

## Напряженное состояние узла приварки коллектора теплоносителя к корпусу парогенератора ПГВ-1000М при воздействии эксплуатационных нагрузок с учетом остаточных технологических напряжений

А. Ю. Чирков<sup>а</sup>, В. В. Харченко<sup>а</sup>, С. В. Кобельский<sup>а</sup>, В. И. Кравченко<sup>а</sup>,  
В. А. Пиминов<sup>б</sup>, М. Е. Курдин<sup>б</sup>

<sup>а</sup> Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

<sup>б</sup> ФГУП ОКБ “Гидропресс”, Подольск, Россия

*Представлены результаты расчетной оценки полей остаточных технологических напряжений при моделировании режимов термической обработки в зоне сварного шва № 111 и расчетного анализа эксплуатационных напряжений и сопротивления разрушению узла приварки коллектора к корпусу парогенератора ПГВ-1000М при моделировании эксплуатационного цикла нагружения.*

**Ключевые слова:** напряженно-деформированное состояние, остаточные напряжения, термообработка, узел приварки, парогенератор, смешанная схема метода конечных элементов.

**Введение.** При эксплуатации парогенераторов ПГВ-1000М энергоблоков АЭС с реактором ВВЭР-1000 в пределах проектного срока службы были обнаружены повреждения узлов приварки “горячего” коллектора к корпусу парогенератора (ПГ). Повреждения в виде трещин были выявлены в 2001–2002 гг. в зоне сварного шва № 111 на парогенераторах первого блока Южно-Украинской АЭС и в начале 2006 г. на четырех парогенераторах четвертого энергоблока Запорожской АЭС. Несколько раньше продольные трещины в зоне сварного шва № 111 были обнаружены на парогенераторах ПГВ-1000М российских АЭС, что послужило сигналом для ежегодного контроля этих соединений и разработки мероприятий по снижению их напряженности [1–5].

Результаты расчетной оценки напряженного состояния и сопротивления разрушению узла приварки коллектора теплоносителя к корпусу парогенератора ПГВ-1000М существенно зависят от адекватного учета полей нерелаксированных остаточных напряжений, обусловленных технологией изготовления парогенераторов на заводах-изготовителях. Полученные результаты свидетельствуют о том, что поля остаточных технологических напряжений могут оказывать заметное влияние на распределение и уровень эксплуатационных напряжений в конструкции узла приварки, а также на расчетную прогнозную оценку сопротивления металла разрушению при моделировании эксплуатационных режимов нагружения.

Отметим, что в большинстве публикаций ведущих организаций России и Украины, занимающихся проектированием и расчетным обоснованием прочности оборудования атомных станций, расчеты напряженно-деформированного состояния (НДС) узла приварки коллектора к корпусу парогенератора ПГВ-1000М представлены в линейно-упругой постановке.

Впервые в расчетной практике результаты анализа трехмерного НДС узла приварки были получены в Институте проблем прочности (далее ИПП) им. Г. С. Писаренко НАН Украины при моделировании эксплуатационных режимов нагружения с учетом истории упругопластического деформирования и дефектности металла [6]. Показано, что в условиях эксплуатации парогенератора максимальный уровень растягивающих напряжений в узле приварки превышает предел текучести металла, причем распределение напряжений вдоль окружной координаты имеет неравномерный характер.

Тем не менее кинетика формирования и перераспределения остаточных и эксплуатационных напряжений в конструкции узла приварки коллектора к корпусу парогенератора ПГВ-1000М не изучена в полной мере, что определяет актуальность исследований в этом направлении.

В настоящей работе представлены результаты расчетной оценки полей остаточных технологических напряжений при моделировании режимов термической обработки в зоне сварного шва № 111, а также упругопластического расчета эксплуатационных напряжений и сопротивления разрушению узла приварки коллектора к корпусу парогенератора ПГВ-1000М при моделировании эксплуатационного цикла нагружения.

Общая методика расчетного анализа базируется на современных положениях нелинейной механики деформируемого твердого тела, включающей определяющие уравнения теории упруговязкопластического деформирования конструкционных материалов, находящихся в неизотермических условиях, с учетом сложного нагружения в пространстве и времени.

Численный анализ кинетики НДС выполнен на основе смешанной схемы метода конечных элементов (МКЭ) и программного обеспечения, разработанных в ИПП им. Г. С. Писаренко НАН Украины [7–9].

**Конструкция узла приварки.** На рис. 1 показана схема фрагмента конструкции узла приварки горячего коллектора к патрубку ПГ. Наиболее нагруженным элементом узла приварки является утоненная часть патрубка, которая включает сварной шов № 111. Характерной особенностью конструкции является наличие так называемого кармана – кольцевого зазора между коллектором и патрубком ПГ, заполненного теплоносителем второго контура. В процессе эксплуатации ПГ утоненная часть патрубка воспринимает нагрузки, вызванные давлением в первом и втором контурах.

**Термосиловое нагружение.** Термическая обработка узла приварки коллектора к корпусу ПГ на заводах-изготовителях осуществляется в перевернутом состоянии ПГ.

При локальной термической обработке используется комбинированный способ нагрева, а именно: индукционный нагрев наружной поверхности зоны сварного шва и нагрев путем излучения внутренней поверхности зоны патрубка. На наружной поверхности зоны сварного шва используются два самостоятельно регулируемых индуктора: один – для нагрева сварного шва и зоны термического влияния сварки, другой – для нагрева имитатора корпуса, примыкающего к патрубку.

Режим термической обработки следующий: температура нагрева от 620 до 660°C; скорость нагрева 40...60 °C/ч; выдержка при максимальной температуре в течение 8 ч.

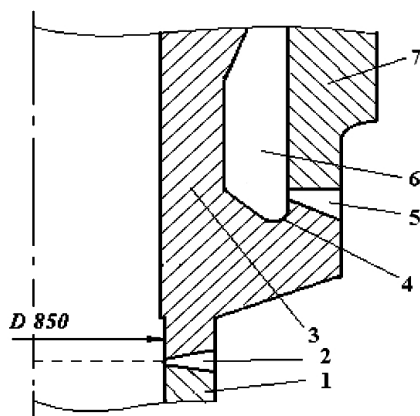


Рис. 1. Фрагмент конструкции узла приварки горячего коллектора к корпусу ПГ: 1 – главный циркуляционный трубопровод; 2 – сварной шов; 3 – коллектор; 4 – галтель; 5 – сварной шов № 111; 6 – карман; 7 – патрубок.

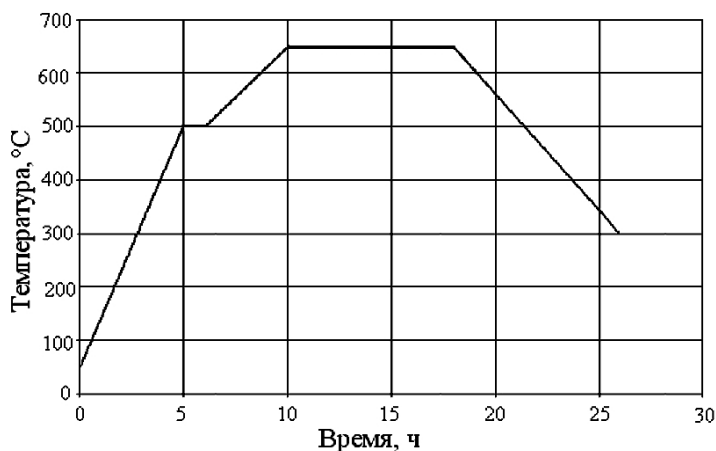


Рис. 2. Изменение температуры металла шва во времени при термообработке шва № 111.

Характер изменения температуры при проведении термической обработки сварного шва № 111 показан на рис. 2.

В процессе эксплуатации корпус ПГ находится под воздействием давления второго контура, температурных нагрузок и усилий со стороны присоединенных к патрубкам трубопроводов.

Коллекторы ПГ нагружаются давлением первого и второго контуров, температурными нагрузками, усилиями затяжек шпилек при уплотнении узла никелевыми прокладками и усилиями со стороны главного циркуляционного трубопровода.

**Основные положения методики расчета НДС.** При проведении упругопластического расчета рассматриваемый процесс термосилового нагружения разбивали на отдельные этапы по времени, продолжительность которых выбирали расчетным путем на основе результатов решения упругопластических задач для последовательно уменьшаемых интервалов изменения температурного поля и внешней нагрузки, действующих на тело.

Реализацию численного алгоритма решения краевой задачи неизотермической термопластичности осуществляли с использованием шагово-итерационной процедуры на основе смешанной схемы МКЭ [7, 9].

Решение краевых задач механики деформируемого тела с помощью смешанной схемы позволяет повысить точность получения результатов расчета как для напряжений и деформаций, так и для перемещений. Алгоритмы построения устойчивых смешанных аппроксимаций МКЭ применительно к решению двух- и трехмерных задач теории упругости и пластичности содержатся в работах [7, 10].

При расчете кинетики НДС узла приварки учитывали зависимость физико-механических свойств металла от температуры. В качестве нагрузок использовали распределение температур, остаточные напряжения и деформации в области сварного шва, давление.

**Расчетная оценка остаточных напряжений и деформаций.** Остаточные напряжения и деформации в зоне сварного шва № 111 узла приварки формируются и перераспределяются в результате технологических операций сварки и термической обработки.

Методика расчетного определения полей остаточных напряжений и деформаций включает моделирование сварного соединения и термообработку по режиму высокого отпуска.

При определении остаточных напряжений и пластических деформаций после сварки использовали расчетный алгоритм, основанный на допущении одновременного выполнения прохода по всей окружности патрубка при заполнении разделки [5, 11]. При расчетном моделировании кинетики напряжений и деформаций использовали гипотезу об осевой симметрии, позволяющую рассматривать задачу об определении полей остаточных напряжений и деформаций в осесимметричной постановке.

**Процедура фрагментации.** Для получения уточненных расчетных распределений напряжений, деформаций и перемещений проводили дополнительный упругопластический расчет в трехмерной постановке с использованием специальной процедуры фрагментации дискретной модели МКЭ узла приварки [12].

**Программные средства.** Нестационарные тепловые поля и кинетику НДС рассчитывали с помощью программного комплекса SPACE-RELAX [8], который включен в перечень расчетных кодов, разрешенных НАЭК “Энергоатом” для обоснования безопасности ядерных энергетических установок.

**Результаты расчетной оценки остаточных сварочных напряжений.** Упругопластическую задачу об остывании сварного шва решали в осесимметричной постановке с учетом зависимости физико-механических свойств металла от температуры.

Метод расчета тестировали путем моделирования полей остаточных напряжений и деформаций, обусловленных операцией нанесения наплавки на внутреннюю поверхность корпуса реактора ВВЭР-1000. Результаты расчетов полностью согласуются с данными, приведенными в нормативном документе [11].

На рис. 3 представлены расчетные данные по определению остаточных сварочных напряжений (ОСН) в области сварного шва № 111 на внутренней поверхности патрубка по высоте от дна кармана.

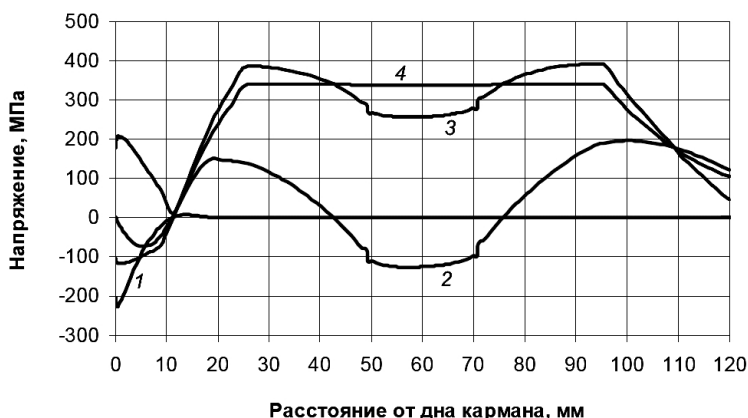


Рис. 3. Распределение ОСН на внутренней поверхности патрубка по высоте от дна кармана: 1 – радиальные  $\sigma_r$ ; 2 – осевые  $\sigma_z$ ; 3 – окружные  $\sigma_t$ ; 4 – эквивалентные  $\sigma_i$ .

**Расчетный анализ влияния параметров термообработки.** Рассматривали три варианта условий теплообмена при моделировании локальных режимов термической обработки (ТО).

ТО-1: локальный нагрев от 20 до 650°C, выдержка при температуре 650°C и охлаждение до нормальной температуры 20°C в местах установки нагревательных элементов на внешней поверхности патрубка узла приварки. На верхних и нижних горизонтальных поверхностях коллектора, а также на остальных поверхностях ПГ задавали условие конвективного теплообмена с воздухом;

ТО-2: режим нагрева и охлаждения такой же, как и для варианта ТО-1, однако в кармане патрубка на внутренней поверхности коллектора принимали условие теплоизоляции;

ТО-3: локальный нагрев от 20 до 650°C в местах установки нагревательных элементов на внешней поверхности патрубка и от 20 до 550°C на внутренней поверхности коллектора. Затем выдержка и охлаждение до нормальной температуры 20°C. Для остальных поверхностей ПГ задавали условия теплообмена, как и для варианта ТО-1.

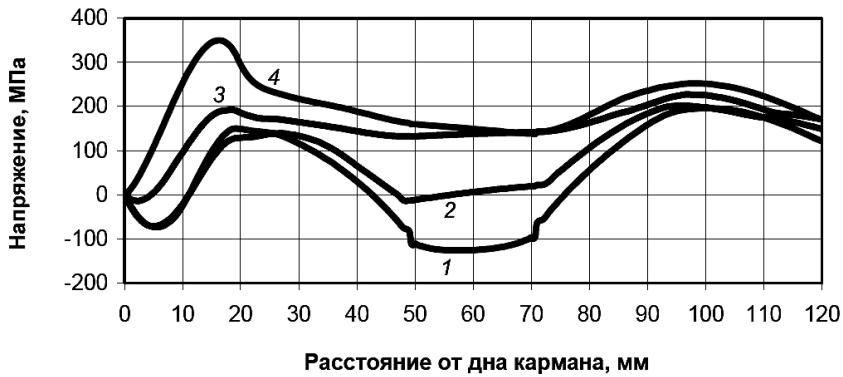
На рис. 4 представлены результаты расчетов осевых и окружных остаточных напряжений после термообработки при моделировании принятых локальных режимов ТО.

Расчетные данные свидетельствуют о следующем:

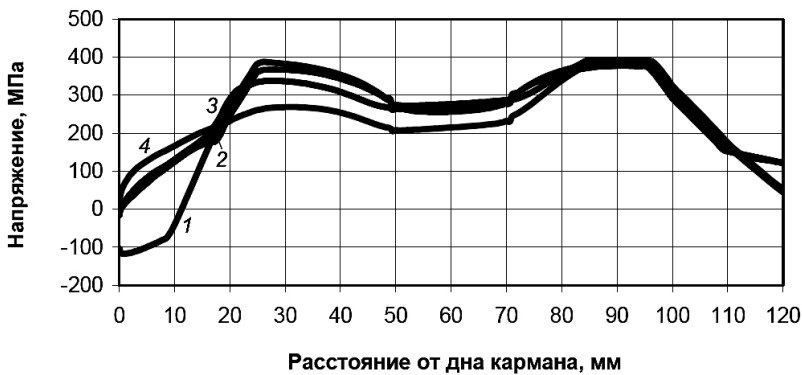
результаты определения остаточных напряжений в средней части сварного шва № 111 после термообработки по вариантам ТО-2 и ТО-3 близки между собой;

варианты ТО-1, ТО-2 и ТО-3 имеют одно характерное свойство – термообработка в соответствии с принятыми вариантами не позволяет существенно снизить уровень ОСН в области галтельного перехода и в сварном шве № 111 (рис. 4);

варианту ТО-3, при котором проводится дополнительный нагрев нижней части внутренней поверхности корпуса коллектора, соответствуют максимальные осевые напряжения в области галтельного перехода, существенно превышающие остаточные сварочные напряжения (рис. 4);



*a*



*б*

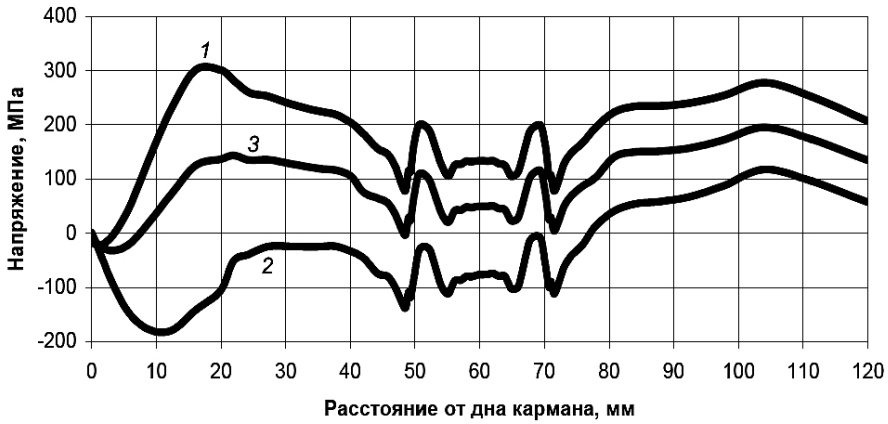
Рис. 4. Распределение осевых  $\sigma_z$  (*a*) и окружных  $\sigma_t$  (*б*) напряжений на внутренней поверхности патрубков по высоте от дна кармана: 1 – ОСН; 2 – ТО-1; 3 – ТО-2; 4 – ТО-3.

варианты ТО-2 и ТО-3 позволяют снизить максимальный уровень растягивающих напряжений после сварки только на внешней поверхности патрубка.

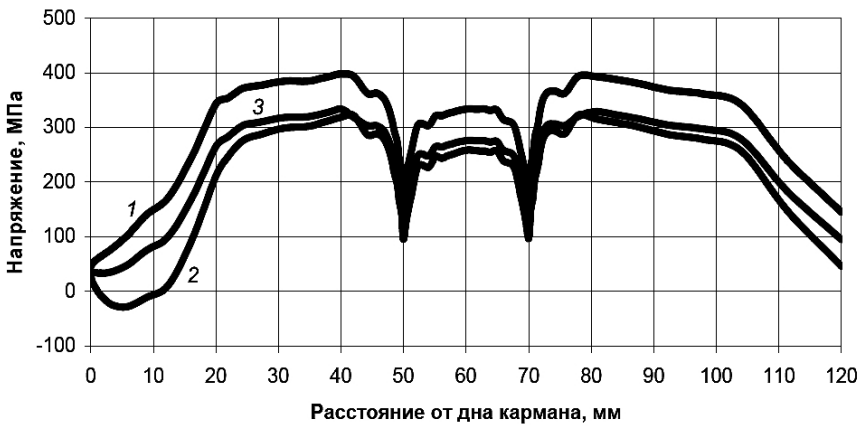
**Расчетный анализ при моделировании эксплуатационных режимов нагружения.** Расчеты выполняли в трехмерной постановке с учетом полей остаточных технологических напряжений после термообработки. Конечно-элементная трехмерная модель включала парогенератор, главный циркуляционный трубопровод и корпус реактора.

На рис. 5 приведены результаты расчетов осевых и окружных напряжений на внутренней поверхности патрубка при моделировании эксплуатационного цикла нагружения: гидравлические испытания (ГИ), разгрузка после ГИ, нормальные условия эксплуатации (НУЭ). Графики построены для окружной координаты, при которой достигаются максимальные значения осевых напряжений в области галтели узла приварки для режима ГИ. В рассматриваемом случае максимум этих напряжений имеет место при угле 4,35 рад.

Из результатов расчетов следует, что для режима ГИ на внутренней поверхности патрубка в зоне, примыкающей к сварному шву № 111, окружные напряжения растягивающие и достигают максимальной величины (398 МПа). После ГИ и последующего нагружения при НУЭ окружные напряжения



а



б

Рис. 5. Распределение осевых  $\sigma_z$  (а) и окружных  $\sigma_t$  (б) напряжений на внутренней поверхности патрубка по высоте от дна кармана: 1 – ГИ; 2 – после ГИ; 3 – НУЭ.

уменьшаются до 334 МПа. Для сварного шва № 111 значения окружных напряжений более низкие: 333 МПа при ГИ и 276 МПа при НУЭ.

Максимальные растягивающие осевые напряжения отмечаются в области галтельного перехода при ГИ и достигают 301 МПа. После ГИ и последующего нагружения при НУЭ они снижаются до 125 МПа. В сварном шве № 111 эти напряжения составляют 134 МПа при ГИ и 50 МПа при НУЭ.

**Расчетная оценка сопротивления разрушению узла приварки.** Уруго-пластический расчет на сопротивление разрушению узла приварки при моделировании эксплуатационного цикла нагружения содержится в [12]. Показано, что неучет истории нагружения и остаточной технологической напряженности после термообработки приводит к заниженным расчетным значениям коэффициентов интенсивности напряжений до 28% и, следовательно, к неконсервативной оценке сопротивления разрушению узла приварки.

**Заключение.** Получены расчетные оценки полей остаточных напряжений после сварки и термообработки узла приварки коллектора к корпусу парогенератора ПГВ-1000М.



Показано, что локальные режимы термообработки при различных вариантах учета условий теплообмена не позволяют снизить максимальный уровень ОСН в области галтельного перехода и сварном шве № 111. После термообработки на внутренней поверхности кармана в области галтельного перехода сохраняются высокие растягивающие напряжения на уровне предела текучести.

Представлены результаты расчетного анализа кинетики НДС и сопротивления разрушению узла приварки при моделировании эксплуатационного цикла нагружения с учетом полей остаточных технологических напряжений, возникающих после термообработки. Расчеты выполнены в трехмерной упругопластической постановке при моделировании последовательности нагружения: ГИ; разгрузка после ГИ; НУЭ.

## Резюме

Представлено результати розрахункової оцінки полів залишкових технологічних напружень при моделюванні режимів термічної обробки в зоні зварного шва № 111 та розрахункового аналізу експлуатаційних напружень і опору руйнуванню вузла приварки колектора до корпусу парогенератора ПГВ-1000М при моделюванні експлуатаційного циклу навантаження.

1. Трунов Н. Б., Рыжов С. Б., Давиденко С. Е. Горизонтальные парогенераторы: проблемы и перспективы // Теплоэнергетика. – 2011. – № 3. – С. 2 – 5.
2. Драгунов Ю. Г., Петрова О. Ю., Лякишев С. Л. и др. Повышение надежности эксплуатации коллекторов парогенераторов ПГВ-1000, -1000М // Атом. энергия. – 2008. – 104, № 1. – С. 9 – 13.
3. Лукасевич Б. И., Трунов Н. Б., Драгунов Ю. Г., Давиденко С. Е. Парогенераторы реакторных установок ВВЭР для атомных электростанций. – М.: ИКЦ “Академкнига”, 2004. – 391 с.
4. Лякишев С. Л., Трунов Н. Б., Харченко С. А. и др. Разработка и обоснование мероприятий по обеспечению надежной и безопасной эксплуатации сварных соединений № 111 парогенератора ПГВ-1000М // Тр. VI Международной научно-технической конференции “Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР”. – Подольск: ФГУП ОКБ “Гидропресс”, 2009.
5. Махненко В. И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций. – Киев: Наук. думка, 2006. – 620 с.
6. Степанов Г. В., Харченко В. В., Бабуцкий А. И. и др. Оценка напряженно-деформированного состояния узла сварного соединения “горячего” коллектора с патрубком парогенератора ПГВ-1000 АЭС // Пробл. прочности. – 2003. – № 5. – С. 142 – 153.
7. Чирков А. Ю. Смешанная схема метода конечных элементов для решения краевых задач теории упругости и малых упругопластических деформаций. – Киев: Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2003. – 250 с.



8. Програмне забезпечення “Тривимірне скінченноелементне моделювання теплового і термонапруженого стану елементів машинобудівних конструкцій” (SPACE) / Система сертифікації УкрСЕПРО. Сертифікат відповідності № UA1.017.0054634-04. – 2004.
9. Чирков А. Ю. Построение двухслойных схем интегрирования уравнений пластического течения в теории процессов деформирования по траекториям малой кривизны // Пробл. прочности. – 2012. – № 6. – С. 93 – 124.
10. Чирков А. Ю., Кобельский С. В., Звягинцева А. А. Построение смешанной аппроксимации МКЭ для решения пространственных задач теории упругости // Надежность и долговечность машин и сооружений. – 2008. – № 31. – С. 195 – 207.
11. РД ЭО 0606-2005. Методика расчета на сопротивление хрупкому разрушению корпусов реакторов АЭС с ВВЭР (МРКР-СХР-2004). – СПб.; М., 2004. – 65 с.
12. Харченко В. В., Пиминов В. А., Чирков А. Ю. и др. Упругопластический расчет на сопротивление разрушению элементов оборудования 1-го контура АЭС // Пробл. прочности. – 2013. – № 4. – С. 14 – 26.

Поступила 11. 06. 2013