

КВАЛИФИКАЦИЯ БРУ-А ЗАПОРОЖСКОЙ АЭС ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

© 2011 г. Е. С. Агейкина, Г. Г. Габлая*, Г. С. Драган**, Ю. Л. Коврижкин

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев

**Одесский национальный политехнический университет*

***Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова*

Представлены аналитические и расчетные обоснования консервативной квалификации БРУ-А серии 1115, 960 на сейсмические воздействия свыше проектных 6 баллов по шкале MSK. Показано, что при сейсмических воздействиях в 7 баллов условия прочности конструкции БРУ-А выполняются.

Ключевые слова: быстродействующее редуцирующее устройство сброса среды в атмосферу (БРУ-А), квалификация, сейсмические воздействия, прочностные расчеты.

Актуальность проблемы

В соответствии с проектом [3] в геоструктурном отношении район размещения Запорожской АЭС (ЗАЭС) расположен в пределах Приднепровского блока Украинского кристаллического щита (УЩ), который с северо-востока ограничивается Днепровско-Донецким авлакогеном, а с юга - Причерноморской впадиной. Кристаллический фундамент, выходящий на поверхность в северной части Приднепровского блока УЩ, постепенно погружается в южном направлении. Мощность земной коры составляет здесь 47 км. Сложное складчатоглыбовое строение УЩ сформировалось на докембрийском этапе развития.

В соответствии со СНиП-II-7-81* "Строительство в сейсмических районах" и картой сейсмического районирования СССР (СР-78), территория строительства находится в 5-балльной сейсмической зоне. Непосредственно в районе строительства ЗАЭС очаги землетрясений отсутствуют. Ближайшие очаги землетрясений находятся на расстоянии 300 км. Основными очаговыми зонами, сейсмоопасными для АЭС, являются Карпатская и Крымская.

В соответствии с проектом, сейсмичность территории строительства ЗАЭС составляет:

проектное землетрясение (ПЗ) – 5 баллов по шкале MSK;

максимальное расчетное землетрясение (МРЗ) - 6 баллов по шкале MSK.

Пиковые значения ускорения грунта для проектного (один раз в 100 лет) и максимального расчетного (один раз в 10000 лет) составляет [1]: 42,8 см/с² (0,04g) для ПЗ; 156,5 см/с² (0,15g) для МРЗ.

В процессе эксплуатации ЗАЭС появились отдельные предпосылки пересмотра проектных критериев сейсмостойкости, среди которых можно выделить, например, следующие:

1. По последним данным Института геофизики НАН Украины, опубликовавшим карту сейсмического районирования, разработанную Институтом физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, район ЗАЭС, определен в 8 баллов (МРЗ), что превышает воздействия от землетрясения, принятые в проекте.

2. При влиянии сейсмических воздействий на элементы энергоблока № 5 ЗАЭС в [1] принято для зданий и сооружений 1-й категории сейсмостойкости МРЗ = 7 баллов по шкале MSK на основании того, что при отсутствии необходимых данных по устойчивости зданий/сооружений и оборудования к сейсмическим воздействиям, превышающим МРЗ, единственным возможным подходом анализа уязвимости энергоблока является использование допущения, что при возникновении максимального расчетного землетрясения (землетрясение балльности выше 7) происходят множественные отказы оборудования, важного для безопасности, которые приводят к повреждению активной зоны реактора.

3. В [3] показано, что ограждающие конструкции БВ (бассейна выдержки) сохраняют заданные функции (плотность и прочность) по удержанию активных продуктов деления во

всех режимах эксплуатации, включая режим МПА в сочетании с сейсмическими воздействиями при ПЗ - 6 баллов включительно, а также при сейсмических воздействиях при МРЗ - 7 баллов, обеспечивают биологическую защиту как в условиях нормальной эксплуатации, так и при проектных авариях; имеют огнестойкость не ниже I степени в соответствии с ВБН В.1.1-034-03.307-2003 с пределом огнестойкости не менее 2,5 ч.

4. В [2] определено, что при МРЗ с определенной вероятностью происходит обрушение конструкций турбинного отделения, что может вызвать множественное повреждение трубопроводов пара и питательной воды. Ввиду отсутствия системы динамического закрепления трубопроводов (СДРТ), разрыв трубопровода, содержащего высокоэнергетический теплоноситель, при отсутствии сплошных барьеров может привести к появлению «хлестания» труб и, как следствие, к вторичным повреждениям трубопроводов и оборудования в помещении А-820 РО. Таким образом, СДРТ должна сохранять работоспособность без разрушения с учетом нагрузок от трубопроводов, нагрузок, возникающих при разрывах трубопроводов, нагрузок от ударной волны со стороны машинного зала с давлением 0,3 кг/см², сейсмическом воздействии 7 баллов по шкале MSK-64.

Относительно представленных примеров необходимо отметить:

1) установление новых значений ПЗ и МРЗ для промплощадки ЗАЭС требует дополнительных глубоких обоснований, так как предлагаемые значения МРЗ выше 6 баллов противоречат проектным исследованиями сейсмического состояния района ЗАЭС, а также отдельным современным исследованиями. Так, в рамках проектов ISA для всех АЭС Украины Ливерморской национальной лабораторией имени Лоуренса (США) [1] были получены основные характеристики сейсмических воздействий для всех АЭС Украины (в частности, кривые вероятности превышения пиковых ускорений грунта для ЗАЭС). Согласно этим результатам, периодичность возникновения МРЗ = 7 баллов (соответствует пиковому ускорению грунта по верхнему пределу около 400 см/с²) для промплощадки ЗАЭС составляет один раз в 2 млн лет. В соответствии с действующими нормативными определениями [4, 5] такие землетрясения не могут быть отнесены к ПЗ и МРЗ: периодичность ПЗ – один раз в 100 лет, а МРЗ – в 10 тыс. лет. Землетрясения с повторяемостью менее одного раза в 10 тыс. лет относятся к условиям запроектных аварий;

2) рассмотренные выше примеры из Отчета по анализу безопасности (ОАБ) блока № 5 ЗАЭС также относятся к условиям запроектных аварий. Так, в примере с помещением А-820 РО рассмотрены условия с отказами и нарушениями свыше условий проектных аварий, а в примере с БВ рассмотрены предельные возможности конструкций при сейсмических воздействиях.

Уровень сейсмичности площадок Южно-Украинской, Ровенской и Запорожской АЭС был определен «Решением» Минэнерго СССР от 8 сентября 1977 г.:

повторяемость один раз в 100 лет (ПЗ) - 5 баллов;

повторяемость один раз в 10000 лет (МРЗ) - 6 баллов.

В последующих нормативных документах для ПЗ была принята повторяемость один раз в 1000 лет [8]. На основании указанного документа, а также письма № 270 от 11 июля 1977 г. «О строительстве АЭС в сейсмоопасных районах» и в соответствии с «Временными нормами проектирования атомных энергетических установок для сейсмических районов» (ВСН-15-78 Минэнерго СССР) автор проекта энергоблока № 1 ЗАЭС - институт «Атомтеплоэлектропроект» (Москва) - обеспечил использование в этом проекте конструкций и оборудования, рассчитанных на МРЗ – 6 баллов по шкале MSK.

Однако в 2007 г. были введены в действие в Украине новые сейсмические нормы общего назначения – ДБН В.1.1-12:2006 «Строительство в сейсмических районах Украины» [4], включающие в себя результаты макросейсмического районирования Украины (карты ОСР2004). Наиболее жесткие условия по уровню вероятности сейсмических воздействий максимальной интенсивности содержат карты с индексом «С», отвечающие периоду повторяемости максимальной интенсивности один раз в 5000 лет. Согласно п. 1.1.1 ДБН В1.1-

12:2006 карты с индексом «В» следует применять при проектировании и строительстве особо ответственных объектов и сооружений, повреждения или разрушения которых при воздействии землетрясения может привести к чрезвычайной ситуации государственного уровня. В соответствии с указанными картами и рекомендациями обязательного Приложения А к ДБН В1.1-12:2006 для г. Энергодар Запорожской области следует принимать:

при повторяемости один раз в 1000 лет – 6 баллов по шкале MSK;

при повторяемости один раз в 5000 лет – 7 баллов по шкале MSK.

При этом в ДБН В1.1-12:2006 оговорено (см. п. 1.1.2), что сейсмическую интенсивность площадки строительства следует определять с учетом результатов сейсмического микрорайонирования, выполняемого для районов с сейсмичностью 6 и более баллов в соответствии с составом работ, указанных в нормативных документах, т.е. в данном случае для АЭС в соответствие с рекомендациями ПНАЭ Г-5-006-87.

В 1994 г. фирмой «Stevenson and Associated» (Cleveland, Ohio, USA) был проведен и опубликован анализ уровней сейсмичности площадок АЭС в Украине [10], в соответствии с которым величина пикового горизонтального ускорения на поверхности грунта для ЗАЭС рекомендована не менее 0,1g, что в соответствии с инструментальной частью шкалы MSK-64 идентично сейсмическому воздействию интенсивностью 7 баллов [8]. Эта же рекомендация была подтверждена МАГАТЭ в 1997 г. в документе «Проблемы безопасности атомных электростанций с реакторами ВВЭР-1000/320» [11], составленном по результатам работы миссии МАГАТЭ в Украине.

Необходимо отметить принципиальные несоответствия в определении понятий ПЗ и МРЗ в приведенных выше результатах современных исследований сейсмичности промплощадки ЗАЭС и действующих нормах в ядерной энергетике [4, 5]. Согласно действующим нормам ПЗ и МРЗ имеют повторяемость соответственно один раз в 100 лет и один раз в 10 тыс. лет, а в [9] принято для ПЗ – один раз в 1000 лет и для МРЗ – один раз в 5000 лет. Принятые в [10, 11] значения МРЗ = 7 баллов соответствуют повторяемости один раз в 500 тыс. лет [1]. Однако, учитывая актуальность подготовки расчетных обоснований обобщенных спектров ответа от сейсмических воздействий для отметок установки оборудования, следует выполнить эту работу для следующих параметров, установленных в ходе макросейсмического районирования Украины, а именно:

МРЗ - 7 баллов по шкале MSK-64 с максимальным горизонтальным сейсмическим ускорением на поверхности грунта $a_{max} = 0,1g$;

ПЗ - 6 баллов по шкале MSK-64 с $a_{max} = 0,05g$.

Метод квалификации БРУ-А в "жестких" условиях сейсмических воздействий

В соответствии с нормативными требованиями [5] проверка оборудования и трубопроводов (в т.ч. и системы БРУ-А) на сейсмические воздействия должна выполняться расчетными и/или экспериментальными методами. Проверку расчетными методами необходимо выполнять в соответствии с "Нормами расчета на прочность оборудования и трубопроводов АЭУ" (ПНАЭ Г-7-002-86).

По классификации систем, важных для безопасности, в соответствии с требованиями Правил и норм по ядерной и радиационной безопасности, системы БРУ-А являются системами нормальной эксплуатации, совмещающими функции защитного элемента энергоблоков ЗАЭС, и относятся к 1-й категории сейсмостойкости по ПНАЭ Г-5-006-87, к группе В по ПНАЭ Г-7-008-89 и к классу безопасности 2 (классификационное обозначение 2НЗ) по ОПБ.

Методическое обеспечение прочностных расчетов при сейсмических воздействиях изложено в [4] и конкретизировано в методике проектно-конструкторской документации на БРУ-А.

В соответствии с [4] сейсмические нагрузки на оборудование и трубопроводы определяют с учетом одновременного сейсмического воздействия в двух горизонтальных и вертикальных направлениях. Для определения сейсмических нагрузок могут быть использованы:

- 1) три акселерограммы для трех взаимно перпендикулярных направлений;
- 2) спектры реакций, соответствующие заданным акселерограммам;
- 3) обобщенные спектры реакций.

Значение относительного демпфирования принимают равным $k = 0,02$.

Оборудование и трубопроводы 1-й категории должны рассчитываться в соответствии с требованиями [4] на сочетание нагрузок при нормальных условиях эксплуатации (НУЭ) + МРЗ и НУЭ + ПЗ.

Суть прочностных расчетов сводится к анализу соотношения значений напряжений, возникающих при сейсмических воздействиях (ПЗ, МРЗ) и допускаемого напряжения, определяемого конструкционными характеристиками системы БРУ-А.

Проектные обоснования прочности оборудования (в т.ч. БРУ-А) выполнены для значений сейсмичности ПЗ = 5 баллов и МРЗ = 6 баллов по шкале MSK и подтверждены в [3].

Результаты прочностных расчетов для землетрясений в 7 баллов приведены в [2] с учетом консервативных значений по ускорениям и спектрам ответа для трубопроводных систем помещения А-820, в котором расположены элементы БРУ-А. Проведенное в [2] сравнение новых НТД с ранее действующими показало, что основные отличия состоят в следующем:

- отличаются требования по выбору и настройке предохранительных устройств;
- изменение отдельных методов и объемов контроля;
- изменение отдельных видов разделки кромок.

Эти отличия не являются принципиальными и практически не оказывают влияния на результаты прочностных расчетов системы безопасности (СБ) и системы нормальной эксплуатации (СНЭ), важных для безопасности. Перерасчет отдельных трубопроводов в соответствии с новыми НТД не показал необходимость пересмотра технических решений по обеспечению условий прочности [2].

Поверочные прочностные расчеты клапанов БРУ-А 1115, 960 были проведены для ПЗ = 6 баллов и МРЗ = 7 баллов в соответствии с проектно-конструкторской методикой (конкретизированной в паспорте БРУ-А 1115-300/350-Э) и требованиями ПНАЭ Г-7-002-86 [4].

В соответствии с этой проектно-конструкторской методикой расчета на прочность клапанов БРУ-А наиболее напряженной областью является место с наименьшей относительной толщиной стенки – место разделки кромок патрубков под трубопроводы.

Расчетное соотношение условия прочности для общих мембранных напряжений $(\sigma)_m$ имеет вид

$$(\sigma)_m = \frac{P(D_H - S_{II})}{2S_{II}} + \frac{F}{3,14(D_H - S_{II})S_{II}} \leq [\sigma_H] \quad (1)$$

где P – расчетное давление; F – осевое усилие от трубопровода; D_H – наружный диаметр кромки патрубка; S_{II} – толщина кромки патрубка; $[\sigma_H] = \min\left\{\frac{\sigma'_B}{2,6}; \frac{\sigma'_{0,2}}{1,5}\right\}$ – номинальное допускаемое напряжение, где σ'_B – значение предела прочности при расчетной температуре; $\sigma'_{0,2}$ – значение предела текучести при расчетной температуре.

Напряжения при совместном действии внутреннего давления P , изгибающих моментов M и осевых усилий от трубопроводов F определяются по формуле

$$\sigma = \frac{P(D_H - S_{II})}{2S_{II}} + \frac{M \cdot 1000}{0,0984 \cdot D_H^3 \left[1 - \left(\frac{D_H - 2S_{II}}{D_H}\right)^4\right]} - \frac{F}{3,14(D_H - S_{II})S_{II}} \quad (2)$$

где P , D_H , S_{II} – соответствуют обозначениям в формуле (1).

Расчетное соотношение условия прочности при сейсмическом воздействии для ПЗ

$$\sigma \leq 1,6 [\sigma_H], \quad (3)$$

для МРЗ

$$\sigma \leq 1,8 [\sigma_H]. \quad (4)$$

В этом случае: $M = M_{ПЗ}$; $F = F_{ПЗ}$ – для ПЗ; $M = M_{МЗ}$; $F = F_{МЗ}$ – для МРЗ.

Значение внутреннего давления Р принимается максимальным для проектной аварии с межконтурной течью 7,8 МПа [1].

Значения максимальных горизонтальных ускорений 7,3 м/с² и вертикальных 4,2 м/с² на уровне помещений А-820 по результатам [8].

Максимальный изгибающий момент М определяется в соответствии с [4] для аналогичных элементов конструкции БРУ-А 1115, 960.

В результате поверочных расчетов установлены выполнения условий прочности для клапанов БРУ-А 1115, 960 при сейсмических воздействиях ПЗ = 6 баллов, МРЗ = 7 баллов и сочетании расчетных нагрузок ПА + МРЗ (ПА – проектная авария с межконтурными течами).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Запорожская АЭС. Энергоблок №5. Отчет по анализу безопасности. ВАБ для внутренних исходных событий//Финальный отчет – 21.5.59.ОБ.04.*
2. *Дополнительные материалы по анализу безопасности (ДМАБ)// Блок №5. Запорожская АЭС. 21.5.70.ОБ.01.01.*
3. *Техническое обоснование безопасности (ТОБ)// Блок №5. Запорожская АЭС. 21.5.70.ОБ.05.02.*
4. *ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов АЭУ.*
5. *ПНАЭ Г-5-006-87. Нормы проектирования сейсмостойких АС.*
6. *ТУ 108-985-80. Технические условия для арматуры АЭС с ВВЭР.*
7. *Паспорт. Клапан запорно-дроссельный. 1115-300/350-Э. 1115-300/350-Э ПС. ЧЗЭМ-1988 г.*
8. *Выполнение расчётов сейсмических характеристик и внесение информации в адаптированные перечни оборудования энергоблоков, подлежащего квалификации. ЭТАП №1. Отчёт о расчётных обоснованиях обобщённых спектров ответа для отметок установки оборудования от сейсмических воздействий Запорожская АЭС//ХИЭП-2008 г.*
9. *ДБН В1.1-12:2006 «Строительство в сейсмических районах Украины», 2007*
10. *Stevenson and Associates, John D.Stevenson, “Peak Ground response accelerations suggested for application for seismic evaluations of Ukrainian NPP”, 1994.*
11. *«Проблемы безопасности атомных электростанций с реакторами ВВЭР-1000/320», МАГАТЭ, Вена, 1997г.*

КВАЛІФІКАЦІЯ БРУ-А ЗАПОРІЗЬКОЇ АЕС ПРИ СЕЙСМІЧНИХ ВПЛИВАХ

К. С. Агейкіна, Г. Г. Габляя, Г. С. Драган, Ю. Л. Коврижкін

Наведено аналітичні й розрахункові обґрунтування консервативної кваліфікації БРУ-А серії 1115, 960 на сейсмічні впливи понад проектних 6 балів за шкалою MSK. Показано, що при сейсмічних впливах у 7 балів умови міцності конструкції БРУ-А виконуються.

Ключові слова: швидкодіюча редуційна установка скидання пари в атмосферу (ШРУ-А), кваліфікація, сейсмічні впливи, розрахунки міцності.

QUALIFICATION BRU-A AT SEISMIC INFLUENCES OF ZAPOROZHIA AES

K. S. Ageykina, G. G. Gablaya, G. S. Dragan, J. L. Kovrizhkin

In article analytical and settlement substantiations of conservative qualification SRV of a series 1115, 960 on seismic influences over design 6 points on scale MSK are submitted. It is shown, that at seismic influences in 7 points of a condition of durability of design SRV are carried out.

Keywords: safety and relief valves (SRV), qualification, seismic influences, strength calculations.

Поступила в редакцию 28.09.09