

РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО РАСКРЕПЛЕНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ВЕРХНИХ БЛОКОВ ЭНЕРГООБЛОКОВ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ОТ ВНЕШНИХ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

В. М. ТОРОП¹, Б. О. ЯХНО², С. В. КОЗЛОВ³

¹ИЭС им. Е.О.Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²НТТУ «Киевский политехнический институт». 03056, г. Киев, пр-т Победы, 37. E-mail: mmientu@kpi.kiev.ua

³ООО «Ютем-инжиниринг». 08202, г. Буча, Киевская обл., ул. Чкалова, 3. E-mail: kozlovsv@ukr.net

Основной целью данной работы является выполнение комплекса мероприятий по управлению старением верхних блоков (ВБ) энергоблоков № 1, 2 ОП «Ривненская АЭС» с учетом современных требований, предъявляемых международными и отечественными регулирующими органами, к повышению надежной и безопасной эксплуатации АЭС. Одной из составляющих этого направления исследований является выполнение поверочных расчетов на прочность металлоконструкций (МК) ВБ от действия внешних динамических нагрузок, которые могут вызываться сейсмическими воздействиями с учетом событий, происшедших 11 марта 2011 г. на АЭС «Фукусима-1». В работе представлены результаты расчетов на прочность МК ВБ энергоблоков № 1, 2 ОП «Ривненская АЭС» при действии внешних динамических воздействий в случае проектного решения и с учетом дополнительного раскрепления МК ВБ. Практической реализацией данной работы является разработка технического проекта дополнительного раскрепления МК ВБ с учетом модернизации как тепломеханического оборудования, так и строительных конструкций. Библиогр. 6, рис. 8.

Ключевые слова: верхний блок, ВВЭР-440, металлоконструкция, прочность, сейсмостойкость

Верхний блок предназначен для уплотнения реактора, размещения приводов автоматических регулирующих компенсирующих (АРК), выводов системы ВРК, удержания от всплытия блока защитных труб (БЗТ) и шахты реактора.

Верхний блок устанавливается на фланец корпуса реактора и состоит из следующих основных узлов: крышки, чехлов АРК, коллекторов и трубопроводов охлаждения приводов АРК, коллектора и трубопроводов воздухоудаления, траверсы, металлоконструкции, теплоизоляции крышки.

Металлоконструкция является несущей частью верхнего блока (ВБ). Она предназначена для транспортировки ВБ и для удержания приводов АРК в вертикальном положении.

Металлоконструкция состоит из:

- шести бобышек, приваренных к крышке реактора;
- шести штанг М90 и шести надставок М90 (штанги ввернуты в бобышки);
- трех поясов, через которые проходят штанги (пояса закреплены сваркой на штангах с помощью втулок);
- раскосов в виде труб, установленных между нижним и средним поясами, закрепленных при помощи сварки к поясам и штангам М90 через втулки;
- решетки дистанционирующей, приваренной к верхнему поясу;
- шести гаек для опоры под установку надставок;

– шести гаек для закрепления траверсы.

Для дополнительного восприятия возможных динамических воздействий при модернизации металлоконструкции в шахте ВБ устанавливаются распорные устройства на уровне среднего пояса и раскосы между верхним поясом и штангами. Проектное решение по дополнительному раскреплению верхнего блока от внешних динамических воздействий схематически показано на рис. 1, 2. Распорное устройство выполнено в виде коробчатого профиля сечением 140×200 мм. Концевые детали распорного устройства имеют поверхность для установки съемных клиньев и закрепляются к ложементу сваркой при помощи ребер. Раскрепление штанг М90 осуществляется при помощи восьми раскосов трубчатого сечения, которые крепятся сваркой к штангам и к дистанционирующей решетке.

Элементы металлоконструкции ВБ в процессе эксплуатации нагружены собственным весом и весом технологического оборудования, расположенного на ВБ. В рабочем режиме реакторной установки (РУ) для металлоконструкции ВБ также учитываются температурные расширения крышки реактора в зоне соединения штанг металлоконструкции с бобышкой в виде радиальных перемещений и углов поворота штанг.

При сейсмических воздействиях и проектных авариях элементы металлоконструкции дополнительно нагружены инерционными усилиями от колебаний верхнего блока и корпуса реактора.

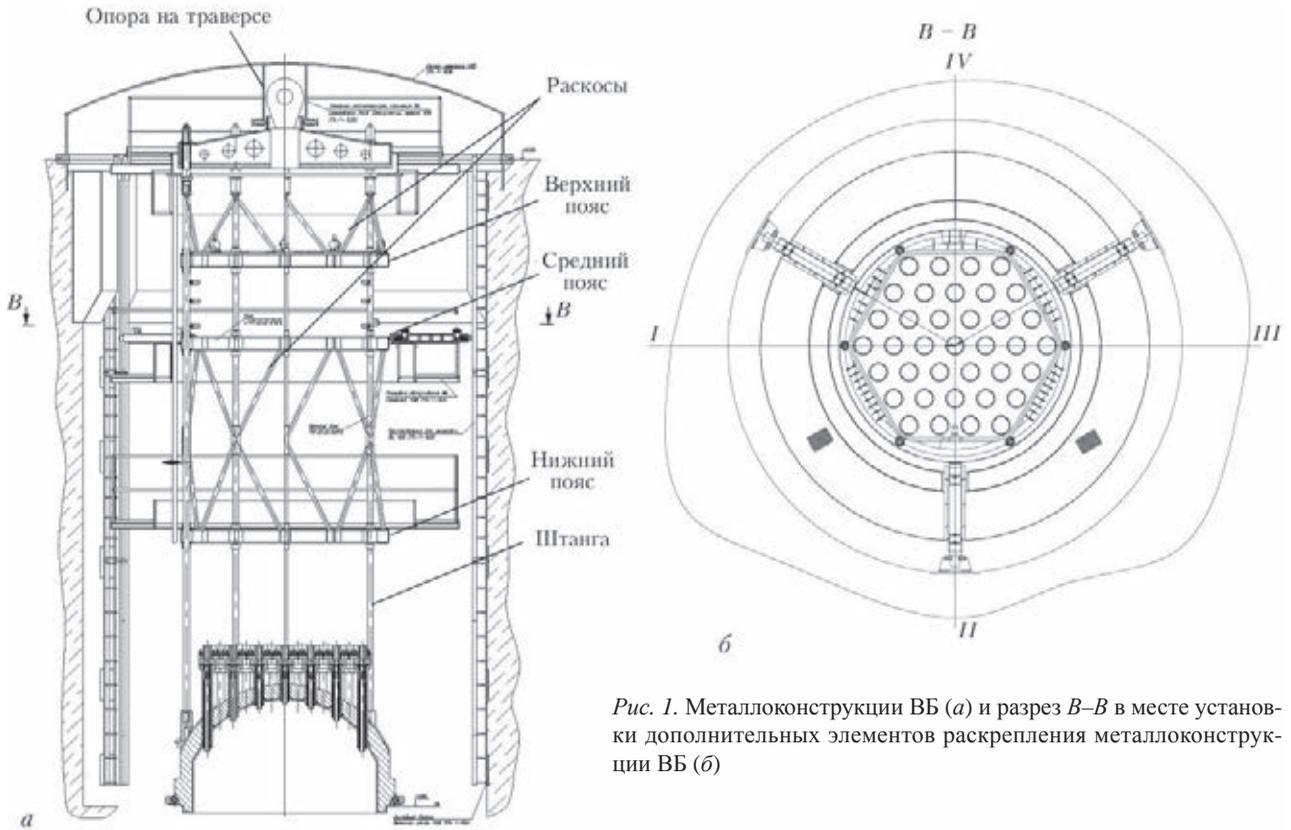


Рис. 1. Металлоконструкции ВБ (а) и разрез В-В в месте установки дополнительных элементов раскрепления металлоконструкции ВБ (б)

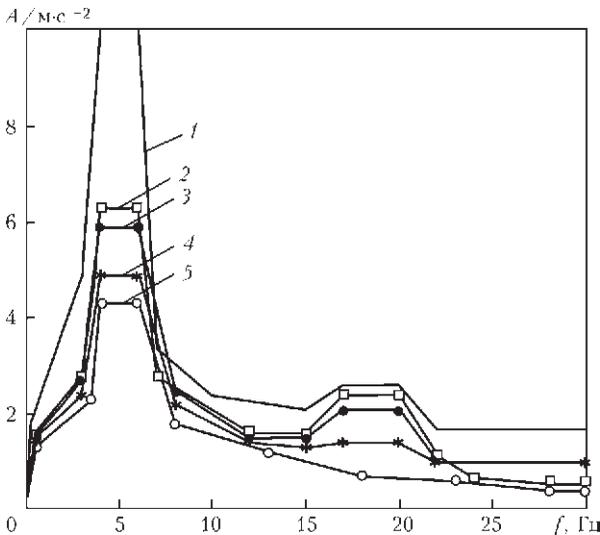


Рис. 2. Исходные горизонтальные спектры отклика при МРЗ 6 баллов: 1 – отметка +32,700 м; 2 – +22,500; 3 – +16,400; 4 – +12,700; 5 – +6000

В качестве исходных данных внешних динамических воздействий использовали значения спектра ответа для возможных землетрясений мощностью 6 баллов (0,05g) и 7 баллов (0,1g). Для землетрясения мощностью 6 баллов (0,05g) при максимальном расчетном землетрясении (МРЗ) значения спектра ответа принимались из данных, приведенных в отчете [1] (рис. 2). Учитывая повышенные требования к сейсмостойкости и увеличение динамических воздействий до уровня МРЗ = 7 баллов с ускорением на грунте не менее 0,1g, использовали горизонтальные и вертикальные по-

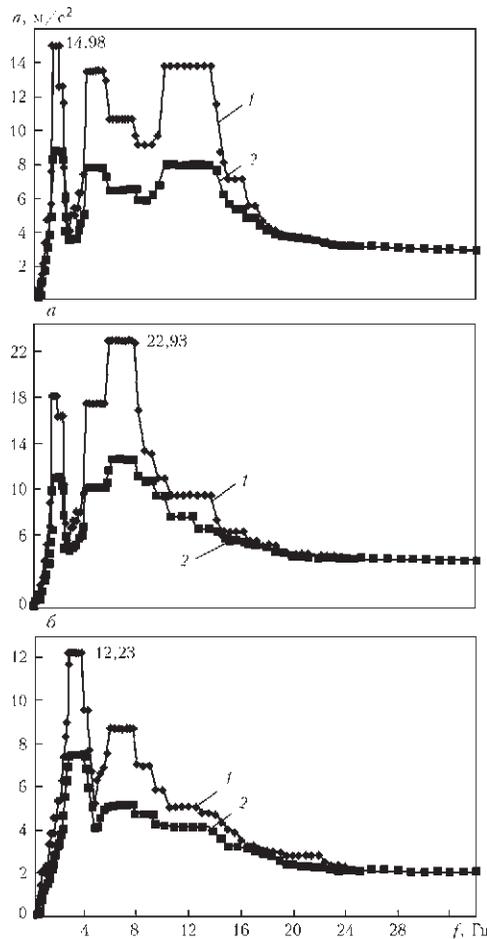


Рис. 3. Спектры ответа по оси X (а), Y (б) и Z (в) для стальной конструкции здания реактора: 1 – демпфирование 2%; 2 – 5

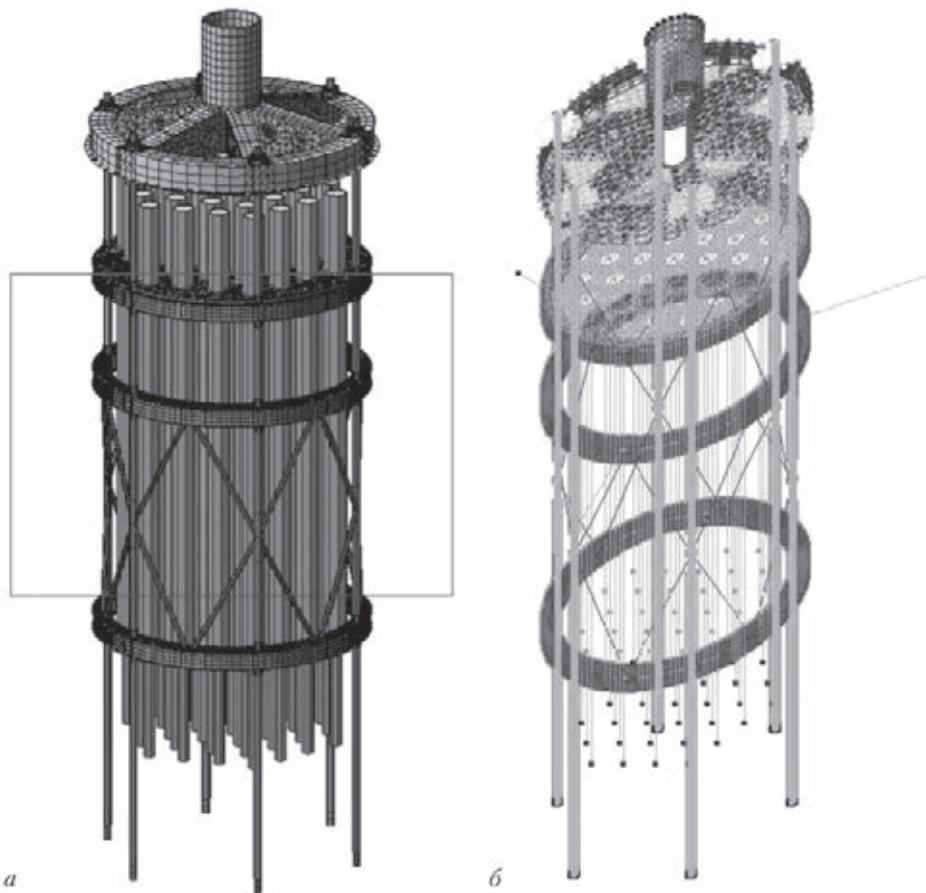


Рис. 4. Конечно-элементная модель ВБ, построенная в ПК «ЛИРА-САПР 2011»: а – без дополнительных конструкций раскрепления; б – с дополнительными элементами раскрепления

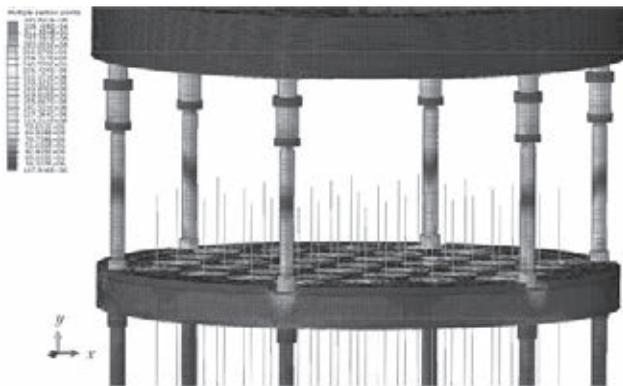


Рис. 5. Напряжения в штангах верхнего пояса
тажные спектры ответа на отметках реакторного отделения, принятые на основании документа [2].

Для стальных конструкций здания реактора использовали значения спектра ответа, приведенные на рис. 3 [2]. В документе [2] значения новых спектров ответа для стальных конструкций здания реактора приведены только для отметки 29,1 и 40,06 м. Поскольку максимальная высотная отметка закрепления ВБ расположена ниже отметки 29,1 м (7 баллов), то из условий консервативного подхода учитывали спектры ответа для отметки 29,1 м.

В расчетах использовали данные [3] по ВБ с приведенными механическими характеристиками стали штанг М90, изготовленных из стали



Рис. 6. Сейсмические напряжения в МК ВБ при учете двух распорок для МРЗ 7 баллов (0,1g) в зоне штанг М90 верхнего пояса и присоединения к надставке (максимальные сейсмические напряжения 171 МПа)

$R_y = 195$ МПа, $E = 2,06 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона = 0,3. Марка стали для конструкции раскрепления принималась в соответствии с п. 1.2.1.3, п.1.2.1.5, п. 1.2.1.10 ДБН В.2.6-163:2010 [4] с использованием табл. Е.1, Е.5.

Расчеты выполняли различными программными комплексами (ПК) с различными подходами к моделированию для проверки и подтверждения адекватности полученных результатов и принятых конструктивных решений: ПК «АВАQUS» и ПК «ЛИРА-САПР 2011». В используемых ПК модель металлоконструкций ВБ представляла со-

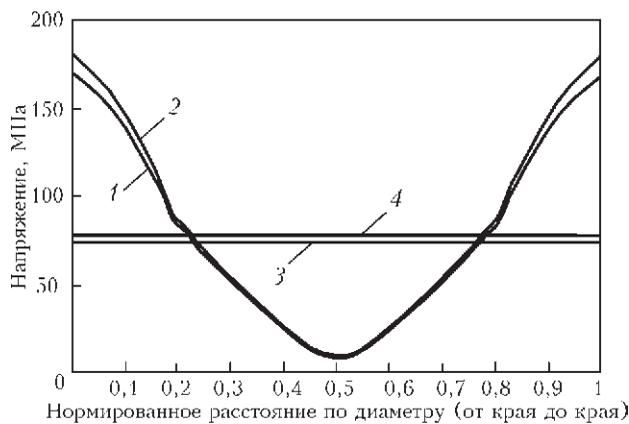


Рис. 7. Распределение сейсмических напряжений в зоне максимума по диаметру (поперечному сечению) при МРЗ 7 баллов (0,1 g): 1 – по 4-й теории прочности; 2 – по 3-й теории прочности; 3 – среднее по сечению по 4-й теории; 4 – среднее по сечению по 3-й теории

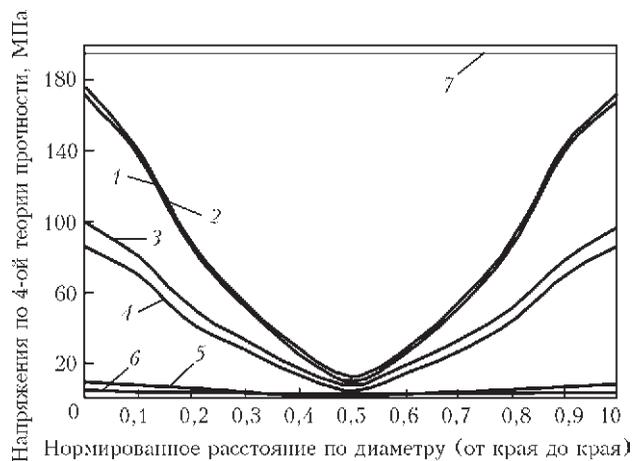


Рис. 8. Распределение напряжений по диаметру (поперечному сечению) в зоне максимальных сейсмических напряжений по 4-й теории прочности для различных эксплуатационных режимов при МРЗ 7 баллов (1 – МРЗ; 2 – НУЭ+МРЗ; 3 – НУЭ+ПА+ПЗ; 4 – ПЗ; 5 – ПА; 6 – НУЗ; 7 – расчетное сопротивление)

бой единую пространственную систему. Расчеты выполняли в два этапа – на первом определялись внутренние напряжения в элементах металлоконструкции ВБ реактора без дополнительного раскрепления, а на втором – выполнялся анализ напряженного состояния элементов ВБ с учетом дополнительного раскрепления. При расчете учитывали действительные условия эксплуатации металлоконструкций ВБ, а также возможные динамические воздействия для сочетаний нагрузок: нормальные условия эксплуатации + максимальное расчетное землетрясение (НУЭ+МРЗ), нормальные условия эксплуатации + проектная авария + проектное землетрясение (НУЭ+ПА+ПЗ), нормальные условия эксплуатации + проектное землетрясение (НУЭ+ПЗ).

Для решения поставленной задачи были построены геометрические модели металлоконструкций ВБ без дополнительных конструкций

раскрепления и с их наличием (рис.4). При этом в построении расчетных моделей учитывались особенности конструкции дополнительных горизонтальных распорок, разработанных с учетом возможных температурных перемещений металлоконструкций ВБ в процессе эксплуатации. Для этого предусматривались зазоры по 2 мм в торцах с каждой стороны распорок. При динамических колебаниях ВБ распорки работают только на сжатие, и только те, в сторону которых происходит колебание ВБ. Распорки, которые в этот момент находятся с противоположной стороны, выключаются из работы и вступают в работу только в случае колебания ВБ в их сторону.

На рис. 5 показана зона максимальных сейсмических нагрузок для исходной модели (без установок распорок и раскосов) – зона штанг верхнего пояса. Максимальные напряжения составляют порядка 340 МПа при МРЗ магнитудой 6 баллов. Установка раскосов и распорок позволяет снизить напряжения до приемлемого уровня. Так, на рис. 6 показана зона штанг верхнего пояса модернизированной модели при МРЗ магнитудой 7 баллов – максимальные напряжения по 4-й теории прочности составляют 172 МПа. При этом из рис. 7 видно, что напряжения возникают в основном в результате изгиба и максимум достигается только на поверхности штанг, центральная (внутренняя) часть штанг является менее нагруженной. На рис. 8 представлены уровни напряжений в наиболее опасном с сейсмической точки зрения зоне штанг в различных эксплуатационных режимах. При этом видно, что максимум не доходит до уровня расчетного сопротивления.

Выводы

Выполненные прочностные расчеты двумя независимыми программными комплексами ПК «ABAQUS» и ПК «ЛИРА САПР 2011», показали, что прочность элементов металлоконструкции верхних блоков энергоблоков № 1 и 2 ОП «Ривненская АЭС» без учета дополнительного раскрепления от внешних динамических воздействий не обеспечена, так как требования [4, 5] не выполняются.

Предложенная в техническом проекте установка дополнительных элементов раскрепления металлоконструкций верхнего блока снижает приведенные (действующие) напряжения в режиме НУЭ+МРЗ до уровня ниже допустимых. При этом наблюдается снижение напряжений в наиболее нагруженных конструктивных элементах металлоконструкций верхних блоков энергоблоков №1 и №2 ОП «Ривненская АЭС» – несущих штангах с 278,3 до 185,0 МПа (172 МПа по 4-й теории прочности) в сравнении с вариантом без раскрепления. Максимальные продольные усилия в

горизонтальных дополнительных элементах раскрепления составляют $N_{\max} = -116,0$ кН. Таким образом, установка элементов усиления при наиболее неблагоприятном сочетании нагрузок НУЭ + МРЗ способствует снижению напряжений в среднем на 36 %. При этом нет превышения расчетного сопротивления согласно ДБН В.2.6-163:2010 [6], которое равно 195 МПа. Таким образом, прочность элементов металлоконструкции верхних блоков энергоблоков № 1 и 2 ОП «Ривненская АЭС» с учетом дополнительного раскрепления от внешних динамических воздействий обеспечена, так как требования [4, 5] выполняются.

При нагреве конструкций на 50 °С линейные перемещения раскрепленного распорками среднего пояса происходят в пределах имеющихся температурных зазоров – 2 мм. Продольные усилия в распорках в пределах рассматриваемого температурного перепада (до 50 °С) составят не более 0,014 кН. Фактически в рассмотренном нагружении происходит выборка предусматриваемых температурных зазоров и включение в работу распорок без создания дополнительных усилий в поясе.

The main purpose of this work is taking a number of measures to control the ageing of head packages (HP) of reactors #1, 2 of SC "Rivnenskaya NPP" allowing for current requirements made by the international and local regulatory bodies to improvement of NPP reliable and safe operation. One of the components in this research area is performance of confirmatory strength analysis of HP metal structures (MS) at exposure to external dynamic loads, which may be caused by seismic impact, considering the events of March 11, 2011 at Fukushima-1 NPP. The paper presents the results of strength analysis of MS of HP in reactors # 1, 2 of SP "Rivnenskaya NPP" at exposure to external dynamic impact in the case of design solution and in the case of additional fastening of HP MS. A practical realization of this work is development of preliminary design for additional fastening of HP MS, allowing for upgrading of both the thermomechanical equipment, and building structures.

Key words : head package, WWER-440, metal structure, strength, seismic stability

При режиме НУЭ+ПА+ПЗ максимальные напряжения составляют 106 МПа, что значительно меньше расчетного сопротивления 195 МПа. Сейсмическая прочность обеспечивается. Также следует отметить, что режим НУЭ+МРЗ при землетрясении магнитудой 7 баллов является огибающим для режима НУЭ+ПА+ПЗ.

1. У213-Р-1964. Корпус реактора. Расчет на прочность. Определение нагрузок на элементы корпуса реактора и верхнего блока от сейсмических воздействий и разрывов трубопроводов. – ОКБ «Гидропресс», 2009.
2. 191-02-ПЕ-12. Перечень исходных событий, в результате которых возникают «жесткие» условия окружения. Квалификация оборудования. Энергоблок № 1, 2. – ОП РАЭС, 2012.
3. У213-ТИ-1770. Отчет ОКБ «Гидропресс». Верхний блок. Заключение о техническом состоянии и остаточном ресурсе. Блок №1 Ровенской АЭС.
4. ДБН В.2.6-163:2010. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу. – Київ: Мінбуд України, 2010. – 209 с.
5. ПНАЭ Г-7-002–86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок – М.: Энергоатомиздат, 1989.
6. ПНАЭ Г-5-006–87. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. – М.: Энергоатомиздат, 1989.

Поступила в редакцию
06.05.2013

НОВАЯ КНИГА

Сидорец В. Н., Пентегов И. В.

Детерминированный хаос в нелинейных цепях с электрической дугой. – Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2013. – 272 с.



Монография посвящена изложению результатов исследования фундаментальных свойств электрической дуги как нелинейного элемента электрических цепей. Описаны выявленные закономерности и механизмы возникновения детерминированного хаоса в этих цепях и сценарии его развития. Особое внимание уделено оригинальным математическим методам исследования нелинейных динамических систем. Все полученные результаты проиллюстрированы.

Монография рассчитана на широкий круг специалистов в областях теоретической электротехники и нелинейных динамических систем. Она может быть полезна ученым, аспирантам и студентам.

Заказы на книгу просьба направлять в редакцию журнала
«Техническая диагностика и неразрушающий контроль»