

КОНСЕРВАТИВНЫЙ МЕТОД ОБОСНОВАНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ БРУ-А АЭС С ВВЭР-1000 ПРИ ДВУХФАЗНЫХ РЕЖИМАХ ИСТЕЧЕНИЯ

В. В. Богодист* , В. И. Скалозубов, К. В. Скалозубов, А. В. Шавлаков*, С. В. Шигин*

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев

** ОП "Запорожская АЭС", Энергодар*

Приведен консервативный расчетно-аналитический метод оценки квалификации БРУ-А при двухфазных режимах истечения с учетом результатов опытной квалификации на однофазных режимах. Показано, что показатели надежности и работоспособность БРУ-А на закрытие будут не хуже, чем в квалифицированных однофазных режимах на паре.

Ключевые слова: квалификация, консервативный метод, двухфазный режим.

Актуальность квалификации быстродействующего редуцирующего устройства сброса среды в атмосферу (БРУ-А) определяется следующим.

1. В соответствии с проектно-конструкторской документацией, предэксплуатационными и эксплуатационными испытаниями БРУ-А квалифицированы для условий истечения пара или паровоздушной смеси. Углубленный анализ безопасности, проведенный вероятностными и детерминистскими методами для АЭС с ВВЭР-1000, показал возможность возникновения двухфазных режимов через БРУ-А при авариях с межконтурными течами. В этих условиях (для которых БРУ-А не квалифицированы) возникает существенная неопределенность возможного отказа на закрытие (после открытия) клапанов БРУ-А, который приводит к недопустимым последствиям.

2. Известные результаты экспериментальной квалификации БРУ-А на двухфазной среде (например, [1]) недостаточно обоснованы для реальных условий работоспособности БРУ-А ВВЭР-1000.

Один из возможных подходов квалификации БРУ-А ВВЭР-1000 при двухфазных режимах может быть основан на расчетно-аналитических обоснованиях, предусмотренных отраслевой программой квалификации [2].

Критерии квалификации БРУ-А на воде и пароводяной смеси

Основным критерием квалификации БРУ-А является условие превышения определенных проектно-конструкторской документацией рабочих усилий F_y по закрытию клапанов внешних теплогидравлических нагрузок, связанных с динамическим напором потока F_d и гидравлическим сопротивлением среды рабочему органу F_c :

$$F_y \geq F_d + F_c. \quad (1)$$

Дополнительным критерием квалификации БРУ-А на воде и пароводяной смеси является результаты предэксплуатационных и эксплуатационных испытаний, подтверждающих проектную работоспособность клапанов БРУ-А на паре (однофазная среда):

$$F_y \geq F_d(\rho = \rho_n) + F_c(\rho = \rho_n), \quad (2)$$

где ρ и ρ_n – плотность среды и пара соответственно.

Консервативный анализ квалификации БРУ-А на воде и пароводяной среде

Проведение достаточно корректного моделирования теплогидравлических процессов (а соответственно и определение внешних теплогидравлических нагрузок) затруднительно по следующим причинам:

существенная неоднородность истечения среды и сложность учета реальных проектно-конструкторских характеристик проточной части;

неопределенность неравновесности теплогидродинамических процессов в проточной части.

В этой ситуации применим *консервативный подход*, использующий допущения в сторону предельных (более худших) условий срабатывания клапанов по отношению к реальным условиям.

Основные допущения в рамках консервативного подхода квалификации БРУ-А на воде и пароводяной смеси заключаются в следующем.

1. Расход через БРУ-А определяется максимальной пропускной способностью G_0 вне зависимости от плотности среды.
2. Плотность среды при определении внешних теплогидродинамических нагрузок на шток рабочего органа полагается равной плотности жидкости $\rho_{ж}$.
3. Пренебрежение неравновесностью парожидкостной среды.
4. Давление перед возможными скачками уплотнения полагается равным уставке срабатывания БРУ-А P_0 .

Проходное сечение клапана БРУ-А сложной геометрической формы, условно его можно разделить на входную камеру (сужение проходной части потока вплоть до минимального F_{min}) и выходную камеру (расширение потока).

Максимальные нагрузки, связанные с динамическим напором потока, можно оценить как

$$F_d = S_{пр} \Delta P, \quad (3)$$

где $S_{пр}$ – приведенная площадь поверхности штока, подверженная перепаду динамического напора $\Delta P = (P_1 - P_2)$; P_1, P_2 – давление во входной камере и давление вблизи минимального сечения проточной части клапана соответственно.

Силы гидравлического сопротивления среды определяются как

$$F_c = K_c (W_{шт} - W) |W_{шт} - W|, \quad (4)$$

где K_c – коэффициент, зависящий от конструктивно-технических характеристик штока и теплофизических свойств среды потока; $W_{шт}, W$ – скорость движения штока и среды соответственно.

Анализ уравнений теплогидродинамических процессов в проточной части клапана в рамках принятых допущений показывает [3–5], что в общем случае возможна реализация трех основных режимов истечения среды в проточной части клапана:

- 1) докритический режим истечения (число Маха $M < 1$);
- 2) критический режим истечения ($M = 1$ в минимальном сечении проточной части);
- 3) сверхзвуковой режим истечения ($M > 1$ во входной камере проходного сечения).

При докритических и критических режимах истечения основной критерий квалификации БРУ-А на воде и пароводяной смеси выполняется вне зависимости от состояния двухфазного потока, так как в этих условиях

$$\Delta P < 0 \text{ и } (W_{шт} - W) < 0,$$

а нагрузки, связанные с динамическим напором и гидравлическим сопротивлением среды, способствуют выполнению функций рабочего органа по закрытию клапана БРУ-А.

В случае возникновения сверхзвукового режима вблизи минимальных сечений возможно возникновение скачков уплотнения, вызванных превышением скорости звука во входной камере сужения потока, а соответственно и условия $\Delta P > 0$.

Возникновение скачка уплотнений конечной интенсивности в рамках принятых консервативных допущений для рассматриваемых условий описывается известным консервативным соотношением [4, 5]

$$\frac{P_2}{P_1} = 1 + \frac{W_1}{\sqrt{\left(\frac{P}{\rho}\right)_1}}, \quad (5)$$

где индексы 1 и 2 относятся соответственно к параметрам до и после скачка уплотнений.

При истечении пара через клапан БРУ-А величина скачка уплотнения

$$\frac{P_2}{P_1} = 1 + \frac{G_o}{S_{min} \sqrt{P_o \rho_n}}, \quad (6)$$

$$\Delta P = P_2 - P_1 = \frac{G_o}{S_{min}} \sqrt{\frac{P_o}{\rho_n}}. \quad (7)$$

При истечении воды/пароводяной среды через БРУ-А консервативная оценка скачка уплотнения

$$\Delta P = \frac{G_o}{S_{min}} \sqrt{\frac{P_o}{\rho_{ж}}}. \quad (8)$$

Из полученных оценок (7) и (8) динамических напоров при скачках уплотнений в проточной части клапанов БРУ-А следует, что необходимые усилия для преодоления гидродинамического напора по закрытию штока при истечении воды/пароводяной среды не превышают соответствующих усилий при истечении пара (квалифицированных проектом).

Сила гидравлического сопротивления (как и в случае докритических и критических режимов) ввиду условия $(W_{ш} - W) < 0$ способствует закрытию клапана.

Таким образом, с учетом полученных консервативных оценок скачков уплотнений во входной камере, а также дополнительного критерия квалификации (2), можно распространить результаты проектной квалификации БРУ-А на условия истечения воды и/или пароводяной среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *EEXDC 0038E*. Qualification of the Secondary Relies Valve for Water Discharge operation.
2. ПМ-Д.0.03.476-09. Программа работ по квалификации оборудования энергоблоков АЭС ГП НАЭК «Енергоатом».
3. *Моделирование аварий на ЯЭУ АЭС* / В. Н. Васильченко, В. В. Ким, В. И. Скалозубов. – Одесса: Резон 2000, 2002. – 466 с.
4. *Циклаури Г.В.* Адиабатные двухфазные течения. – М.: Атомиздат, 1973. – 448 с.
5. *Фисенко В.В.* Сжимаемость теплоносителя и эффективность работы контуров циркуляции ЯЭУ. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 200 с.

КОНСЕРВАТИВНИЙ МЕТОД ОБГРУНТУВАННЯ КВАЛІФІКАЦІЇ ШРУ-А АЕС ІЗ ВВЕР-1000 ПРИ ДВОФАЗНИХ РЕЖИМАХ ВИТІКАННЯ

В.В. Богодист, В.І. Скалозубов, К.В. Скалозубов, О.В. Шавлаков, С.В. Шигін

Наведено консервативний розрахунково-аналітичний метод оцінки кваліфікації ШРУ-А при двофазних режимах витікання з урахуванням результатів дослідної кваліфікації на однофазних режимах. Показано, що показники надійності та працездатність ШРУ-А на закриття будуть не гірші, ніж у кваліфікованих однофазних режимах.

Ключові слова: кваліфікація, консервативний метод, двофазний режим.

CONSERVATIVE METHOD TO FOUND QUALIFICATION OF FAST-ACTING REDUCING VALVES FOR NPP WITH VVER 1000 AT BIPHASE DISCHARGE MODES

V.V. Bogodist, V.I. Skalozubov, K.V. Skalozubov, A.V. Shavlakov, S.V. Shigin

The article represents the conservative calculation-analytical assessment method of qualification of fast-acting reducing valves at biphas discharge modes taking into account the results of experimental qualification at one-phase modes. It is shown that reliability indexes and availability to close of fast-acting reducing valves will be not worse than at qualified one-phase modes.

Keywords: qualification, conservative method, biphas mode.

Поступила в редакцію 27.07.09