

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ КВАЛИФИКАЦИИ БРУ-А В ПАРОВОДЯНЫХ РЕЖИМАХ НА НАТУРНЫЕ УСЛОВИЯ ВВЭР-1000/В-320

В. И. Скалозубов¹, А. В. Шавлаков², Ю.А. Комаров¹

¹Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев

²ГП НАЭК «Энергоатом», Киев

На основе общих положений теории подобия теплогидродинамических процессов двухфазных потоков определены критерии распространения экспериментальной квалификации БРУ-А в пароводяных режимах на натурные условия ВВЭР-1000/В-320.

Ключевые слова: БРУ-А (быстродействующая редуцирующая установка), ВВЭР (водо-водяной энергетический реактор), квалификация; критерии подобия, теплогидродинамический анализ.

Актуальность проблемы

Современные нормативные требования в ядерной энергетике Украины, а также рекомендации МАГАТЭ определяют необходимость проведения квалификации систем, важных для безопасности АЭС. По сути квалификация сводится к техническим (расчетно-аналитическим и экспериментальным) обоснованиям работоспособности и выполнения проектных функций обеспечения безопасности.

В настоящее время одной из острых проблем в этом вопросе для АЭС с ВВЭР-1000/В-320 стала квалификация системы безопасности БРУ-А (быстродействующая редуцирующая установка для сброса рабочей среды в атмосферу). Основные причины такого положения заключаются в следующем:

1. Проведенный в последние годы углубленный анализ безопасности в рамках отчетов по анализу безопасности (ОАБ) пилотного энергоблока с ВВЭР-1000/В-320 (5-й блок Запорожской АЭС) определил возможность истечения пароводяной смеси через БРУ-А при доминантной группе аварий с течью из 1-го контура во 2-й (как для общих показателей безопасности, так и для мероприятий по управлению аварией). Вместе с тем по техническим условиям и проектно-конструкторской документации используемые в настоящее время на Запорожской АЭС БРУ-А серии 1115-300/350-Э и 960-300/350-Э не квалифицированы на условия истечения пароводяной смеси, что делает неопределенным возникновение отказов на закрытие после срабатывания БРУ-А.

Необходимость дополнительной квалификации БРУ-А ВВЭР-1000/В-320 для пароводяной смеси определена так же экспертами МАГАТЭ [1].

2. Сложность теплогидродинамических процессов, возникающих при истечении пароводяной смеси, затрудняет выполнение качественной расчетно-аналитической квалификации БРУ-А в пароводяных режимах без экспериментального подтверждения. При этом возможность испытаний БРУ-А в натуральных условиях на пароводяной смеси для большой аварии с течью из 1-го контура во 2-й практически исключена, а создание соответствующих экспериментальных стендов экономически нецелесообразно.

Экспериментальная квалификация путем проведения испытаний на паре, пароводяной смеси и воде была проведена для клапанов БРУ-А серии 936-150/250-Э, установленных для ВВЭР-440 (АЭС "Моховце") на стенде EDF [2]. Распространение этих результатов экспериментальной квалификации на БРУ-А серий 1115-300/350-Э и 960-300/350-Э требует соответствующих технических обоснований, основанных на теории теплогидродинамического подобия процессов в натуральных условиях срабатывания БРУ-А ВВЭР-1000/В-320 при гипотетической большой аварии с течью из 1-го контура во 2-й и в экспериментальных условиях для БРУ-А ВВЭР-440. Известные рекомендации ASME по принципам распространения результатов испытаний БРУ-А на натурные условия [3] носят слишком общий характер и фактически основаны только на доказательстве идентичности конструкций разных типов клапанов.

Основные технические и конструкционные характеристики БРУ-А 936, 960, 1115 приведены на рис. 1 и 2 и в табл. 1 и 2.

Для достаточно обоснованного распространения известных результатов экспериментальной квалификации БРУ-А ВВЭР-440 [2] на натурные условия срабатывания БРУ-А ВВЭР-1000/В-320 с двухфазной средой необходимо установить критерии подобия теплогидродинамических процессов, основанные на верифицированных и валидированных математических моделях двухфазных потоков.

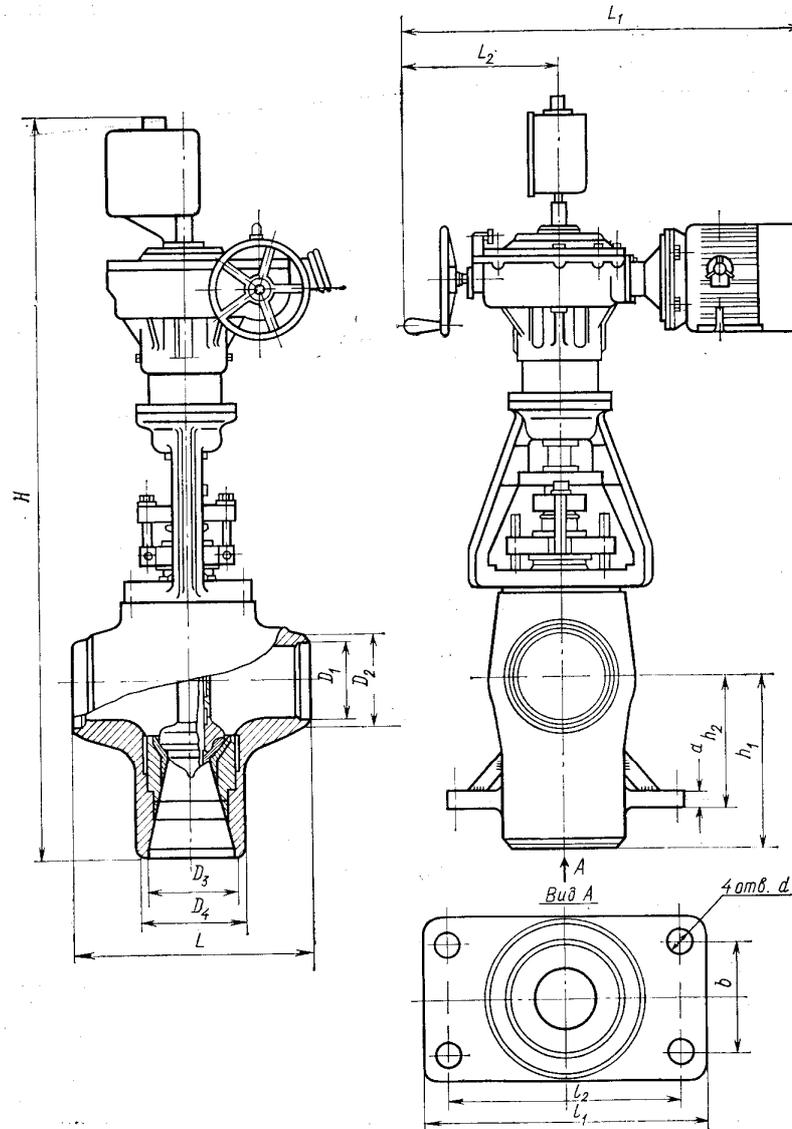


Рис. 1. Чертеж запорно-дроссельного клапана серии 936-150/250-Э [5].

Основные положения

В основе разработки критериев теплогидродинамического подобия для БРУ-А в натурных и экспериментальных условиях положена неравновесная модель двухфазных потоков для детерминистского анализа теплогидродинамических процессов в оборудовании ВВЭР кода RELAP5/M3.2. Расчетный код RELAP5/M3.2 прошел успешную апробацию в различных верификационных программах, а также всесторонне валидирован для натурных условий переходных и аварийных процессов на АЭС с ВВЭР.

Для упрощения моделирования теплогидродинамических процессов проточная часть БРУ-А условно разделена в одномерном приближении на входную и выходную камеры (см. рис. 1 и 2).

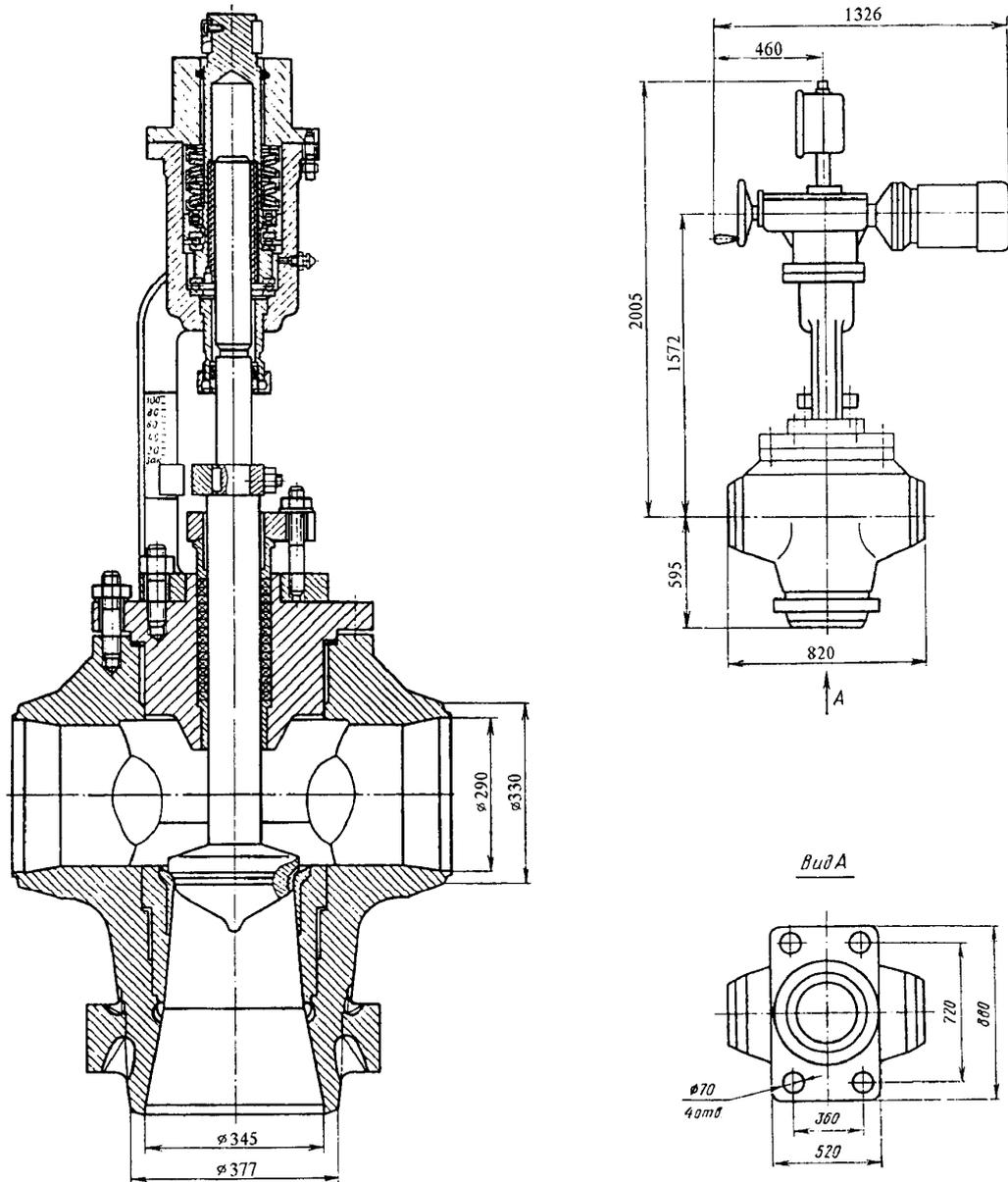


Рис. 2. Чертеж запорно-дроссельного клапана серии 1115-300/350-Э [6].

Таблица 1. Технические характеристики БРУ-А

| Наименование параметра | | Тип клапана | | | |
|---|--------------------------------------|----------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | | 936-150/250-Э [5] | 960- 300/350-Э [5, 8] | 1115- 300/350-Э [6] | 1465- 300/359-Э [7] |
| Расчетные (максимальные) параметры | давление, МПа (кгс/см ²) | 7,8 (80) | 7,8 (80) | 7,8 (80) | 7,8 (80) |
| | температура, °С | 300 | 300 | 300 | 297 |
| Рабочие параметры | давление, МПа (кгс/см ²) | 5,9 (60) | 5,9 (60) | 5,9 (60) | 6,67 (68) |
| | температура, °С | 275 | 274,3 | 274,3 | 282 |
| Максимальный крутящий момент на шпинделе, Н·м | | 880 | 3000 | 3041 | 625 |
| Мощность электродвигателя, кВт | | | 11,8 | 11,8 | 7,5 |
| Ход штока, мм | | 75 | 120 | 120 | 85 |
| Время открытия электроприводом, с | | 11 | 15 | 15 | 15 |
| Расход пара, т/ч | | 200 | 900 | 900 | 900 |

Таблица 2. Присоединительные размеры БРУ-А

| Тип | Присоединительный размер, мм | | | | | | Источник |
|----------------|------------------------------|------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------------|
| | H | L | D ₁ | D ₂ | D ₃ | D ₄ | |
| 936-150/250-Э | 1770 | 650 | 142 | 180 | 244 | 280 | Каталог ЧЗЭМ [7] |
| 960-300/350-Э | 2600 | 820 | 290 | 330 | 345 | 377 | Справочник [5] |
| 1115-300/350-Э | 2600 | 820 | 290 | 330 | 345 | 377 | ТОБ ОАБ РАЭС-4 [6] |
| 1465-300/359-Э | 2500 | 1200 | 290 | 336 | 345 | 380 | Каталог ЧЗЭМ [7] |

При допущениях о пренебрежении внешними потерями тепла, силами гравитации и неравновесности на межфазных границах математическая модель неравновесного двухфазного потока RELAP5/M3.2 в одномерном приближении во входной камере БРУ-А может быть сведена к следующему виду [4]

$$F \frac{\partial \rho_{ж} \varphi_{ж}}{\partial t} + F \frac{\partial \rho_{п} \varphi_{п}}{\partial t} + \frac{\partial G_{ж}}{\partial z} + \frac{\partial G_{п}}{\partial z} = 0, \tag{1}$$

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

$$F \frac{\partial}{\partial t} [\rho_{ж} \varphi_{ж} i_{ж} + \rho_{п} \varphi_{п} i_{п}] + \frac{\partial G_{п} i_{п}}{\partial z} + \frac{\partial G_{ж} i_{ж}}{\partial z} = F \frac{\partial P}{\partial t}, \tag{3}$$

$$F \frac{\partial \rho_{п} \varphi_{п}}{\partial t} + \frac{\partial G_{п}}{\partial z} = F \Gamma_{п}, \tag{4}$$

где $\rho_{ж}, \rho_{п}$ - плотность смеси и пара соответственно; $G, G_{п}, G_{ж}$ - соответственно расход смеси, пара и жидкости ($G = G_{п} + G_{ж}; x = G_{п}/G$); $W_{п}, W_{ж}$ - средняя по сечению скорость пара и жидкости; z, t - продольная координата и время; P - давление теплоносителя; ξ - приведенный коэффициент гидродинамических потерь; $\Pi_{см}$ - сплоченный периметр сечения проточной части; $i_{ж}, i_{п}$ - удельная энтальпия жидкости и пара соответственно; φ - истинное объемное паросодержание ($\varphi_{ж} + \varphi_{п} = 1$); F - площадь проходного сечения проточной части; $\Gamma_{п}$ - интенсивность генерации/конденсации паровой фазы.

Граничные условия для потока:

$$G(t, 0) = G_{ex}; \quad P(t, 0) = P_{ex}; \quad i(t, 0) = i_{ex}.$$

Начальные условия:

$$G(0, z) = G_0; \quad P(0, z) = P_0; \quad i(0, z) = i_0.$$

Для определения критериев подобия введем масштабный параметр каждой независимой переменной B_m ($\bar{B} = B/B_m$ - безразмерный параметр переменной B). Тогда уравнения (1) - (4) в безразмерном виде будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} K_1 \bar{F} \frac{\partial \bar{\rho}_{ж} \bar{\varphi}_{ж}}{\partial \bar{t}} + K_2 \bar{F} \frac{\partial \bar{\rho}_{п} \bar{\varphi}_{п}}{\partial \bar{t}} + K_3 \frac{\partial \bar{G}_{ж}}{\partial \bar{z}} + \frac{\partial \bar{G}_{п}}{\partial \bar{z}} = 0, \\ K_4 \bar{\rho}_{п} \bar{\varphi}_{п} \bar{F} \frac{\partial \bar{W}_{п}}{\partial \bar{t}} + K_5 \bar{\rho}_{ж} \bar{\varphi}_{ж} \bar{F} \frac{\partial \bar{W}_{ж}}{\partial \bar{t}} + K_6 \bar{G}_{п} \frac{\partial \bar{W}_{п}}{\partial \bar{z}} + \bar{G}_{ж} \frac{\partial \bar{W}_{ж}}{\partial \bar{z}} = \\ = -K_7 \frac{\xi \bar{G}^2 \bar{\Pi}_{см}}{8 \bar{\rho} \bar{F}^2} - K_8 \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{z}} \bar{F} + K_{13} \bar{F} \bar{\Gamma}_{п} \bar{W}_{п} + K_{14} \bar{F} \bar{\Gamma}_{п} \bar{W}_{ж}, \\ K_9 \bar{F} \frac{\partial (\bar{\rho}_{ж} \bar{\varphi}_{ж} \bar{i}_{ж})}{\partial \bar{t}} + K_{10} \bar{F} \frac{\partial (\bar{\rho}_{п} \bar{\varphi}_{п} \bar{i}_{п})}{\partial \bar{t}} + K_{11} \frac{\partial (\bar{G}_{п} \bar{i}_{п})}{\partial \bar{z}} + \frac{\partial (\bar{G}_{ж} \bar{i}_{ж})}{\partial \bar{z}} = K_{12} \bar{F} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{t}}, \\ K_{15} \bar{F} \frac{\partial \bar{\rho}_{п} \bar{\varphi}_{п}}{\partial \bar{t}} + \frac{\partial \bar{G}_{п}}{\partial \bar{z}} = K_{16} \bar{F} \bar{\Gamma}_{п}, \end{aligned}$$

где критерии подобия имеют вид:

$$\begin{aligned}
 K_1 &= \frac{F_M \rho_M Z_M}{G_M t_M}, & K_5 &= \frac{Z_M}{t_M W_{ЖМ}}, \\
 K_2 &= \frac{F_M \rho_{ПМ} Z_M \varphi_{ПМ}}{G_{ПМ} t_M}, & K_6 &= \frac{G_{ПМ} W_{ПМ}}{G_{ЖМ} W_{ЖМ}}, \\
 K_3 &= \frac{F_M Z_M \Gamma_{ПМ}}{G_{ПМ}}, & K_7 &= \frac{\xi_M G_M^2 \Pi_{смм} Z_M}{\rho_M F_M^2 G_{ЖМ} W_{ЖМ}}, \\
 K_4 &= \frac{Z_M G_{ПМ}}{G_{ЖМ} t_M W_{ЖМ}}, & K_8 &= \frac{F_M P_M}{G_{ЖМ} W_{ЖМ}}, \\
 K_9 &= \frac{F_M \rho_{ПМ} Z_M \varphi_{ПМ} i_{ПМ}}{G_{ЖМ} t_M i_{ЖМ} \varphi_{ЖМ}}, & K_{13} &= F_M \Gamma_{ПМ} W_{ПМ}, \\
 K_{10} &= \frac{F_M \rho_{ПМ} Z_M \varphi_{ПМ} i_{ПМ}}{G_{ЖМ} t_M i_{ЖМ} \varphi_{ЖМ}}, & K_{14} &= F_M \Gamma_{ПМ} W_{ЖМ}, \\
 K_{11} &= \frac{G_{ПМ} i_{ПМ}}{G_{ЖМ} i_{ЖМ}}, & K_{15} &= \frac{F_M \rho_{ПМ} Z_M \varphi_{ПМ}}{G_{ПМ} t_M}, \\
 K_{12} &= \frac{F_M Z_M P_M}{t_M G_{ЖМ} i_{ЖМ}}, & K_{16} &= \frac{F_M Z_M \Gamma_{ПМ}}{G_{ПМ}}.
 \end{aligned}$$

Условием обеспечения подобия теплогидродинамических процессов в натуральных и экспериментальных условиях является

$$K_n \equiv 1, \text{ где } n = 1, \dots, 16. \quad (5)$$

Для решения (5) можно задать известные масштабы:

$Z_M = h$ – длина проточной части БРУ-А;

$F_M = F(z)$ – текущая площадь проходного сечения;

$\Pi_{смм} = \Pi_{см}(z)$ – текущий периметр проходного сечения;

$G_M = G_0$ – пропускная способность БРУ-А;

$P_M = P_0$ – уставка срабатывания на открытие БРУ-А;

$i_{ПМ} = i_{П}(P_0) = i_{П0}$; $i_{ЖМ} = i_{Ж}(P_0) = i_{Ж0}$;

$\rho_{ПМ} = \rho_{П}(i_{П0}, P_0) = \rho_{П0}$; $\rho_{ЖМ} = \rho_{Ж}(i_{Ж0}, P_0) = \rho_{Ж0}$;

$\varphi_{ПМ} = 1$; $\varphi_{ЖМ} = 1$

Пропускная способность G_0 является технической характеристикой БРУ-А и определяется по результатам испытаний/экспериментов (обычно по пару/парогазовой смеси).

Тогда, из условий (5) следуют и другие масштабы независимых переменных:

$$\begin{aligned}
 t_M &= \frac{F(z) h \rho_{Ж0}}{G_0}; & W_{ПМ} &= \frac{G_0}{F(z) h \rho_{Ж0}}; & G_{ПМ} &= G_0 \frac{\rho_{П0}}{\rho_{Ж0}}; \\
 \Gamma_M F_M &= \frac{G_0 \rho_{П0}}{h \rho_{Ж0}}; & W_{ЖМ} &= \frac{G_0}{F(z) \rho_{Ж0}}; & G_{ЖМ} &= \frac{\rho_{П0}}{\rho_{Ж0}} G_0.
 \end{aligned}$$

Масштабный коэффициент гидродинамических потерь ξ_M определяется как локальный коэффициент необратимых потерь БРУ-А (местное сопротивление) и связан с коэффициентом расхода БРУ-А μ известным соотношением

$$\xi_M = \frac{1}{\sqrt{\mu}}.$$

Коэффициент расхода μ является технической характеристикой БРУ-А, учитывающей конструкционные параметры проточной части, и определяется на основе результатов испы-

таний/экспериментов по определению пропускной способности БРУ-А. Учитывая известное соотношение между G_0 и μ , получаем

$$\xi_M = \frac{1}{\sqrt{\mu}} = \sqrt{\frac{F_0 \sqrt{2\rho_{II} \Delta P}}{G_0}},$$

где ΔP – максимальный перепад давления на БРУ-А; F_0 – приведенная к μ площадь проходного сечения проточной части.

С учетом заданных и полученных масштабов, а также начальных и граничных условий окончательно получим следующие критерии подобия теплогидродинамических процессов в натуральных и экспериментальных условиях БРУ-А:

$$\Pi_1 = \frac{\rho_{II0}}{\rho_{Ж0}} \equiv idem \quad (6) \quad \Pi_5 = \frac{P_0}{\rho_{Ж0} i_{Ж0}} \equiv idem \quad (10)$$

$$\Pi_2 = \sqrt{\frac{F_0 \sqrt{2\rho_{II0} \Delta P}}{G_0}} \cdot \frac{\Pi_{cm}(z)h}{F(z)} \equiv idem \quad (7) \quad \Pi_6 = \frac{P_{BX}}{P_0} \equiv idem \quad (11)$$

$$\Pi_3 = \frac{P_0 F^2(z) \rho_{Ж0}}{G_0^2} \equiv idem \quad (8) \quad \Pi_7 = \frac{i_{BX}}{i_0} \equiv idem \quad (12)$$

$$\Pi_4 = \frac{i_{II0}}{i_{Ж0}} \equiv idem \quad (9) \quad \Pi_8 = \frac{G_{BX}}{G_0} \equiv idem \quad (13)$$

Основные выводы

1. Полученные в соответствии с общими положениями теории подобия теплогидродинамических процессов критерии (6) – (13), могут быть основой для распространения результатов экспериментальной квалификации в пароводяных режимах на натурные условия БРУ-А ВВЭР-1000/В-320.

2. Применение значений основных технических и конструкционных характеристик БРУ-А (см. табл. 1 и 2, рис. 1 и 2) показало, что критерии теплогидродинамического подобия для БРУ-А 936 (ВВЭР 440) и БРУ-А 1115, 960 (ВВЭР 1000) не выполняются в полном объеме. Этот результат определяет недостаточную обоснованность распространения экспериментальной квалификации БРУ-А 936 на квалификацию БРУ-А 1115, 960.

3. Полученные критерии теплогидродинамического подобия указывают на ограниченность известных стандартов ASME [3] по распространению результатов экспериментальной квалификации, которые определяют в основном только необходимые условия по идентичности конструкций различных типов клапанов БРУ-А.

4. Одномерная модель проточной части БРУ-А принята для упрощения анализа. Учет неоднородности течения потока в проточной части не отрицает полученных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Safety Issues and Their Ranking for WWER-1000 Model 320 Nuclear Power Plants*; International Atomic Energy Agency, IAEA-EBP-WWER-05, Vienna 1996.
2. *EEXDC 0038E. Qualification of the Secondary Relies Valve for Water Discharge operation.*
3. *ASME code, QME-1, Qualification of active mechanical equipment used in NPP, section QV (qualification of valves), 2007.*
4. *Моделирование аварий на ЯЭУ АЭС* / В. Н. Васильченко, В. В. Ким, В. И. Скалозубов - Одесса: Резон 2000, 2002. – 466 с.
5. *Гуревич Д.Ф., Ширяев В.В., Пайкин И.Х. Арматура атомных электростанций: Справ. пособие.* – М.: Энергоиздат, 1982. – 312 с.

6. *Отчет* по анализу безопасности энергоблока № 4 Ровенской АЭС. Т. 6. Гл. 6. Системы безопасности. Ч. 1. Защищенные системы безопасности. 38-223.203.003.ОБ.06.01 / НАЭК «Энергоатом», 2004.
7. *Каталог*. Арматура для АЭС «Чеховский завод энергетического машиностроения». – М: ЧМЗЭ, 2005. – 81 с.
8. *Паспорт* на клапан запорно-дроссельный. Обозначение 960-300/350-Э (БРУ-А). Заводской номер № 605997. Блок № 3 ЗАЭС.

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОШИРЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ КВАЛІФІКАЦІЇ БРУ-А В ПАРОВОДЯНИХ РЕЖИМАХ НА НАТУРНІ УМОВИ ВВЕР-1000/В-320

В. І. Скалозубов, А. В. Шавлаков, Ю. О. Комаров

На основі загальних положень теорії подоби теплогідродинамічних процесів двофазних потоків визначено критерії поширення експериментальної кваліфікації БРУ-А в пароводяних режимах на натурні умови ВВЕР-1000/В-320.

Ключові слова: БРУ-А (швидкодіюча редуційна установка), ВВЕР (водо-водяний енергетичний реактор), кваліфікація, критерії подоби, теплогідродинамічний аналіз.

THEORETICAL BASES OF DISTRIBUTION OF EXPERIMENTAL QUALIFICATION FAST- ACTING REDUCING VALVE IN STEAM-AND-WATER MODES ON NATURAL CONDITIONS WWER-1000/V-320

V. I. Skalozubov, A. V. Shavlakov, Yu. A. Komarov

On the basis of general provisions of the theory of similarity heat-hydraulic processes of biphasic streams criteria of distribution of experimental qualification fast-acting reducing valve in steam-and-water modes on natural conditions WWER-1000/V-320 are determined.

Keywords: MSR (main steam relief valves), WWER (water-water power reactor), qualification; analogy parameters, heat-hydraulic analysis.

Поступила в редакцію 01.06.09