” условиях аварийных сценариев с “запариванием” элементов систем автоматики, а также в “непроектных” режимах истечения пароводяной среды через рабочие органы арматуры. Одним из этих мероприятий является квалификация БЗОК в возможных режимах истечения пароводяной среды.

Проведенный в [2] анализ результатов детерминистского моделирования аварийных процессов в рамках Отчетов по анализу безопасности (ОАБ) серийных энергоблоков с ВВЭР 1000 / В320 показал, что истечение пароводяной среды в трубопроводах 2-го контура возможно в условиях запроектных аварий с межконтурными течами и полными отказами функций регулирования давления и / или изоляции аварийного парогенератора по питательной воде.

Для этих условий аварийных процессов в данной работе предлагаются расчетно-эмпирические методы квалификации БЗОК для двух приближений:

установившийся режим заполнения пароводяной средой аварийного парогенератора (ПГ) — квазистабильное приближение;

режим гидроудара в БЗОК, вызванный теплогидродинамической неустойчивостью в объеме ПГ, — нестабильное приближение.

Основные положения и допущения предлагаемых методов заключаются в следующем:

1) Объем ПГ по питательной воде рассматривается как сосредоточенная система с осредненными теплогидродинамическими параметрами (рис. 1);

2) Изменения граничных условий расчетных моделей теплогидродинамических параметров расхода в течь (G_T) и удельной энтальпии теплоносителя (i_T), расхода ($G_{ПГ}$) и удельной энтальпии питательной воды ($i_{ПГ}$) определяется на основе детерминистского моделирования аварии со средней межконтурной течью;

3) Расчетная модель квалификации БЗОК на условия возможного истечения пароводяной среды представлена на рис. 1.

С учетом принятых допущений математическая модель затопления парогенератора имеет следующий вид :

$$\rho \frac{dV}{dt} = G_T + G_{ПВ} - G_B - G_{ИП} + G_K, \quad (1)$$

$$G_T(t) = \mu_T F_T \sqrt{\rho(P_P - P_{ПГ})}, \quad (2)$$

$$G_B(t) = \mu_{ПГ} F_B \sqrt{\rho_B(P_{ПГ} - P_K)}, \quad (3)$$

$$G_B i_B = G_T i_T + G_{ПВ} i_{ПВ} + (G_{ИП} - G_K)(i_{ПГ} - i_K), \quad (4)$$

$$V(t=0) = V_0, \quad (5)$$

где ρ — плотность теплоносителя; V — объем котловой воды в ПГ; t — текущее время; G_T — расход теплоносителя в течь; $G_{ПВ}$ — расход питательной воды; G_B — расход среды на БЗОК; $G_{ИП}$, G_K — интенсивность парообразования и конденсации [2],

соответственно; $\mu_T, \mu_{ПГ}$ — коэффициенты гидравлических расходов в течь и на БЗОК, соответственно [3]; F_T, F_B — площадь проходного сечения течи и паропровода БЗОК, соответственно; $P_P, P_{ПГ}, P_K$ — давления в 1-м контуре, в парогенераторе и в турбине, соответственно; ρ_B — плотность среды на БЗОК; $i_T, i_{ПГ}, i_B, i_{П}, i_K$ — удельные энтальпии теплоносителя, питательной воды, среды на БЗОК, пара и конденсата, соответственно; V_0 — объем котловой воды в ПГ на момент начала аварии.

Консервативное условие поступления пароводяной среды на БЗОК в момент затопления ПГ $t_{ПГ}$:

$$V(t_{ПГ}) \geq V_{ПГ}, \quad (6)$$

где $V_{ПГ}$ — “свободный” от металлоконструкций объем ПГ.

Условие необходимости квалификации БЗОК на пароводяной среде в квазистабильном приближении:

$$t_{ср} \geq t_{ПГ}, \quad (7)$$

где $t_{ср}$ — момент срабатывания БЗОК после начала аварийного процесса.

При поступлении пароводяной среды до момента срабатывания БЗОК доминантными нагрузками на рабочий орган (шток) являются преодоление динамического перепада давления между входной и выходной камерами проточной части клапана,

а также гидравлического сопротивления, вызванного движением штока относительно среды потока (диссипативные потери на гидравлическое сопротивление). Для этих механизмов консервативный полуэмпирический критерий квалификации БЗОК на пароводяной среде в квазистабильных режимах [2]:

$$K_{КС} = \frac{\rho_{ПГ} G_B^2}{\rho_B G_{ПГ}^2} < 1, \quad (8)$$

где $G_{ПГ}$ — пропускная способность паропровода с БЗОК.

Критерий (8) фактически отражает отношение гидродинамического воздействия в квалифицируемых условиях пароводяной среды и квалифицированного (по проектным и эксплуатационным испытаниям) воздействия на БЗОК парогазовой среды.

Определение условий и критериев квалификации в нестабильном приближении (гидроудары) основано на общих подходах теплогидродинамической неустойчивости [2]: на установившийся аварийный процесс формально накладываются “малые” флуктуационные возмущения теплогидродинамических параметров (δ), которые в зависимости от состояния системы могут либо “затухать”, либо привести к аperiodической / низкочастотной колебательной неустойчивости уровня воды в ПГ (гидроудары).

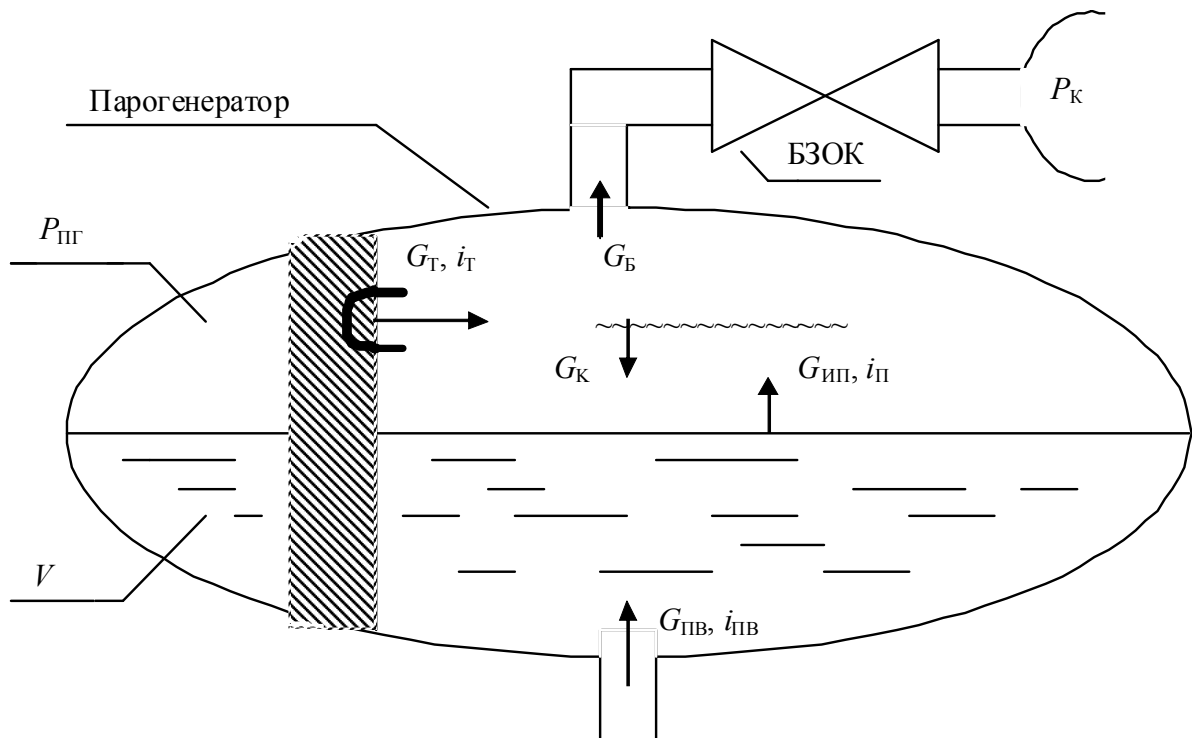


Рис. 1. Расчетная модель квалификации БЗОК на условия пароводяной среды

Математическая модель (1)—(5) в малых возмущениях δ имеет следующий вид :

$$\rho \frac{d\delta V}{dt} = \delta G_T + \delta G_{ПВ} - \delta G_B - \delta G_{ПГ} + \delta G_K, \quad (9)$$

$$\delta G_T = \mu_T F_T \sqrt{\rho} \frac{\partial}{\partial P_{ПГ}} \left[\sqrt{(P_P - P_{ПГ})} \right] \frac{\partial P_{ПГ}}{\partial V} \delta V, \quad (10)$$

$$\delta G_{ПВ} = \frac{\partial G_{ПВ}}{\partial P_{ПГ}} \frac{\partial P_{ПГ}}{\partial V} \delta V, \quad (11)$$

$$\delta G_B = \mu_{ПГ} F_B \frac{\partial}{\partial P_{ПГ}} \left[\sqrt{\rho_B (P_{ПГ} - P_K)} \right] \frac{\partial P_{ПГ}}{\partial V} \delta V, \quad (12)$$

$$\delta G_K = \frac{\partial G_K}{\partial P_{ПГ}} \frac{\partial P_{ПГ}}{\partial V} \delta V, \quad (13)$$

Тогда решение (9)—(13) относительно возмущения уровня объема пароводяной среды в ПГ сводится к решению уравнения

$$\frac{d\delta V}{dt} = K_{Гy} \delta V, \quad \delta V \sim \exp(K_{Гy} t), \quad (14)$$

где

$$K_{Гy} = -\frac{\partial P_{ПГ}}{\partial V} \cdot \frac{\mu_T F_T}{\sqrt{\rho(P_P - P_{ПГ})}} + \frac{\partial P_{ПГ}}{\partial V} \cdot \left[\frac{\mu_{ПГ} F_B}{\sqrt{\rho_B (P_{ПГ} - P_K)}} - \left| \frac{\partial G_{ПВ}}{\partial P_{ПГ}} \right| - \left| \frac{\partial G_K}{\partial P_{ПГ}} \right| \right], \quad (15)$$

Консервативное условие квалификации БЗОК на условия гидродара:

$$K_{Гy} < 0. \quad (16)$$

Предварительный анализ предложенных методов и критериев квалификации БЗОК на пароводяную среду показал, что условия квалификации выполняются. Однако эти результаты требуют уточнения на основе проектно-эксплуатационной документации и адекватных результатов моделирования аварий с межконтурными течами, что и составляет предмет дальнейших исследований.

Список использованной литературы

1. Скалозубов В. И. Анализ причин и последствий аварии на АЭС Fukushima-Daiichi как фактор предотвращения тяжелых аварий в корпусных реакторах / В. И. Скалозубов, А. А. Ключников. — Чернобыль : ИПБ АЭС НАНУ, 2012. — 280 с.
2. Скалозубов В. И. Научно-технические основы мероприятий повышения безопасности АЭС с ВВЭР / В. И. Скалозубов, А. А. Ключников, Ю. А. Комаров, А. В. Шавлаков. — Чернобыль : ИПБ АЭС НАНУ, 2010. — 200 с.
3. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы) / П. Л. Кириллов, Ю. С. Юрьев, В. П. Бобков. — М. : Энергоатомиздат, 1990. — 360 с.

Получено 04.07.2014