

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 539.3

Совершенствование расчетного анализа напряженно-деформированного состояния и сопротивления разрушению узлов приварки коллекторов теплоносителя к корпусу парогенератора ПГВ-1000М АЭС

В. В. Харченко, А. Ю. Чирков, С. В. Кобельский, В. И. Кравченко

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

Сформулированы методические положения и порядок проведения уточненного расчета напряженно-деформированного состояния и сопротивления разрушению узлов приварки коллекторов теплоносителя к корпусу парогенератора ПГВ-1000М. Приведены результаты упругопластического анализа сопротивления разрушению узла приварки с поверхностными дефектами различной формы при моделировании расчетного цикла эксплуатационного нагружения и режима аварийной ситуации. Согласно полученным данным деформационная история нагружения, остаточная технологическая напряженность и учет протяженных поверхностных повреждений существенно влияют на расчетную оценку сопротивления разрушению узла приварки. Показано, что традиционный линейно-упругий расчет сопротивления разрушению узлов приварки не обладает достаточной степенью консерватизма, что приводит к завышенной оценке их прочности.

Ключевые слова: парогенератор, узел приварки, упругопластическое деформирование, история нагружения, коэффициент интенсивности напряжений, дефект, расчетная трещина, сопротивление разрушению, метод конечных элементов.

Введение. Наиболее проблемными конструктивными элементами парогенераторов ПГВ-1000М являются узлы приварки коллекторов теплоносителя к корпусу парогенератора, имеющие повреждения, которые обнаружены в пределах проектного срока эксплуатации на энергоблоках АЭС Украины и Российской Федерации. Зарождение дефектов типа трещин происходит на внутренней поверхности кармана узла приварки в области галтельного перехода и корня кольцевого сварного шва № 111, что зафиксировано при контроле состояния металла данного узла на энергоблоках АЭС с реактором ВВЭР-1000. Обусловлено это преимущественно конструктивными особенностями узла приварки, влиянием коррозионной среды и высоким уровнем растягивающих эксплуатационных напряжений.

Описание конструкции парогенератора ПГВ-1000М, технические характеристики и условия эксплуатации приведены в [1], результаты исследования прочности и применение расчетных подходов к оценке напряженного состояния и сопротивления разрушению конструкции узла приварки – в [2–19 и др].

В настоящее время одной из актуальных проблем безопасной эксплуатации парогенераторов ПГВ-1000М является потенциальная возможность зарождения и распространения трещиноподобных дефектов в зоне сварного шва № 111, что обуславливает необходимость обоснования прочности и сопротивления разрушению узлов приварки

с учетом повреждений, выявленных в процессе эксплуатации, а также возможности дальнейшей эксплуатации парогенераторов с обнаруженными дефектами несплошности металла в зоне сварного шва.

Использование действующей нормативной базы, регламентирующей расчеты на прочность оборудования энергетических установок, является недостаточным для обоснования безопасной эксплуатации парогенераторов, что приводит к необходимости выполнения дополнительного уточненного расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) и сопротивления разрушению узлов приварки для получения адекватных результатов расчетной оценки конструкционной прочности.

Основные недостатки применяемых в расчетной практике подходов и моделей к оценке НДС и сопротивления разрушению узлов приварки состоят в следующем: использование упрощенных расчетных схем без соответствующего обоснования; неучет нелинейных эффектов поведения металла и остаточной технологической напряженности; схематизация расчетных дефектов без учета поверхностных повреждений коррозионного происхождения; применение приближенных подходов к расчетной оценке коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) без соответствующего обоснования; игнорирование методических рекомендаций о включении расчетной трещины в конечноэлементную модель узла приварки; упрощенный анализ режимов аварийных ситуаций.

Следует отметить, что в ряде литературных источников [4, 7, 18 и др.] представлены результаты расчета узлов приварки, позволяющие исключить из анализа отдельные недостатки применяемых расчетных схем и моделей. Однако работы, в которых при проведении расчетов предложены подходы и модели для устранения перечисленных выше недостатков, авторам неизвестны.

Таким образом, при углубленном анализе НДС особое внимание следует уделять следующим факторам, влияющим на уровень напряжений и расчетную оценку сопротивления разрушению узлов приварки: адекватность расчетных схем и моделей; остаточная технологическая наследственность, обусловленная операциями изготовления и ремонта парогенераторов; история упругопластического деформирования; моделирование дефектов сложной формы с учетом коррозионных повреждений внутренней поверхности кармана узла приварки; условия и режимы термосилового нагружения.

Отметим, что в большинстве исследований, проводимых ведущими организациями Украины и Российской Федерации, которые занимаются проектированием и расчетным обоснованием прочности оборудования атомных станций, расчеты НДС узлов приварки представлены в линейно-упругой постановке. Первые результаты расчета НДС узла приварки с использованием трехмерных расчетных моделей получены в Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины (далее – ИПП НАН Украины) при моделировании эксплуатационных режимов нагружения [19]. Показано, что в условиях эксплуатации парогенератора характер распределения напряжений вдоль окружной координаты патрубка неравномерный, а максимальный уровень растягивающих напряжений отмечается на его внутренней поверхности в области выявленных повреждений узла приварки.

В настоящей работе представлены новые результаты расчета НДС и сопротивления разрушению узла приварки парогенератора ПГВ-1000М, полученные при совместном учете таких факторов: пространственный характер НДС; влияние элементов присоединенного оборудования реакторной установки; остаточные технологические напряжения и деформации после операций сварки и термообработки; упругопластическое деформирование металла и история нагружения; значительная протяженность выявленных повреждений; расчетная схематизация дефектов с учетом поверхностных повреждений коррозионного происхождения; современные подходы к моделированию расчетных дефектов.

Согласно полученным результатам деформационная история нагружения, остаточная технологическая напряженность и учет протяженных поверхностных повреждений существенно влияют на оценку сопротивления разрушению узла приварки. Показано, что используемый в этом случае традиционный линейно-упругий расчет не обладает достаточной степенью консерватизма, что приводит к завышенной оценке прочности конструкции узла приварки.

Авторы работы не стремились полностью охватить все вопросы, связанные с учетом и анализом всевозможных факторов, влияющих на расчет прочности и сопротивления разрушению узлов приварки парогенераторов при обосновании ресурса. Ниже представлены методические положения уточненного расчета и отдельные результаты анализа сопротивления разрушению, которым, на наш взгляд, не уделяется достаточного внимания в литературных источниках, посвященных совершенствованию методики и расчетам на прочность узлов приварки парогенераторов.

Основные положения методики уточненного расчета. Расчет НДС узлов приварки проводится в три этапа: на первом рассчитываются остаточные после-сварочные напряжения и деформации в области сварного шва № 111; на втором моделируются режимы локальной термообработки узла приварки для определения полей остаточных напряжений и деформаций после сварки и термообработки; на третьем рассчитывается кинетика НДС и сопротивление разрушению узлов приварки для режимов эксплуатационного нагружения.

Общая схема расчета НДС узлов приварки при моделировании режимов эксплуатационного нагружения также состоит из трех этапов: на первом рассчитывается глобальное НДС с использованием модели петли первого контура реакторной установки; на втором проводится уточненный расчет локального НДС узлов приварки с учетом результатов расчета глобального НДС; на третьем рассчитывается локальное НДС с прямым включением расчетного дефекта в модель фрагмента узла приварки.

Глобальное НДС рассчитывается для определения граничных условий в перемещениях, применяемых при анализе локального НДС узлов приварки. Использование расчетной модели узлов приварки с заданными граничными условиями позволяет учитывать взаимное влияние жесткости/податливости парогенератора и элементов присоединенного оборудования на определение локального НДС от воздействия температуры и давления теплоносителя.

Расчет НДС базируется на последовательном решении задачи теплопроводности и краевой задачи неизотермической термопластичности с учетом тепловой и деформационной истории нагружения. Расчет температурных полей выполняется с учетом данных о граничных условиях, полученных в результате теплогидравлического расчета.

При упругопластическом расчете процесс нагружения разбивается на отдельные расчетные этапы, которые задаются с учетом условий нагружения. Расчет кинетики НДС выполняется в квазистатической постановке методом последовательного прослеживания процесса упругопластического деформирования на исследуемых этапах нагружения путем пошагового решения краевой упругопластической задачи.

Для каждого этапа нагружения уравнения состояния материала интегрировали за этап нагружения с целью получения системы разрешающих уравнений не в приращениях, а для полных компонентов напряжений, деформаций и перемещений. Применение такого подхода к решению неизотермических упругопластических задач способствует устойчивости вычислительного процесса при численной реализации алгоритма пошагового решения эволюционной квазистатической задачи [20, 21]. Решение упругопластической задачи на каждом последующем этапе нагружения выполняется с учетом начальных напряжений и пластических деформаций, полученных в результате решения упругопластической задачи для предыдущего этапа нагружения, начиная с заданного начального состояния.

В основу конечноэлементного анализа НДС узла приварки положена смешанная схема метода конечных элементов (МКЭ), обеспечивающая непрерывную аппроксимацию как для перемещений, так и для напряжений, что позволяет определять параметры НДС и механики разрушения с высокой степенью точности [22]. Реализация численного алгоритма решения краевой задачи неизотермической термопластичности проводится с использованием шагово-итерационной процедуры на основе смешанной схемы МКЭ.

Программные средства. Расчеты НДС выполнены с использованием программного комплекса SPACE-RELAX, разработанного в ИПП НАН Украины и официально зарегистрированного в перечне расчетных кодов, разрешенных к использованию в НАЭК “Энергоатом”, для расчетного обоснования безопасности ядерных энергетических установок.

Расчетная оценка полей остаточных напряжений и деформаций. Методика расчетного определения полей остаточных напряжений и деформаций включает моделирование операций заполнения разделки сварного шва и локальной термообработки зоны патрубка по режиму высокого отпуска при изготовлении и/или ремонте парогенераторов. Основные положения расчетной методики, используемые расчетные модели и результаты расчета полей остаточных технологических напряжений в зоне сварного шва № 111 приведены ранее [11].

Постулирование расчетного дефекта. При расчете сопротивления разрушению узла приварки постулируемый дефект определяется как плоская поверхностная полуэллиптическая трещина глубиной $0,25s$, где s – диаметр патрубка с соотношением полуосей $2/3$ [23]. Местоположение трещины определяется по результатам уточненного упругопластического расчета локального НДС узла приварки. Расчетная трещина располагается на внутренней поверхности патрубка узла приварки в области галтельного перехода, где достигается высокий уровень растягивающих напряжений. При этом местоположение трещины определяется не только по высоте патрубка от дна кармана, но и относительно угловой координаты патрубка, поскольку характер распределения осевых напряжений вдоль угловой координаты неравномерный.

Схематизация выявленных дефектов. Расчет сопротивления разрушению узлов приварки с дефектами, выявленными в результате эксплуатационного контроля состояния металла, выполняется с учетом их схематизации, реальных размеров и местоположения. При этом принимается во внимание многоочаговый характер поверхностных дефектов и их значительная протяженность вдоль окружной координаты патрубка. Данное обстоятельство затрудняет практическое использование расчетной схематизации протяженных дефектов в виде полуэллиптических окружных трещин, встроенных в конечноэлементную модель узла приварки, и обуславливает применение схематизации, аппроксимирующей дефект в форме протяженной полосы с закругленными краями.

Расчетный дефект с учетом коррозионных повреждений. Согласно результатам материаловедческих исследований обнаруженные дефекты зарождаются на внутренней поверхности патрубка от каверн коррозионного происхождения, которые могут служить дополнительными концентраторами напряжений и влиять на образование и распространение трещиноподобных дефектов в процессе эксплуатации парогенератора. При проведении анализа обнаруженные многочисленные очаги коррозионных повреждений на внутренней поверхности патрубка схематизируются с помощью коррозионного канавочного дефекта. При этом расчет сопротивления разрушению узла приварки выполняется с использованием расчетного дефекта, состоящего из протяженной канавки, которая расположена на внутренней поверхности патрубка, и полуэллиптической трещины с такими же полуосями, что и постулируемая трещина. Данная модель расчетного дефекта является более адекватной схематизацией поверхностного повреждения узла приварки по сравнению с традиционным модели-

рованием дефекта в виде постулируемой полуэллиптической трещины. Вопрос о физической модели зарождения и механизме распространения коррозионного дефекта в данном случае не рассматривается, речь идет только о целесообразности использования предлагаемой расчетной схематизации поверхностного дефекта для учета коррозионных повреждений на внутренней поверхности патрубка узла приварки.

Определение коэффициентов интенсивности напряжений. Определение расчетных значений КИН с помощью приближенных аналитических формул имеет ряд существенных ограничений, связанных с условиями корректного применения положений линейно-упругой механики разрушения, а также с расположением расчетной трещины в цилиндрической части патрубка узла приварки. В то же время согласно результатам контроля повреждения, выявленные в процессе эксплуатации парогенераторов, расположены в зоне сварного шва № 111 и в галтели кармана узла приварки, где имеют место концентрация напряжений и высокий уровень пластических деформаций. Таким образом, для расчетных трещин, расположенных в указанных зонах, применение приближенных инженерных подходов к расчету сопротивления разрушению узла приварки не является достаточным, поскольку они не учитывают в полной мере сложную пространственную конфигурацию конструкции, реальное местоположение выявленных повреждений, упругопластическое поведение металла, остаточную технологическую напряженность и реальные условия нагружения.

Для адекватного учета перечисленных факторов необходимо проводить уточненные упругопластические расчеты НДС с использованием трехмерных моделей МКЭ и включением расчетного дефекта в конечноэлементную модель фрагмента узла приварки. Основные положения методики расчета параметров разрушения в дискретных моделях МКЭ базируются на применении концепции энергетического J -интеграла, для вычисления которого используется метод эквивалентного объемного интегрирования [24, 25].

Применение процедуры фрагментации. Для получения уточненных распределений напряжений, деформаций и перемещений в зоне галтельного перехода и сварного шва № 111 проводится дополнительный упругопластический расчет локального НДС узлов приварки с применением процедуры фрагментации полной модели, что позволяет использовать при уточненном расчете НДС конечноэлементные сетки с мелким разбиением расчетного фрагмента. Перемещения, полученные в результате расчета глобального НДС с помощью полной модели, задаются в качестве граничных условий на внешних поверхностях фрагмента узла приварки.

При моделировании расчетных дефектов используются дополнительные фрагменты узлов приварки, которые определяются с учетом их местоположения. Расчет проводится с включением расчетного дефекта в конечноэлементную модель фрагмента узла приварки. Применение дополнительных расчетных фрагментов узлов приварки дает возможность построить специальные конечноэлементные сетки, обеспечивающие необходимую плотность и регулярность разбиений вблизи фронта трещины. Габаритные размеры расчетного фрагмента с трещиной задаются таким образом, чтобы исключить ее влияние на НДС за пределами фрагмента.

Расчет сопротивления разрушению узлов приварки проводится по результатам упругопластического расчета НДС с использованием фрагмента узла приварки со встроеной трещиной.

Обоснование сходимости и точности результатов расчета. Для обоснования точности и приемлемости результатов расчета НДС и параметров разрушения проводятся дополнительные уточненные расчеты с применением процедуры последовательного сгущения сетки конечных элементов в области галтельного перехода, сварного шва № 111 и в окрестности фронта трещины для наиболее представительных режимов нагружения с использованием не менее трех последовательно сгущаемых сеток до достижения сходимости численных результатов. Величина шага

конечноэлементной сетки в окрестности фронта трещины выбирается из условия, согласно которому значения напряжений и параметров разрушения для двух последовательно сгущаемых сеток достаточно близки.

Расчетные режимы нагружения. Расчеты проводили для характерных режимов нагружения, включая гидравлические испытания, нормальные условия эксплуатации и аварийные ситуации. В качестве расчетного цикла эксплуатационного нагружения парогенератора принимается последовательность следующих режимов: гидротестирования на прочность по второму контуру; полная разгрузка после гидротестирования и нормальные условия эксплуатации.

Расчетные модели. При расчетах глобального НДС использовали трехмерную модель петли первого контура реакторной установки серии В-320, состоящую из следующих конструктивных элементов оборудования: корпус парогенератора; “горячий” и “холодный” коллекторы теплоносителя и узлы их приварки; горячая и холодная ветви главного циркуляционного трубопровода; главный циркуляционный насос; корпус реактора с патрубками для входа и выхода теплоносителя. Данная модель позволяет учитывать взаимовлияние жесткости парогенератора и элементов присоединенного оборудования реакторной установки на расчетное определение НДС парогенератора в целом. На рис. 1 показаны используемые для расчетов глобального и локального НДС конечноэлементные модели.

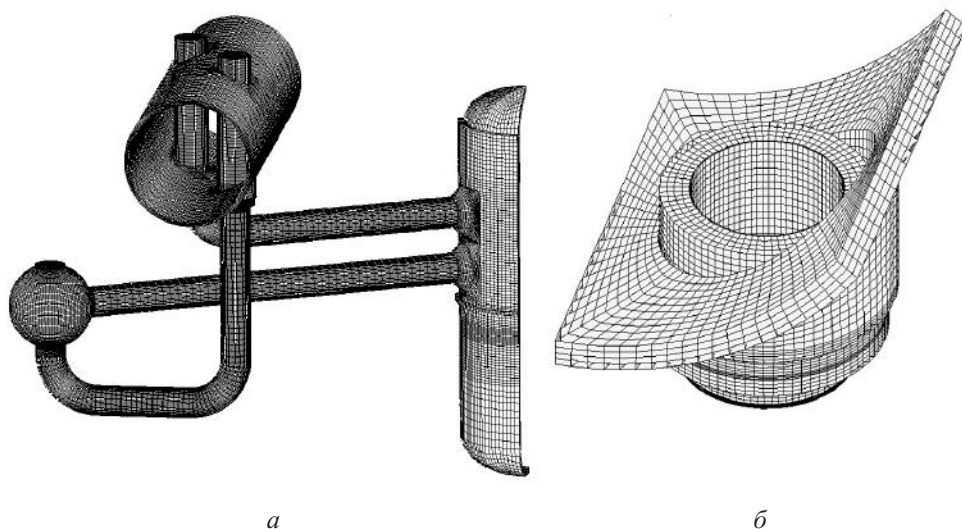


Рис. 1. Конечноэлементные модели петли первого контура реакторной установки для определения глобального НДС (а) и фрагмента узла приварки для определения локального НДС (б).

На рис. 2 представлена конечноэлементная модель фрагмента узла приварки со встроенной постулируемой трещиной в зоне галтельного перехода.

Расчет глобального НДС проводили по модели петли первого контура реакторной установки без учета расчетных дефектов в узле приварки. Уточненный упругопластический расчет локального НДС узла приварки выполняли с применением процедуры фрагментации полной модели с помощью мелкого конечноэлементного разбиения. Значения параметров разрушения определяли по результатам упругопластического расчета НДС с использованием фрагмента узла приварки с включением расчетной трещины в конечноэлементную модель фрагмента. Полученные расчетные распределения КИН соответствуют шагу сетки ~ 40 мкм в плоскости, перпендикулярной фронту трещины.

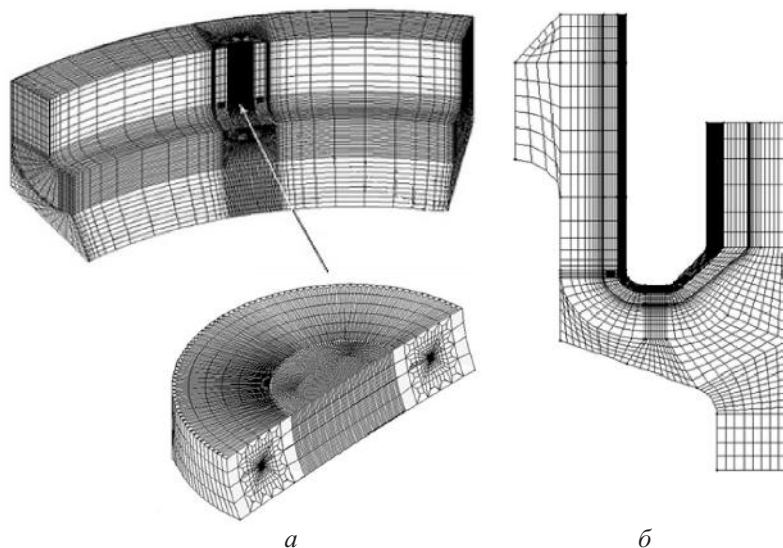


Рис. 2. Конечноэлементная модель фрагмента узла приварки со встроенной постулируемой трещиной в зоне галтели (а) и конечноэлементная сетка в продольном сечении узла приварки (б).

Обоснование расчетной модели петли первого контура реакторной установки. Для обоснования приемлемости и достаточности используемой при расчетах глобального НДС построенной конечноэлементной модели проведено сравнение расчетных перемещений реперных точек двух ниток трубопроводов реакторной установки ВВЭР-1000 одного из энергоблоков АЭС Украины в конце разогрева первого контура до рабочей температуры из состояния “холодный останов” с измеренными. Расхождение между результатами составляет не более 6–14%, что говорит о достаточно хорошем их согласовании. Кроме того, наблюдается хорошее соответствие между максимальными расчетными и измеренными поперечными перемещениями, различающимися не более чем на 14%. Это свидетельствует о корректности расчетной модели петли первого контура реакторной установки и приемлемости расчетных данных, полученных с использованием разработанной конечноэлементной модели.

Результаты расчета с постулируемой трещиной. Постулируемая трещина располагается в поперечном сечении патрубка узла приварки на внутренней поверхности в области галтельного перехода, где достигается максимальный уровень осевых растягивающих напряжений с учетом неравномерного характера их распределения относительно угловой координаты патрубка. В соответствии с рекомендациями Норм прочности ПНАЭ Г-7-002-86 постулируется поверхностная полуэллиптическая плоская окружная трещина глубиной 18 мм и соотношением полуосей 2/3.

На рис. 3 приведены результаты определения расчетных значений КИН вдоль фронта постулируемой трещины при гидравлических испытаниях на прочность по второму контуру, на рис. 4 – для режима нормальных условий эксплуатации при моделировании расчетного цикла эксплуатационного нагружения.

Анализ полученных данных показывает, что неучет деформационной истории нагружения и полей остаточных технологических напряжений и деформаций обуславливает существенное снижение значений КИН вдоль всего фронта постулируемой трещины. При гидравлических испытаниях на прочность по второму контуру максимальное значение КИН уменьшается на 22,6%, при нормальных условиях эксплуатации – на 47,2%. Таким образом, традиционный расчет в линейно-упругой постановке приводит к неконсервативной оценке сопротивления разрушению узла приварки.

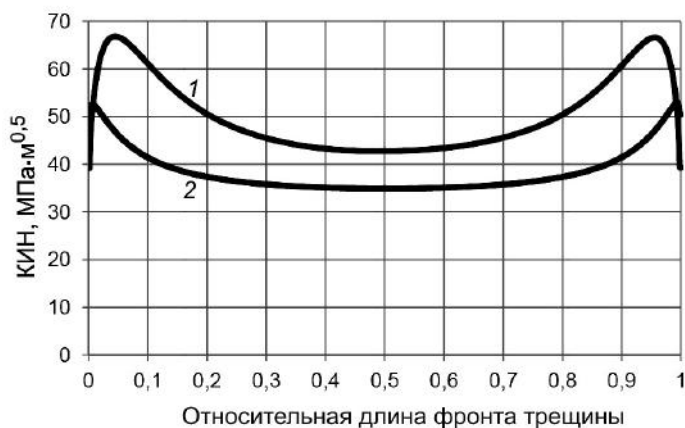


Рис. 3. Распределение КИИ вдоль фронта постулируемой трещины при гидравлических испытаниях на прочность по второму контуру. (Здесь и на рис. 4, 7, 8, 13, 14: 1 – упруго-пластический расчет; 2 – линейно-упругий расчет.)



Рис. 4. Распределение КИИ вдоль фронта постулируемой трещины при нормальных условиях эксплуатации.

Результаты расчета с протяженной схематизированной трещиной. Местоположение и глубину схематизированной расчетной трещины задавали консервативно на основе анализа данных контроля несплошностей металла узлов приварки коллекторов к корпусу парогенераторов. Расчет проводили для схематизированных окружных трещин, расположенных в металле по оси сварного шва № 111. Протяженность трещин вдоль окружной координаты патрубка рассматривали как варьируемый расчетный параметр, который определяли по отношению глубины к длине расчетной трещины. Расчеты проводили для трещин глубиной 25 мм и отношением глубины a к длине трещины l , равным 1:10, 1:20 и 1:30. Соответствующие значения центральных углов в поперечном кольцевом сечении патрубка для рассматриваемых трещин составляют приблизительно 25, 50 и 70°, т.е. длина трещин вдоль окружной координаты патрубка для этих углов приблизительно равна 250, 500 и 750 мм соответственно.

На рис. 5 приведены результаты определения значений КИИ в зависимости от протяженности схематизированных трещин, полученных при гидравлических испытаниях на прочность по второму контуру, на рис. 6 – при нормальных условиях эксплуатации при моделировании расчетного цикла эксплуатационного нагружения.

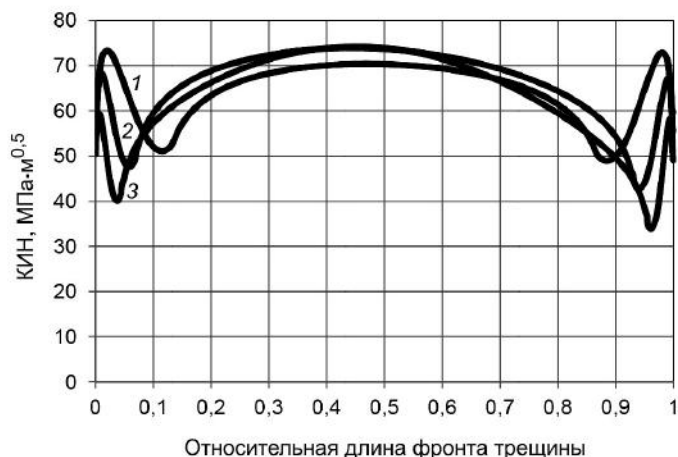


Рис. 5. Распределение КИН вдоль фронта схематизированных трещин при различном отношении глубины к длине трещины при гидравлических испытаниях на прочность по второму контуру. (Здесь и на рис. 6: 1 – $a/l = 1:10$; 2 – $a/l = 1:20$; 3 – $a/l = 1:30$.)

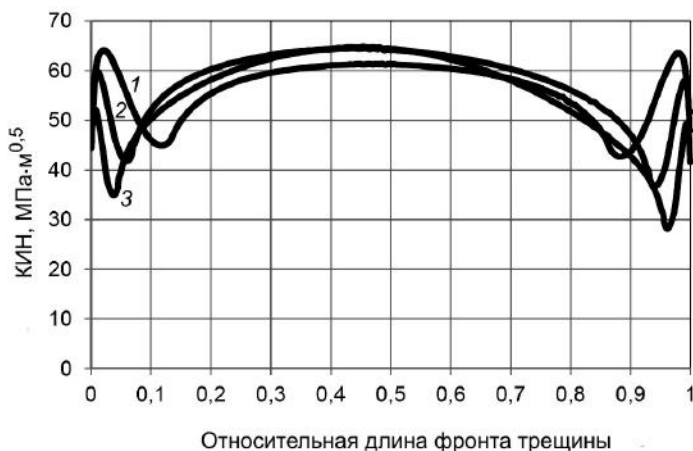


Рис. 6. Распределение КИН вдоль фронта схематизированных трещин при различном отношении глубины к длине трещины для режима нормальных условий эксплуатации.

Как видно, для менее протяженных (коротких) трещин значения КИН в точках фронта, расположенных вблизи внутренней поверхности патрубка, больше таковых для более протяженных (длинных) трещин. При этом для наиболее глубоких точек фронта трещин значения КИН увеличиваются с ростом их протяженности вдоль окружной координаты патрубка.

Отметим, что для коротких трещин максимальные значения КИН отмечаются в точках, расположенных вблизи внутренней поверхности патрубка, тогда как для длинных трещин – в наиболее глубоких точках фронта. Это свидетельствует о потенциально возможном распространении первоначально коротких трещин вдоль окружной координаты патрубка с последующим их ростом в глубь металла сварного шва.

На рис. 7, 8 приведены данные сравнения значений КИН, определенных путем упругопластического и линейно-упругого расчетов, для наиболее протяженной схематизированной трещины с отношением глубины к длине 1:30. Согласно полученным

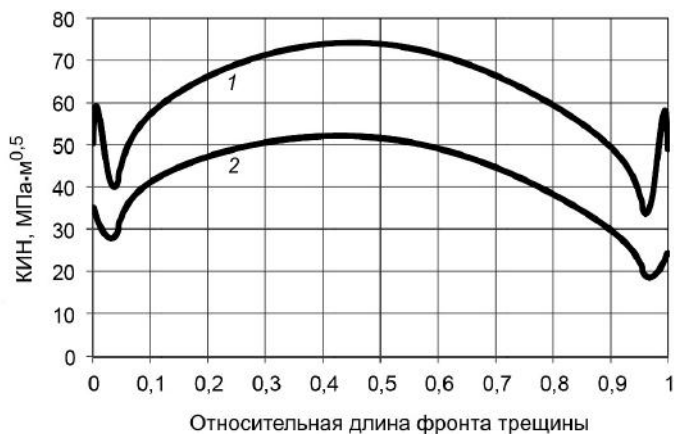


Рис. 7. Распределение КИН вдоль фронта протяженной схематизированной трещины при гидравлических испытаниях на прочность по второму контуру.

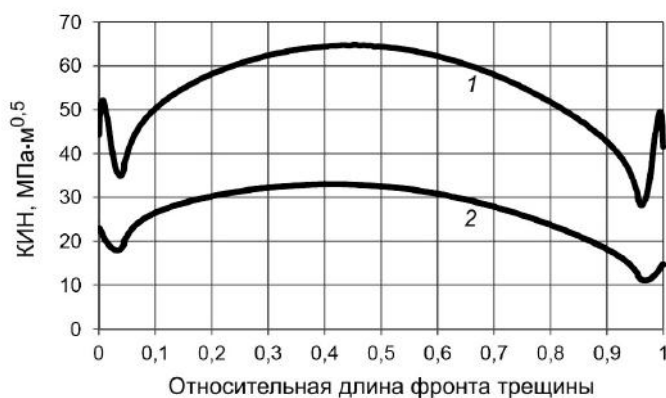


Рис. 8. Распределение КИН вдоль фронта протяженной схематизированной трещины при нормальных условиях эксплуатации.

результатами история нагружения и остаточная технологическая напряженность существенно влияют на значения КИН вдоль всего фронта схематизированной трещины. Установлено, что их неучет при гидравлических испытаниях на прочность по второму контуру уменьшает значения КИН приблизительно на 30%, при нормальных условиях эксплуатации – на 50%.

Таким образом, линейно-упругий расчет с использованием схематизированной расчетной трещины приводит, как и для постулируемой трещины, к неконсервативной оценке сопротивления разрушению узла приварки коллектора к корпусу парогенератора.

Результаты расчета для дефекта канавочного типа с трещиной. Расчеты проводили для поверхностного дефекта в виде протяженной канавки различной глубины в сочетании с полуэллиптической трещиной, имеющей такие же полуоси, что и постулируемая трещина. При расчетах длину канавки вдоль окружной координаты патрубка полагали равной 500 мм, высоту канавки (расстояние между ее берегами) – 1,25; 2,5; 5 мм, суммарную глубину канавки и трещины задавали 18 мм, что соответствует четверти толщины патрубка. Ниже представлены значения КИН для дефекта с наименьшей высотой канавки, которые больше, чем для других размеров высоты канавки.

На рис. 9, 10 приведены результаты распределения КИН вдоль фронта постулируемой трещины в зависимости от глубины канавки, полученные при моделировании расчетного цикла эксплуатационного нагружения.

Согласно данным расчетов наибольшие значения КИН соответствуют точкам фронта трещины, расположенным в локальной области вблизи поверхности канавки, что свидетельствует о потенциально возможном распространении трещины вдоль окружной координаты патрубка. При этом максимальные значения КИН получены для поверхностного дефекта с глубиной канавки 5 мм, что согласуется с имеющимися данными измерений выявленных повреждений узлов приварки.

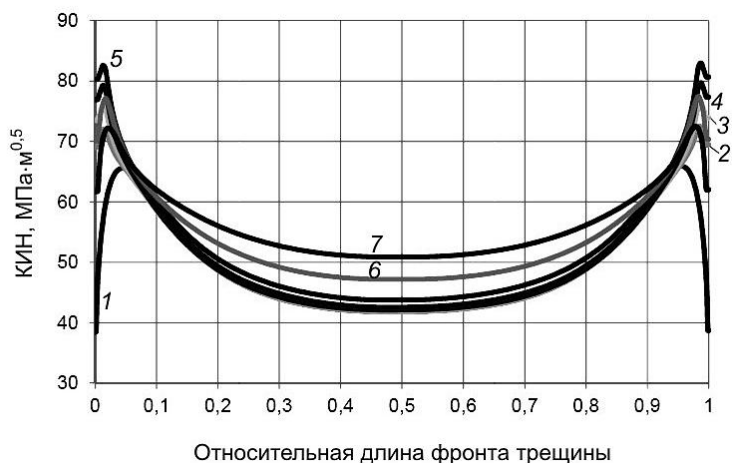


Рис. 9. Распределение КИН вдоль фронта постулируемой трещины в зависимости от глубины δ протяженной канавки при гидравлических испытаниях на прочность по второму контуру: (Здесь и на рис. 10: 1 – $\delta = 0$; 2 – $\delta = 1,5$ мм; 3 – $\delta = 2$ мм; 4 – $\delta = 3$ мм; 5 – $\delta = 5$ мм; 6 – $\delta = 8$ мм; 7 – $\delta = 11$ мм.)

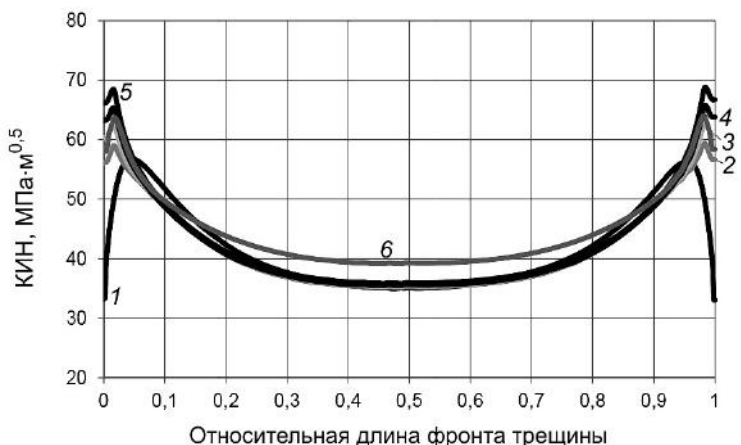


Рис. 10. Распределение КИН вдоль фронта постулируемой трещины в зависимости от глубины δ протяженной канавки при нормальных условиях эксплуатации.

Полученные распределения КИН в виде протяженной канавки с полуэллиптической трещиной свидетельствуют о том, что учет канавки приводит к более консервативным результатам по сравнению с обычным моделированием поверхностного дефекта в виде полуэллиптической трещины. При гидравлических испытаниях на

прочность по второму контуру максимальные значения КИН увеличиваются на 24%, при нормальных условиях эксплуатации – на 21%.

На рис. 11, 12 приведены результаты распределения КИН вдоль фронта постулируемой трещины с учетом и без учета протяженной канавки, полученные на основе упругопластического и линейно-упругого расчетов при моделировании расчетного цикла эксплуатационного нагружения.

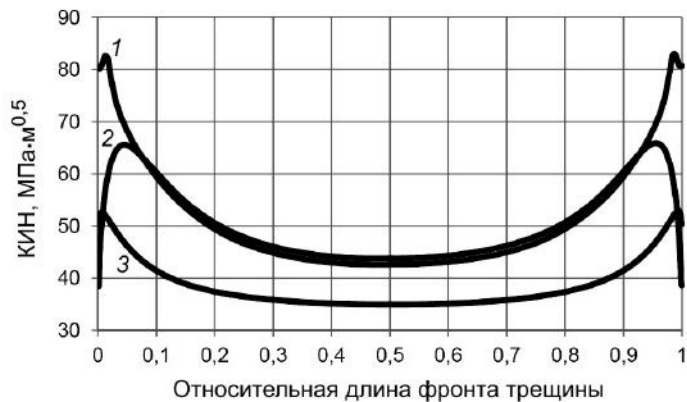


Рис. 11. Распределение КИН вдоль фронта постулируемой трещины при гидравлических испытаниях на прочность по второму контуру. (Здесь и на рис. 12: 1 – упругопластический расчет постулируемой трещины с учетом канавки; 2 – упругопластический расчет постулируемой трещины без учета канавки; 3 – линейно-упругий расчет постулируемой трещины без учета канавки.)

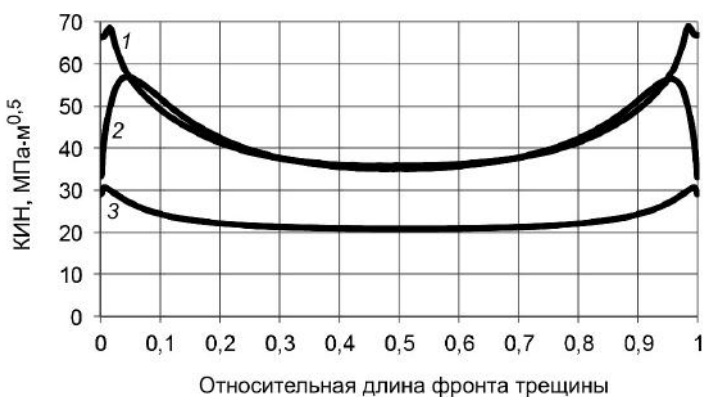


Рис. 12. Распределение КИН вдоль фронта расчетной трещины при нормальных условиях эксплуатации.

Таким образом, при упругопластическом расчете НДС узла приварки с учетом поверхностного дефекта в виде протяженной канавки с полуэллиптической трещиной получены значения КИН, которые больше, чем при линейно-упругом расчете. При гидравлических испытаниях на прочность максимальное значение КИН повышается на 60%, при нормальных условиях эксплуатации – более чем в два раза.

Результаты анализа режимов аварийных ситуаций. Расчет выполняли с использованием разработанной методики, согласно которой влияние локальных зон пластических деформаций на определение глобального НДС учитывается с помощью процедуры фрагментации полной модели. Суть методики заключается в том, что для текущего этапа нагружения глобальное НДС рассчитывается в линейно-упругой

постановке с учетом начальных пластических деформаций, полученных при упруго-пластическом расчете локального НДС узла приварки для предыдущего этапа нагружения. При такой методике расчеты глобального и локального НДС взаимосвязаны между собой, тогда как при обычной процедуре фрагментации расчет глобального НДС проводится независимо от результатов расчета локального НДС узла приварки. Данная методика позволяет существенно сократить вычислительные затраты при анализе режимов аварийных ситуаций по сравнению с обычным упругопластическим расчетом.

При анализе сопротивления разрушению узлов приварки расчеты проводили для режимов аварийных ситуаций, характеризующихся максимальным охлаждением внутренней поверхности патрубка в области галтельного перехода и зоны сварного шва № 111, а также высоким уровнем давления внутри кармана в конце режима охлаждения.

Постулируемая полуэллиптическая трещина располагается в зоне галтельного перехода на расстоянии 20 мм от дна кармана, протяженная схематизированная трещина глубиной 25 мм задается в металле по оси сварного шва № 111. При упругопластическом анализе трещину включали в конечноэлементную модель узла приварки на этапе моделирования расчетного цикла эксплуатационного нагружения, т.е. после моделирования термообработки. Такой подход приводит к более консервативной оценке сопротивления разрушению узла приварки по сравнению с традиционным расчетом, в котором трещина учитывается только при моделировании аварийной ситуации.

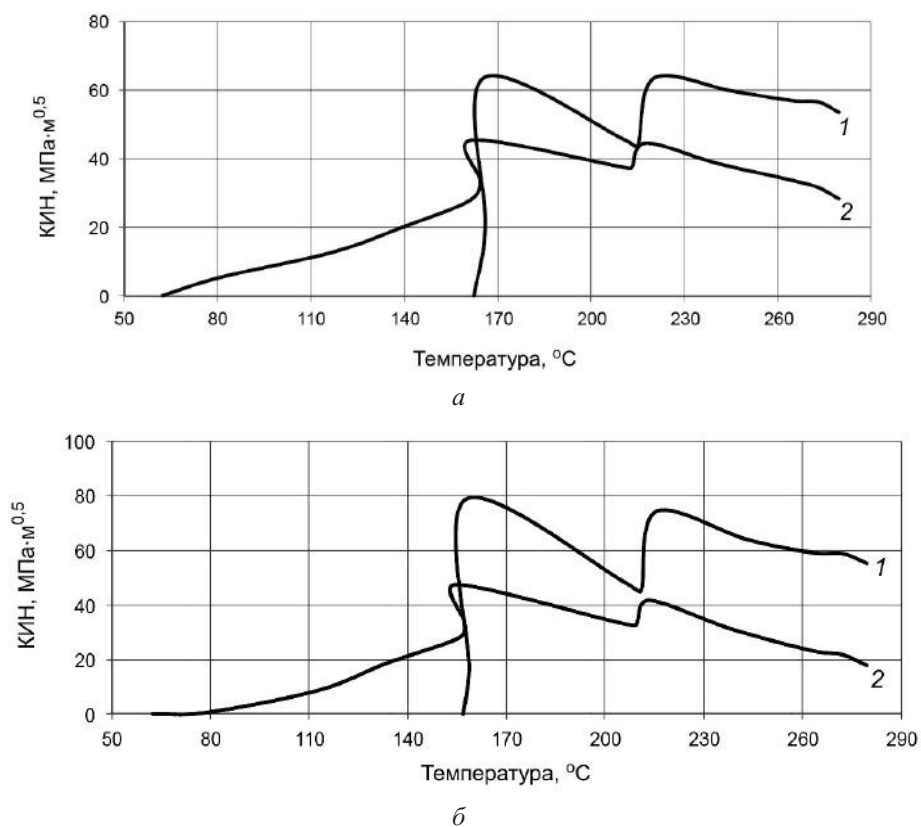


Рис. 13. Зависимость КИН от температуры для наиболее опасной точки фронта постулируемой (а) и схематизированной (б) трещины при аварийной ситуации.

На рис. 13 приведены зависимости КИН от температуры для наиболее опасной точки фронта постулируемой и схематизированной трещин, полученные при упруго-пластическом и линейно-упругом расчетах.

Анализ аварийной ситуации показывает, что упругопластическое деформирование и остаточная технологическая напряженность существенно влияют на определение температурной зависимости КИН для постулируемой и схематизированной трещин. При аварийной ситуации, как и для ранее рассмотренных режимов нагружения, линейно-упругий расчет по сравнению с упругопластическим приводит к неконсервативной оценке сопротивления разрушению узла приварки коллектора к корпусу парогенератора.

Выводы

1. Сформулированы методические положения и порядок проведения уточненного расчета НДС и сопротивления разрушению узлов приварки коллекторов теплоносителя к корпусу парогенератора ПГВ-1000М при совместном учете следующих факторов: пространственный характер НДС; влияние элементов присоединенного оборудования реакторной установки; остаточные технологические напряжения и деформации после операций сварки и термообработки; упругопластическое деформирование металла и история нагружения; значительная протяженность выявленных дефектов; схематизация дефектов с учетом поверхностных повреждений коррозионного происхождения; современные подходы к моделированию дефектов.

2. С использованием разработанной методики получены новые результаты расчета сопротивления разрушению узла приварки с поверхностными дефектами различной формы при моделировании цикла эксплуатационного нагружения и режима аварийной ситуации. Деформационная история нагружения, остаточная технологическая напряженность и учет протяженных поверхностных повреждений существенно влияют на сопротивление разрушению узла приварки. Показано, что традиционный линейно-упругий расчет сопротивления разрушению узла приварки не обладает достаточной степенью консерватизма, что приводит к завышенной оценке его прочности.

3. Разработанная методика уточненного расчета НДС и сопротивления разрушению узла приварки может использоваться при обосновании продления ресурса парогенераторов ПГВ-1000М энергоблоков АЭС с ВВЭР.

Резюме

Сформульовано методичні положення і порядок проведення уточненого розрахунку напружено-деформованого стану та опору руйнуванню вузлів приварки колекторів теплоносія до корпусу парогенератора ПГВ-1000М. Наведено результати пружно-пластичного аналізу опору руйнуванню вузла приварки з поверхневими дефектами різної форми при моделюванні розрахункового циклу експлуатаційного навантаження та режиму аварійної ситуації. Згідно з отриманими даними деформаційна історія навантаження, залишкова технологічна напруженість і облік протяжних поверхневих пошкоджень суттєво впливають на розрахункову оцінку опору руйнуванню вузла приварки. Показано, що традиційний лінійно-пружний розрахунок опору руйнуванню вузлів приварки є недостатньо консервативним, що призводить до завищеної оцінки їх міцності.

1. Лукасевич Б. И., Трунов Н. Б., Драгунов Ю. Г. и др. Парогенераторы реакторных установок ВВЭР для атомных электростанций. – М.: Изд. ОКБ “Гидропресс”, 2004. – 394 с.

2. Бакиров М. Б., Левчук В. И., Поваров В. П. и др. Анализ причин появления непроектных термосиловых воздействий в зоне сварного соединения № 111-1 ПГВ-1000М и рекомендации по их исключению // Теплоэнергетика. – 2014. – № 8. – С. 3–13.
3. Трунов Н. Б., Рыжов С. Б., Давиденко С. Е. Горизонтальные парогенераторы: проблемы и перспективы // Там же. – 2011. – № 3. – С. 2–5.
4. Харченко С. А., Трунов Н. Б., Коротаев Н. Ф. и др. Меры по обеспечению сварного соединения коллектора 1 контура с корпусом парогенератора АЭС с ВВЭР-1000 // Там же. – С. 27–32.
5. Драгунов Ю. Г., Петрова О. Ю., Лякишев С. Л. и др. Повышение надежности эксплуатации коллекторов парогенераторов ПГВ-1000, -1000М // Атом. энергия. – 2008. – № 1. – С. 9–13.
6. Драгунов Ю. Г., Зубченко А. С., Петрова О. Ю. и др. Влияние воды высоких параметров на склонность стали 10ГН2МФА к замедленному деформационному коррозионному растрескиванию // Машиностроение и инж. образование. – 2007. – № 4. – С. 35–41.
7. Лякишев С. Л., Коротаев Н. Ф., Денисов В. В. и др. Пути предотвращения повреждений коллекторов парогенератора ПГВ-1000М в зоне сварного соединения № 111 // Сб. ВАНТ. Сер. Обеспечение безопасности АЭС. – 2008. – 21. – С. 69–74.
8. Неклюдов И. М., Ажасжа В. М., Ожигов Л. С., Митрофанов А. С. Эксплуатационные повреждения теплообменных трубок и сварных соединений в парогенераторах энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 // Пробл. прочности. – 2008. – № 2. – С. 105–111.
9. Харченко В. В., Пиминов В. А., Чирков А. Ю. и др. Упругопластический расчет на сопротивление разрушению элементов оборудования 1-го контура АЭС // Там же. – 2013. – № 4. – С. 14–26.
10. Харченко В. В., Чирков А. Ю. Современные подходы к оценке сопротивления разрушению элементов ответственного оборудования АЭС с ВВЭР // Физико-технические проблемы современного материаловедения. – В 2 т. – Киев: Академперіодика. – 2013. – Т. 1. – С. 425–429.
11. Харченко В. В., Чирков О. Ю., Кобельский С. В. та ін. Розвиток методології розрахунку на опір руйнуванню елементів обладнання АЕС // Опір матеріалів і теорія споруд: Наук.-техн. зб. – 2015. – Вип. 94. – С. 59–74.
12. Чирков А. Ю., Харченко В. В., Кобельский С. В. и др. Напряженное состояние узла приварки коллектора теплоносителя к корпусу парогенератора ПГВ-1000М при воздействии эксплуатационных нагрузок с учетом остаточных технологических напряжений // Пробл. прочности. – 2013. – № 4. – С. 98–106.
13. Кобельський С. В., Банько С. М., Харченко В. В. Визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень вузла з'єднання колектора з корпусом парогенератора ПГВ-1000М із дефектом у вигляді каверни з тріщиною // Там же. – 2015. – № 2. – С. 95–100.
14. Харченко В. В., Степанов Г. В., Кравченко В. И. и др. Перераспределение напряжений в узле соединения коллектора с патрубком парогенератора ПГВ-1000 при его нагружении после термообработки // Там же. – 2009. – № 3. – С. 25–31.
15. Харченко В. В., Степанов Г. В., Чирков А. Ю. и др. Исследование напряженности корпусов реакторов и парогенераторов АЭС с учетом дефектности и истории термомеханического нагружения // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. – Київ: Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, 2009. – С. 177–180.

16. Красовский А. Я., Орыняк И. В., Гопкало Е. Е. и др. Фрактография эксплуатационного разрушения металла в зоне сварного соединения № 111 парогенератора энергоблока ВВЭР-1000 // Пробл. прочности. – 2015. – № 5. – С. 24–33.
17. Махненко В. И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций. – Киев: Наук. думка, 2006. – 619 с.
18. Махненко В. И., Великоиваненко Е. А. Трещины стресс-коррозии сварного соединения № 111 парогенераторов ПГВ-1000М энергоблоков ВВЭР-1000 // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. – Київ: Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, 2006. – С. 2–10.
19. 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.
20. Чирков А. Ю. Анализ краевых задач, описывающих неізотермические процессы упругопластического деформирования с учетом истории нагружения // Там же. – 2006. – № 1. – С. 69–99.
21. Чирков А. Ю. Построение двухслойных схем интегрирования уравнений пластического течения в теории процессов деформирования по траектории малой кривизны // Там же. – 2012. – № 6. – С. 93–124.
22. Чирков А. Ю. Некоторые приложения смешанного метода конечных элементов к решению задач механики деформируемого тела // Кибернетика и системный анализ. – 2012. – № 5. – С. 126 – 141.
23. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86). – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.
24. deLorenzi H. G. On the energy release rate and the J-integral for 3-D crack configurations // Int. J. Fracture. – 1982. – 19. – P. 183–193.
25. Никишков Г. П. Расчет энергетического интеграла методом эквивалентного объемного интегрирования. Вычислительные методы в механике разрушения / Под ред. С. Атлури. – М.: Мир, 1990. – 392 с.

Поступила 13. 03. 2017