

В. А. Куров, В. О. Посох, Т. В. Пирогов

*ГП «Государственный научно-инженерный центр систем контроля и аварийного реагирования»,
просп. Героев Сталинграда, 64/56, г. Киев, 04213, Украина*

Разработка и реализация компенсирующих мероприятий по обеспечению сейсмостойкости оборудования и трубопроводов систем, важных для безопасности

Ключевые слова:

атомная электростанция,
компенсирующие мероприятия,
проектно-сметная документация,
сейсмостойкость,
максимальное расчетное
землетрясение,
техническое решение.

Рассмотрены основные подходы к реализации компенсирующих мероприятий по обеспечению сейсмостойкости оборудования и трубопроводов систем, важных для безопасности на примере энергоблока № 1 ОП «Хмельницкая атомная электростанция». Представлены основные варианты технических решений, направленных на повышение сейсмостойкости оборудования и трубопроводов. Обоснование технических решений выполняется расчетным анализом с использованием современных программных кодов.

Введение

Сейсмическая безопасность существующих атомных электростанций (АЭС) признана одной из наиболее важных задач анализа безопасности.

Основной целью сейсмической квалификации существующих АЭС с водо-водяным энергетическим реактором (ВВЭР) является повышение сейсмической безопасности до уровня, рекомендуемого международным сообществом и в соответствии со стандартами Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ).

В соответствии с постановлением коллегии Госатомрегулирования № 13 [1], необходимо подтверждение стойкости к сейсмическим воздействиям уровня 7 баллов по шкале MSK-64, но не меньше 0,1 g в соответствии с нормами [2]. Таким образом, в рамках реализации мероприятий Комплексной сводной программы повышения уровня безопасности энергоблоков атомных электростанций (КсПБ), выполнены мероприятия № 10101 «Разработка материалов и выполнение квалификации элементов энергоблока» и № 18101 «Обеспечение сейсмостойкости систем и строительных конструкций».

Исходные события для реализации мероприятий по повышению сейсмостойкости

Для продления эксплуатации в сверхпроектный период энергоблока № 1 ОП «Хмельницкая АЭС» в рамках реализации мероприятий КсПБ № 10101 для ряда оборудования, важного для безопасности, выполнена квалификация на сейсмические воздействия на основе анализа опыта предыдущих землетрясений с использованием процедуры GIP-ВВЭР [3, 4].

По результатам оценки сейсмостойкости важного для безопасности оборудования методом GIP-ВВЭР (визуальной инспекции) были обнаружены недостатки (замечания) двух категорий: легкоустраняемые замечания и замечания, требующие разработки и реализации компенсирующих мероприятий.

В случае легкоустраняемых замечаний мероприятия по повышению сейсмостойкости оборудования представляют собой незначительные доработки в части анкеровки и закрепления оборудования и выполняются персоналом АЭС без разработки проектной документации.

Для замечаний, требующих разработки и реализации компенсирующих мероприятий, необхо-

© В. А. Куров, В. О. Посох, Т. В. Пирогов, 2019

димо выполнять техническое переоснащение с разработкой рабочей проектной документации. В данную категорию замечаний попадает оборудование с недостатками, связанными с недостаточно жесткой несущей конструкцией, на которой оборудование закреплено, или которая должна обеспечивать жесткое соединение с несущей строительной конструкцией, а также сейсмическими взаимодействиями с расположенным в непосредственной близости дополнительным оборудованием, трубопроводами, конструкциями.

Для устранения вышеприведенных замечаний разрабатываются компенсирующие мероприятия: проектирование и изготовление сейсмостойкой несущей конструкции для надежного закрепления на ней оборудования; сейсмическая оценка дополнительного оборудования/конструкции (например, расчёт сейсмостойкости); взаимное раскрепление; устранение дополнительного оборудования/конструкций; разработка специальных дополнений к инструкции по эксплуатации такого оборудования и т. п.

В рамках реализации мероприятий КсПБ № 18101 для трубопроводов систем, важных для безопасности, выполнена оценка сейсмостойкости расчетным анализом в соответствии с действующими нормами Украины [2, 5, 6] с учетом положений методики граничной сейсмостойкости [7].

Оценка сейсмостойкости показала, что некоторые участки трубопроводов не соответствуют критериям прочности при одновременном воздействии технологических нагрузок при нормальной эксплуатации (НЭ) и максимальном расчетном землетрясении (МРЗ) уровня 7 баллов (0,1 g) по шкале MSK-64. Компенсирующими мероприятиями в таких случаях является либо ослабление существующей опоры трубопровода (например, замена неподвижной жесткой опоры на направляющую), либо установка дополнительной опоры трубопровода в наиболее критическом месте.

Таким образом, по результатам оценки сейсмостойкости и квалификации на сейсмические воздействия для энергоблока № 1 Хмельницкой АЭС определен перечень позиций, для которых необходимо разработать проектную документацию и выполнить компенсирующие мероприятия по обеспечению сейсмостойкости. На рис. 1 представлена блок-схема, результирующая мероприятия по обеспечению сейсмостойкости оборудования и трубопроводов.



Рис. 1. Блок-схема выполнения мероприятий по обеспечению сейсмостойкости оборудования и трубопроводов

Разработка рабочей проектной документации

Рабочая проектная документация разрабатывается в соответствии с действующими нормами Украины [8–10] и состоит из рабочих чертежей, сметной документации (локальная смета, ведомость производственных расходов) и пояснительной записки с описанием реализации технического решения.

Рабочие чертежи выполняются для выбранных вариантов технического решения компенсирующих мероприятий. Например, если для повышения сейсмостойкости необходимо установить дополнительную опорную конструкцию трубопровода или оборудования, рабочие чертежи должны содержать подробное описание новой дополнительной опоры.

Из описанных выше типов замечаний следует, что основными техническими решениями для повышения сейсмостойкости оборудования и трубопроводов являются:

- разработка дополнительной опорной металлоконструкции трубопровода;

- разработка дополнительной опорной металлоконструкции трубопроводной арматуры;

- взаимное раскрепление трубопроводов, арматур, арматуры и конструкции, трубопровода и конструкции;

- устранение дополнительной конструкции, с которой взаимодействует оборудование.

Далее рассмотрены примеры реализации компенсирующих мероприятий для повышения сейсмостойкости трубопроводных арматур и трубопроводов систем, важных для безопасности энергоблока № 1 Хмельницкой АЭС.

Разработка дополнительной опорной металлоконструкции трубопровода

Для оценки сейсмостойкости трубопроводов построена расчетная конечно-элементная модель. Расчет на сейсмические воздействия выполнялся линейно-спектральным методом с учетом собственных форм колебаний трубопроводов. Сейсмические нагрузки определялись с использованием поэтажных спектров ответа уровня МРЗ для отметки (+40,900; +36,900) реакторного отделения блока № 1 Хмельницкой АЭС для 2 % демпфирования (рис. 2 и 3).

По результатам расчета на сейсмические воздействия определено, что участок трубопровода системы компенсации давления не удовлетворяет критериям прочности 1,8 [σ] при комбинации нагрузений НЭ + МРЗ [2]. Распределение напряжений в рассматриваемом трубопроводе при НЭ + МРЗ представлено на рис. 4. На выделенном участке напряжения достигают 230 МПа при допустимых 1,8 [σ] = 212 МПа.

По результатам расчетного анализа с разными граничными условиями (дополнительные опоры различных типов: направляющая, скользящая, пружинная; различные места установки дополнительной опоры) оптимальным вариантом

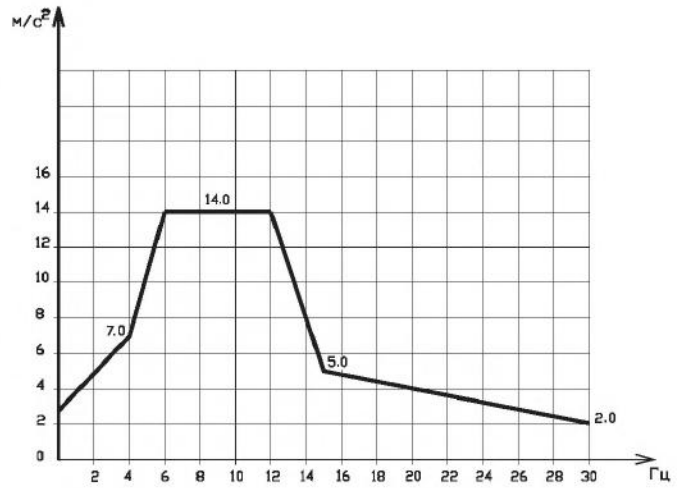


Рис. 2. Обобщенный спектр ответа при горизонтальных колебаниях

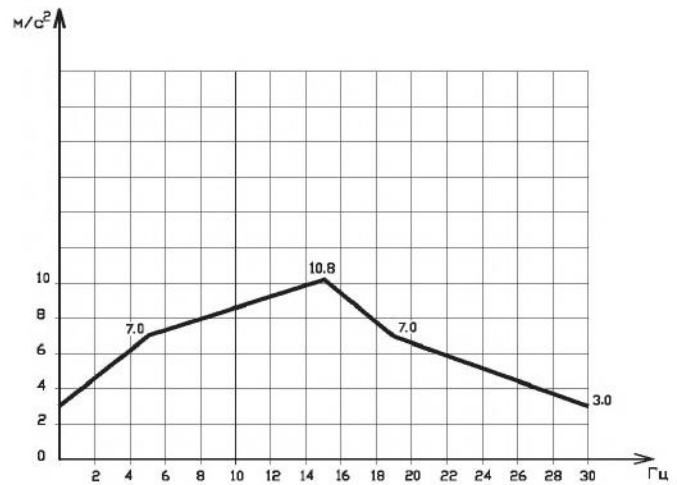


Рис. 3. Обобщенный спектр ответа при вертикальных колебаниях

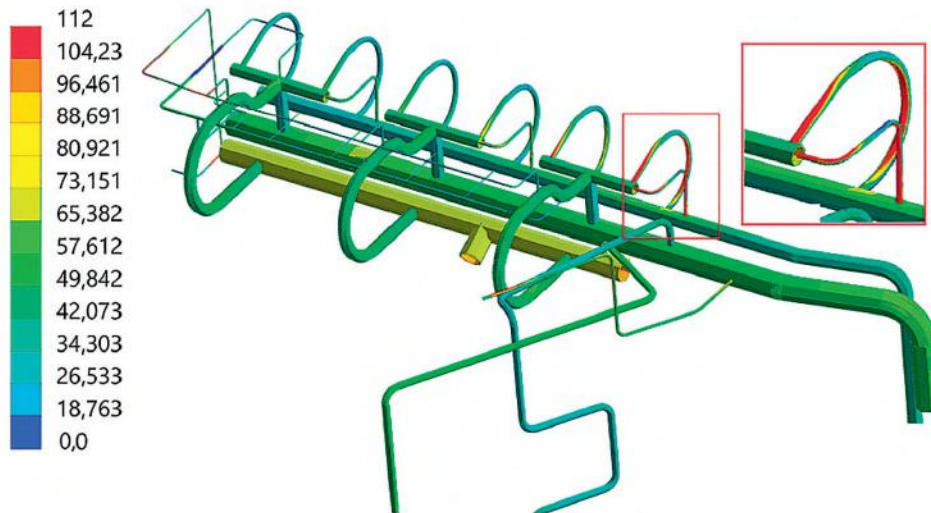


Рис. 4. Распределение напряжений в трубопроводе при НЭ + МРЗ, МПа

повышения сейсмостойкости определена установка направляющей опоры трубопровода. По результатам визуальных осмотров по месту эксплуатации рассматриваемых трубопроводов выбрано точное место установки опоры, которую возможно присоединить к соседним металлоконструкциям. При этом металлоконструкции должны выдерживать дополнительные нагрузки, получаемые от веса опоры и трубопроводов, а также нагрузки при потенциальных сейсмических воздействиях уровня МРЗ 7 баллов по шкале MSK-64. По результатам расчета на прочность определена конфигурация опорной металлоконструкции с точными размерами, характеристиками материалов, типами соединения и т. д. Рабочий чертеж опорной металлоконструкции представлен на рис. 5.

Для подтверждения корректного выбора места установки опорной металлоконструкции выполнен дополнительный расчет трубопроводов, учитывающий трехмерную конечно-элементарную модель опорной металлоконструкции (рис. 6). Как видно из рисунка, напряжения в трубопроводе значительно уменьшились (50–60 МПа) по сравнению с расчетом без опоры (230 МПа). При этом нагрузки на саму опорную металлоконструкцию незначительны.

Таким образом, после установки дополнительной опорной металлоконструкции, разработанной на основании проектно-сметной документации, трубопровод будет устойчивым к сейсмическим воздействиям уровня МРЗ 7 баллов (0,1 g).

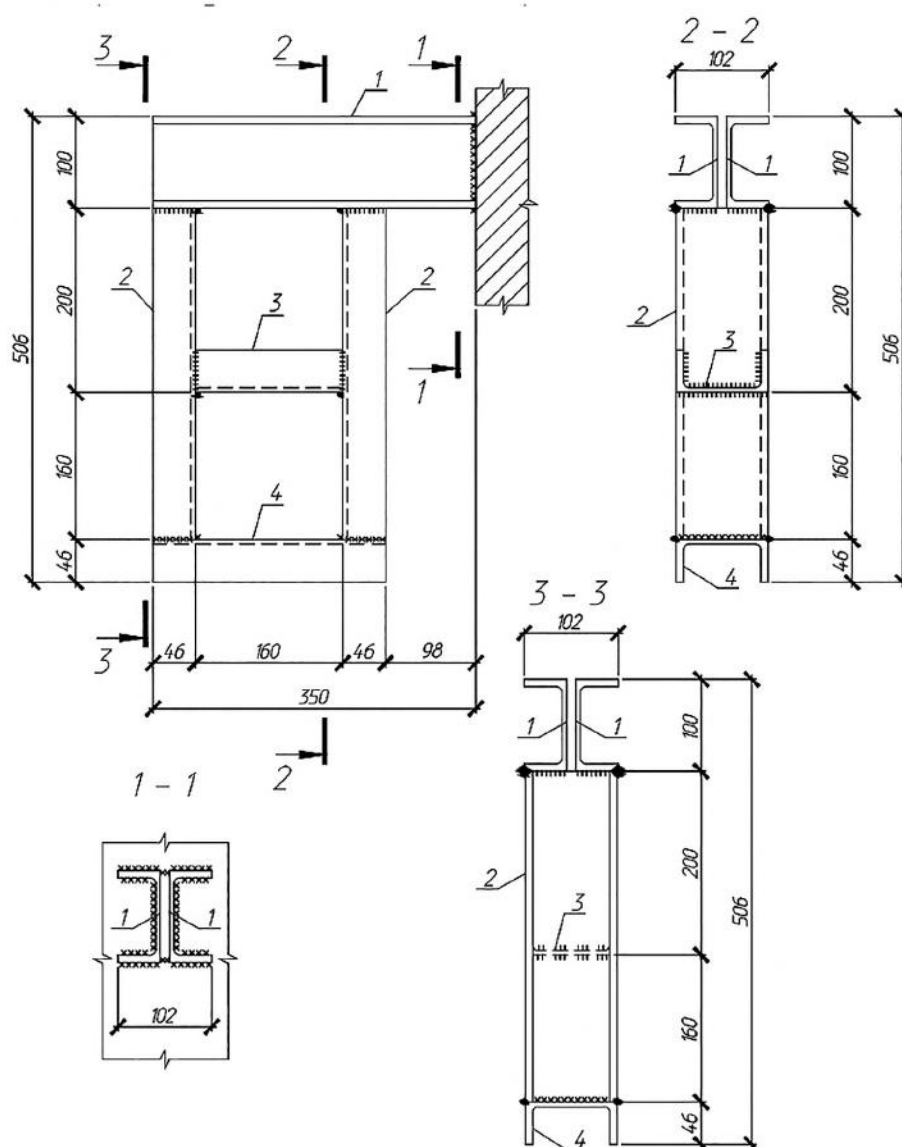


Рис. 5. Чертеж разработанной дополнительной опоры трубопровода

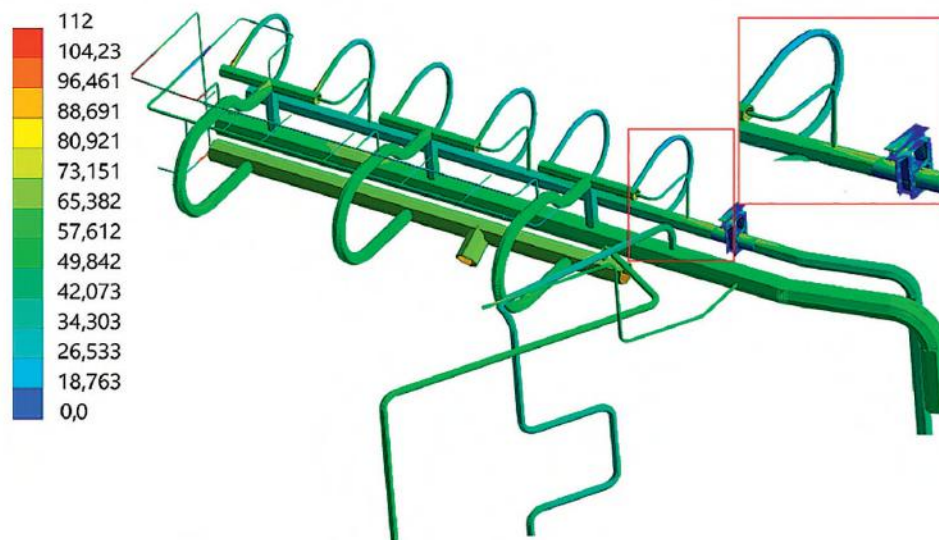


Рис. 6. Распределение напряжений в трубопроводе при НЭ + МРЗ с разработанной опорой, Мпа

Компенсирующие мероприятия, направленные на устранение взаимодействия

Как было сказано выше, одним из основных замечаний по результатам выполнения оценки сейсмостойкости оборудования, важного для безопасности, методом GIP-ВВЭР является взаимодействие квалифицируемого оборудования с близлежащими элементами: трубопроводом, трубопроводной арматурой, воздуховодом, металлоконструкцией, элемен-

тами оборудования (кабелями, защитными коробами, пультами управления и т. п.).

Основными путями решения вышеприведенной проблемы являются:

- разработка дополнительной опорной металлоконструкции арматуры или трубопровода, на которой расположена арматура;

- взаимное раскрепление арматуры с взаимодействующим элементом.

На рис. 7 представлен вариант взаимного рас-

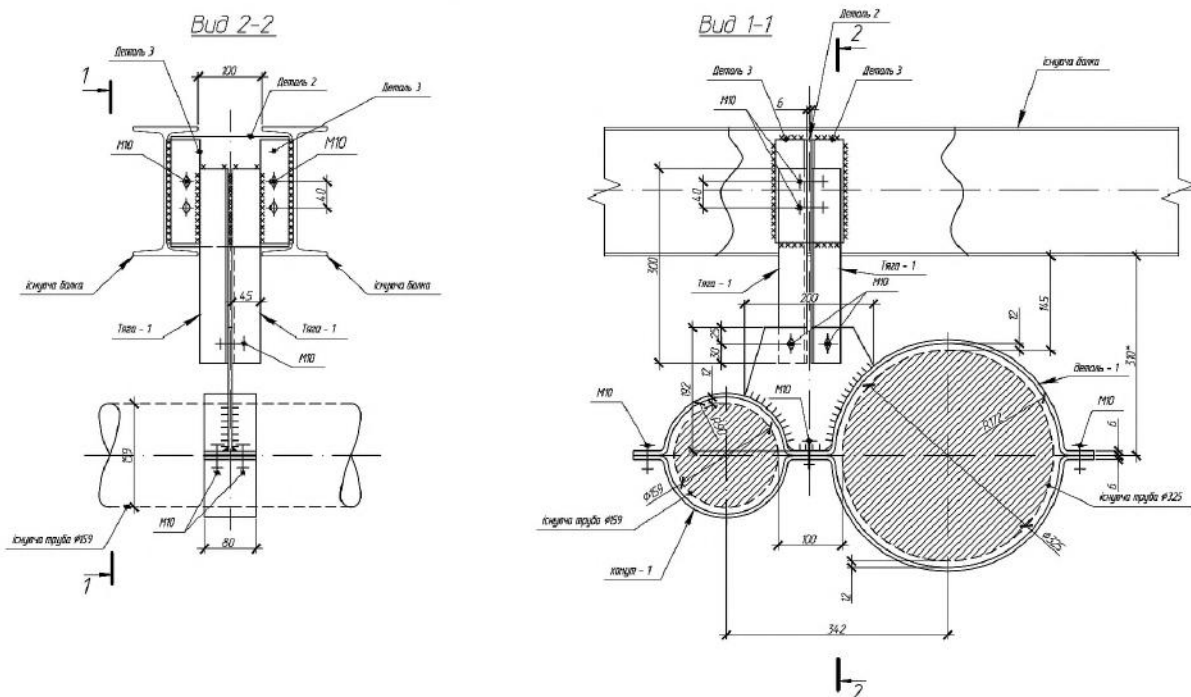


Рис. 7. Чертеж разработанной дополнительной опоры трубопроводов

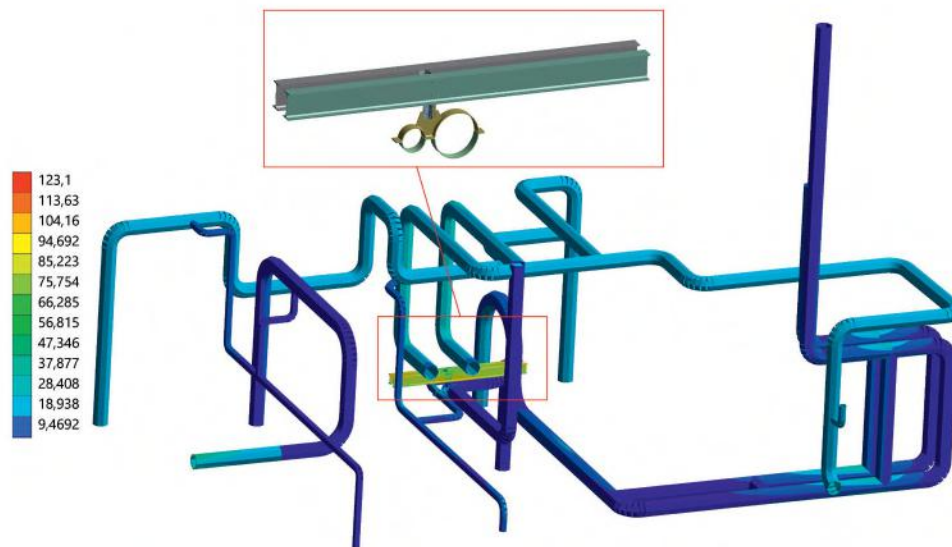


Рис. 8. Распределение напряжений в трубопроводе при НЭ + МРЗ с разработанной опорой, МПа

крепления трубопроводов с помощью опорной металлоконструкции для устранения взаимодействия трубопроводом диаметром 159 мм с трубопроводной арматурой, расположенной на расстоянии 500 мм от дополнительной опоры.

Аналогично описанному в предыдущем пункте подходу выполнен расчет на сейсмические воздействия при комбинации нагрузжений НЭ + МРЗ с разработанной опорной металлоконструкцией. Как видно из рис. 8, напряжения в трубопроводах и опорной металлоконструкции незначительные (до 120 МПа при допустимых 230 МПа). При этом данная конструкция устраняет соударение как трубопроводов, так и арматуры с трубопроводом.

Таким образом, после установки дополнительной опорной металлоконструкции, разработанной на основании проектно-сметной документации, замечание по взаимодействию трубопровода с арматурой будет снято, так как опора обеспечит отсутствие перемещения трубопроводов (и соответственно арматуры) друг к другу, что делает арматуру устойчивой к сейсмическим воздействиям уровня МРЗ 7 баллов.

Наиболее простым и соответственно экономичным, но не менее эффективным способом устранения замечаний по взаимодействию трубопроводных арматур с соседними арматурами, трубопроводами, конструкциям является взаимное раскрепление. Такое техническое решение обеспечит взаимное перемещение элементов в одно и то же направление при сейсмическом воздействии, что исключит соударение элементов и, как следствие, выход из строя оборудования. Однако такое решение имеет

ряд ограничений, связанных с местом эксплуатации оборудования, а также потенциального повышения напряжений в трубопроводах при перемещениях во время сейсмических воздействий, связанных с ограничениями, вызванными от взаимного раскрепления.

На рис. 9 представлены примеры взаимного раскрепления различных элементов.

Закключение

Действующие требования к сейсмостойкости [2, 11] оборудования и трубопроводов АЭС значительно повысились по сравнению с проектными требованиями, что связано в первую очередь с событиями, произошедшими на АЭС «Фукусима-Дайичи».

По результатам работ по оценке сейсмостойкости ряд оборудования и трубопроводов не удовлетворяют действующим нормативным документам [2, 6, 11]. В результате чего установлена необходимость разработки компенсирующих мероприятий по повышению сейсмостойкости оборудования и трубопроводов, а следовательно и проектно-сметной документации для реализации данных мероприятий.

Для каждой единицы оборудования или трубопровода индивидуально определяется техническое решение, исходя их условий эксплуатации, размещения, результатов поверочных расчетов.

В статье рассмотрены основные примеры технических решений, направленных на повышение сейсмостойкости трубопроводов и оборудования,

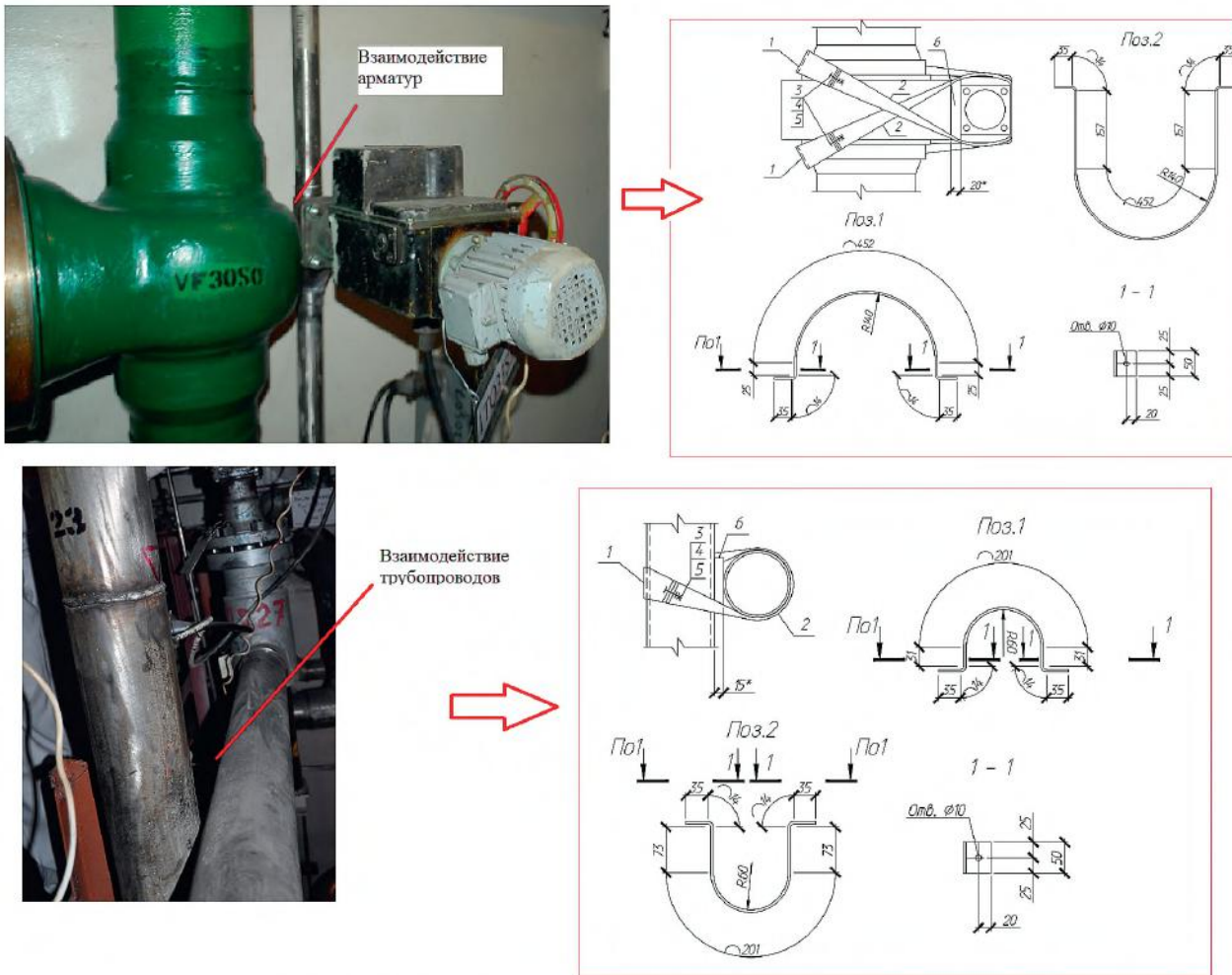


Рис. 9. Примеры взаимного раскрепления элементов оборудования и трубопроводов

в частности трубопроводных арматур. Так, основными решениями для повышения сейсмостойкости оборудования и трубопроводов являются: разработка дополнительной опорной металлоконструкции; взаимное раскрепление взаимодействующих элементов.

Эффективность выбора технического решения подтверждается расчетным анализом, выполненным в соответствии с действующими нормами Украины [2, 5, 6].

Список использованной литературы

1. Постановление Коллегии Госатомрегулирования «О результатах выполнения целевой внеочередной оценки состояния безопасности действующих энергоблоков АЭС с учетом Фукусима-Даичи» от 24–25.11.2011 г. № 13 / Госатомрегулирования Украины. – 2011. – Режим доступа: <http://www.snrc.gov.ua/nuclear/uk/publish/article/169634>.
2. НП 306.2.208-2016. Вимоги до сейсмостійкого проєк-

- тування та оцінки сейсмічної безпеки енергоблоків атомних станцій / Державна інспекція ядерного регулювання України // Офіційний вісник України. – 2016. – № 92. – 59 с.
3. Generic Implementation Procedure (GIP) for Seismic Verification of Nuclear Power Plant Equipment. Revision 2A / SQUG [Seismic Qualification Utility Group], 1992. – 31 с.
4. DITI 300/376-RU/R.2. Методология оценки сейсмостойкости оборудования для целей квалификации на сейсмические воздействия / Институт ядерных исследований (г. Ржеж, Чешская Республика). – 2009. – 90 с.
5. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок [Введены с изменениями 01.07.1987 г.] / Госатомэнергонадзор СССР. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.
6. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування / Мінрегіон України. – Київ : Укрархбудінформ, 2014. – 199 с.
7. МТ-Г.0.03.326-13. Методика расчетного анализа сейсмостойкости элементов действующих АЭС в

рамках метода граничної сейсмостійкості / НАЭК «Энергоатом». – Київ, 2013. – 51 с.

8. ДБН А.2.2-3:2014. Склад, порядок розроблення, погодження та затвердження проектної документації для будівництва / Мінрегіон України. – Київ, 2014. – 33 с.
9. ДСТУ Б А.2.4-4:2009. Основні вимоги до проектної і робочої документації / Мінрегіон України. – Київ, 2009. – 66 с.
10. ДСТУ Б Д.1.1-1:2013. Правила визначення вартості будівництва / Мінрегіон України. – Київ, 2013. – 88 с.
11. ДБН В.1.1-12:2014. Будівництво у сейсмічних районах України/ Мінрегіон України. – Київ, 2014. – 110 с.

В. О. Куров, В. О. Посох, Т. В. Пирогов

ДП «Державний науково-інженерний центр систем контролю та аварійного реагування»,
просп. Героїв Сталінграда, 64/56, м. Київ, 04213

Розробка та реалізація компенсувальних заходів із забезпечення сейсмостійкості обладнання та трубопроводів систем, важливих для безпеки

Розглянуто основні підходи до реалізації компенсувальних заходів із забезпечення сейсмостійкості обладнання і трубопроводів систем, важливих для безпеки на прикладі енергоблока № 1 ВП «Хмельницька атомна електростанція». Представлено основні варіанти технічних рішень, спрямованих на підвищення сейсмостійкості обладнання та трубопроводів. Обґрунтування технічних рішень виконано розрахунковим аналізом з використанням сучасних програмних кодів.

Ключові слова: атомна електростанція, компенсувальні заходи, проектно-кошторисна документація, сейсмостійкість, максимальний розрахунковий землетрус, технічне рішення.

V. O. Kurov, V. O. Posokh, T. V. Pirogov

State Enterprise “State Scientific Engineering Center of Control System and Emergency Response”, 64/56, Geroiv Stalingrada ave, Kyiv, 04213, Ukraine

Development and implementation of compensating activities for providing the seismic resistance of equipment and pipelines of systems important for safety

One of the requirements for extending operation during the over-design period of NPP power units is to perform seismic resistance assessment (qualification for seismic effects) of equipment and pipelines of systems important to safety. According to the results of such work at power unit 1 of the Khmelnytsky Nuclear Power Plant for a number of equipment and pipelines, it is necessary to perform compensating activities aimed to increase seismic resistance. To implement compensating activities, it is necessary to develop technical solutions based on the design and estimate documentation.

The design and estimate documentation is developed in accordance with the current norms of Ukraine and consists of working drawings, estimate documentation (local estimate, statement of production costs) and an explanatory note describing the implementation of the technical solution.

Working drawings are performed for the selected options for the technical solution of compensating activities. For example, if to increase seismic resistance, it is necessary to install an additional support structure for the pipeline or equipment, the working drawings should contain a detailed description of the new additional support.

The main technical solutions for increasing the seismic resistance of equipment and pipelines are: development of an additional supporting metal pipeline; development of additional steel support for pipeline valves; mutual fastening of interacting elements; elimination of construction with interaction of the equipment. The justification of technical solutions is performed by calculation analysis using modern software codes.

The article presents two examples of technical solutions: the development of additional support for the pipeline pressure compensation systems; mutual detachment of pipelines in order to avoid interaction of reinforcement with pipeline.

Keywords: nuclear power plant, compensating activities, design estimates documentation, seismic resistance, maximum calculated earthquake, technical solution.

References

1. Resolution of the Board of State Nuclear Regulatory Committee of the Ukraine “On the Results of the Implementation of the Target Extraordinary Assessment of the Safety Status of Operating NPP Units Taking into Account Fukushima-Daiichi” of November 24–25, 2011. Available at: <http://www.snrc.gov.ua/nuclear/uk/publish/article/169634>. (in Russ.)
2. NP 306.2.208-2016. Requirements for Seismic Resistance Design and Evaluation of Seismic Safety of Ukrainian NPPs. *Official Bulletin of Ukraine*, 2016, no. 92, art. 59. (in Ukr.)

3. Generic Implementation Procedure (GIP) for Seismic Verification of Nuclear Power Plant Equipment. Revision 2A / SQUG [Seismic Qualification Utility Group], 1992, 31 p.
4. DITI 300/376-RU/R.2. *Methodology for assessing the seismic resistance of equipment for qualification for seismic effects*. ÚJV Řež, 2009, 90 p. (in Russ.)
5. Gosatomenergondzor of the USSR (1989). *PNAE G-7-002-86. Standards for strength calculation of equipment and pipelines of nuclear power plants* [introduced with changes of 07/01/1987]. Moscow: Energoatomizdat, 525 p. (in Russ.)
6. MinRegion of Ukraine (2014). *DBN V.2.6-198: 2014. Steel structures. Design Standards*. Kyiv: Ukrrahbudinform, 199 p. (in Ukr.)
7. SE “NNEGC “Energoatom” (2013). *MT-T.0.03.326-13. The method of calculation analysis of the seismic resistance of elements of operating NPPs in the framework of the boundary seismic resistance method*. Kyiv, 51 p. (in Russ.)
8. DBN A.2.2-3:2014. *Composition, procedure for development, approval and approval of project documentation for construction*. Kyiv, Minregion of Ukraine, 2014, 33 p. (in Ukr.)
9. DSTU B A.2.4-4:2009. *Basic requirements for design and working documentation*. Kyiv: Minregion of Ukraine, 2009, 66 p. (in Ukr.)
10. DSTU B D.1.1-1:2013. *Rules for determining the cost of construction*. Kyiv, Minregion of Ukraine, 2013, 88 p. (in Ukr.)
11. DBN B.1.1-12:2014. *Construction in seismic areas of Ukraine*. Kyiv, Minregion of Ukraine, 2014, 110 p. (in Ukr.)

Надійшла 27.02.2019

Received 27.02.2019