

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТРАТИФИКАЦИИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННУЮ НАГРУЖЕННОСТЬ ДЫХАТЕЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА ЭНЕРГОБЛОКА №5 НОВОВОРОНЕЖСКОЙ АЭС

**В.П. Поваров\*, О.В. Уразов\*, М.Б. Бакиров\*\*, В.И. Левчук\*\***

\* Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция»  
396071, Россия, Воронежская обл., г. Нововоронеж, промышленная зона Южная, 1

\*\* ООО «Научно-сертификационный учебный центр материаловедения и ресурса компонентов ядерной техники «Центр материаловедения и ресурса»  
140002, Московская обл., г. Люберцы, ул. Кирова, д.7, офис 5



При выполнении работ по обоснованию продления срока эксплуатации энергоблоков АЭС одной из ключевых задач является учет всех нагружающих факторов, оказывающих влияние на остаточный ресурс ответственных элементов АЭС. Особого внимания заслуживает вопрос изучения явления термической стратификации (ТС), представляющего собой эффект расслоения теплоносителя на «холодный» и «горячий» слои в горизонтальных участках трубопровода при медленном течении потоков с разными температурами. Циклические нагрузки, вызванные ТС, способствуют накоплению термоусталостных повреждений металла и могут провоцировать образование и ускоренное развитие дефектов.

Представлен комплексный анализ влияния ТС теплоносителя в горизонтальных участках дыхательного трубопровода (ДТ) ВВЭР-1000 с точки зрения оценки эффектов ТС на напряженно-деформированное состояние металла и накопление циклической повреждаемости. Экспериментальные данные о распределении температурных полей на горизонтальных участках ДТ и истории циклического нагружения в течение нескольких топливных кампаний получены при помощи диагностической системы мониторинга ТС ДТ, введенной в эксплуатацию на энергоблоке №5 Нововоронежской АЭС. По результатам анализа данных мониторинга установлены характерные особенности протекания ТС в ДТ энергоблока №5 в зависимости от эксплуатационных режимов. Наиболее существенные эффекты ТС наблюдались в контрольном сечении, расположенном на первом горизонтальном участке от компенсатора давления.

Расчетно-экспериментальная оценка влияния температурных нагружающих факторов на напряженно-деформированное состояние ДТ показала, что эффекты ТС и термической усталости существенно влияют на эксплуатационную нагруженность трубопровода. Зоны с максимальной накопленной повреждаемостью, определенные по результатам расчета, совпадают с местами обнаружения фактических эксплуатационных дефектов. В качестве компенсирующего мероприятия, направленного на повышение остаточного ресурса ДТ, предложена процедура обработки сварных соединений ДТ методом поверхностного пластического деформирования.

**Ключевые слова:** термическая стратификация, дыхательный трубопровод, термосиловая нагрузка, непрерывный мониторинг, напряженно-деформированное состояние.

Эксплуатация энергоблоков атомных электростанций (АЭС) нередко сопровождается обнаружением непредвиденных в проекте явлений и процессов, вносящих значимый вклад в эксплуатационную повреждаемость металла трубопроводов реакторной установки (РУ) [1, 2]. Одно из подобных явлений – термическая стратификация (ТС) теплоносителя, представляющая собой эффект расслоения потока воды по высоте на «холодный» нижний слой и «горячий» верхний слой в горизонтальных участках трубопровода. Как правило, ТС происходит на горизонтальных участках трубопроводов в тех случаях, когда течение двух разных слоев одного и того же потока происходит раздельно, т.е. есть без значимого перемешивания слоев жидкости из-за разности температур и, как следствие, плотностей верхнего и нижнего слоев. Развитие и стабильность расслоенного потока зависят от разности температур и относительной скорости между жидкостями. ТС приводит к появлению в трубопроводах дополнительных циклических нагрузок, способствующих интенсивному накоплению усталостного повреждения металла.

Особая важность изучения явления ТС заключается в том, что дополнительные термосиловые нагрузки, возникающие вследствие ТС, не были учтены в проектных расчетах на прочность трубопроводов энергоблоков, спроектированных и введенных в эксплуатацию в семидесятых-восьмидесятых годах. Это снижает уровень безопасности эксплуатации АЭС первого поколения вследствие недостаточного обоснования циклической прочности некоторых ответственных трубопроводов. На АЭС с водо-водяными энергетическими реакторами (ВВЭР) термической стратификации, как правило, подвержены трубопроводы системы компенсации давления, системы аварийного охлаждения активной зоны, отдельные участки трубопроводов «горячей» и «холодной» ниток главного циркуляционного трубопровода, трубопроводы питательной воды парогенератора [3 – 5]. Ускоренное развитие эксплуатационных дефектов вследствие ТС потенциально может приводить к отказам в работе технологических систем РУ, что подтверждается опытом длительной эксплуатации АЭС [6, 7]. Например, на АЭС США было обнаружено более десяти сквозных трещин в трубопроводах, причиной образования которых признано влияние ТС. Аналогичные случаи повреждений трубопроводов вследствие ТС также зафиксированы на АЭС Германии, Бельгии, Франции, Финляндии, Японии. До настоящего времени на АЭС России подобных случаев зафиксировано не было, однако влияние ТС как одного из весомых факторов непроектного нагружения трубопроводов РУ должно быть всесторонне изучено и учтено в рамках мероприятий по обоснованию продления срока эксплуатации энергоблоков АЭС [8].

В 2013 – 2015 гг. на энергоблоке № 5 Нововоронежской АЭС были выполнены работы по расчетно-экспериментальной оценке влияния ТС на эксплуатационную нагруженность дыхательного трубопровода, работающего в составе системы компенсации давления РУ ВВЭР-1000 [9, 10]. Система компенсации давления (СКД) предназначена для создания и поддержания давления в первом контуре в стационарных режимах, ограничения отклонений давления в переходных и аварийных режимах [11]. Основными элементами СКД являются компенсатор давления (КД), предназначенный для поддержания давления и компенсации объема в первом контуре, и дыхательный трубопровод (ДТ), соединяющий водяной объем КД с теплоносителем «горячей» нитки петли главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ).

При изменении средней температуры теплоносителя первого контура в переходных режимах работы РУ (разогрев, расхолаживание, изменение мощности) часть теплоносителя перетекает из КД в ГЦТ или из ГЦТ в КД по дыхательному (соединительному) трубопроводу  $\varnothing 426 \times 40$  мм. Вследствие разности температур теплоносителя в КД и в

ГЦТ при течении теплоносителя с малым расходом в ДТ происходит стратификация (разделение) потока теплоносителя по сечению трубопровода на «горячий» и «холодный» слои. Эффект ТС является причиной возникновения переменных температурных полей по толщине стенки трубопровода и, как следствие, дополнительных термосиловых нагрузок, которые могут явиться причиной образования и развития эксплуатационных дефектов.

Для оценки потенциального вклада ТС в повреждаемость металла ДТ необходимо иметь достоверные экспериментальные данные о распределении температурных полей на горизонтальных участках трубопровода в различных эксплуатационных режимах. Для этой цели на энергоблоке № 5 Нововоронежской АЭС была внедрена система непрерывного мониторинга термической стратификации (СНМТС), предназначенная для выполнения следующих основных функций:

- мониторинг поля температур в контрольных сечениях ДТ в течение всей топливной кампании РУ;
- расчетно-экспериментальный анализ напряженно-деформированного состояния ДТ в различных режимах эксплуатации РУ с использованием данных мониторинга ТС;
- установление перечня технологических операций и эксплуатационных режимов, приводящих к максимальным градиентам температур в ДТ и дополнительным эксплуатационным нагрузкам, не учтенным в проекте.

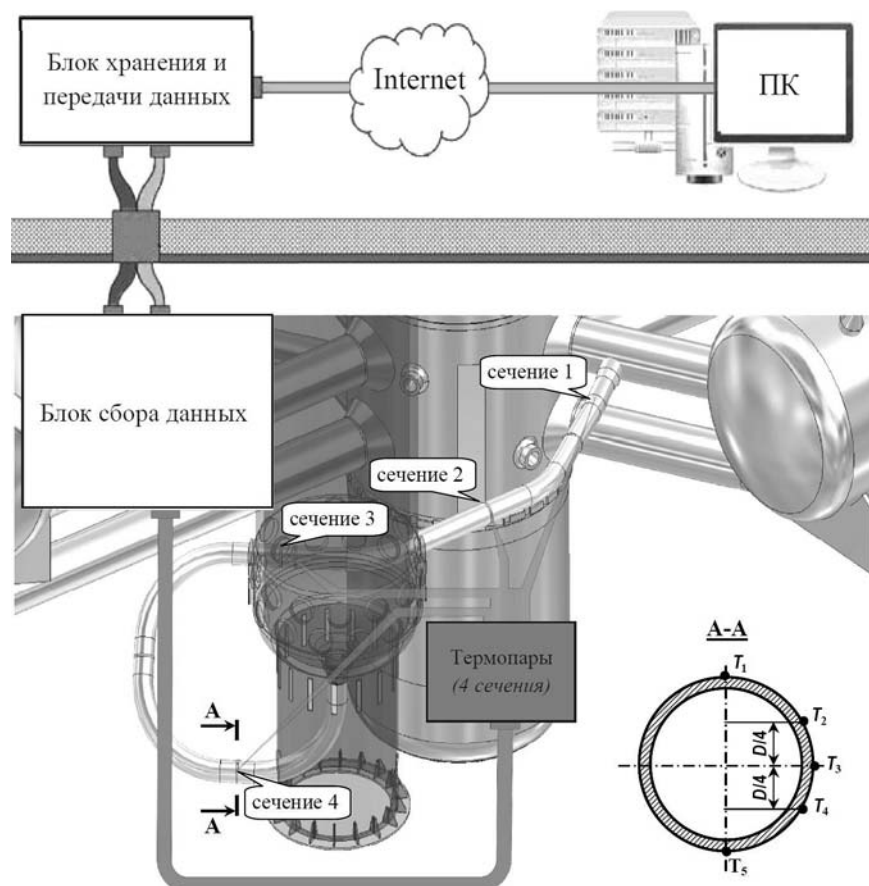


Рис. 1. Структурная схема СНМТС

СНМТС состоит из специализированных электронных блоков, коммутационных коробок и измерительных термопар, объединенных в единую цифровую сеть передачи данных при

помощи кабельных линий [12]. Структурная схема СНМТС представлена на рис. 1.

Блок сбора и обработки данных, состоящий из набора измерительных модулей термометрирования, расположен непосредственно в гермозоне вблизи ДТ. Блок хранения и передачи данных, представляющий собой промышленный высокопроизводительный сервер с подключенным вспомогательным оборудованием, установлен в обслуживаемом помещении энергоблока. Мониторинг температур осуществлялся в четырех контрольных сечениях ДТ, расположенных на горизонтальных участках трубопровода. В каждом контрольном сечении располагалось пять термопар по периметру сечения по внешней поверхности трубопровода. Все данные мониторинга записывались в автоматическом режиме и по сетевому соединению передавались в удаленный аналитический центр для обработки и детального анализа.

По результатам мониторинга ТС ДТ в течение двух топливных кампаний энергоблока № 5 в период с 2013 по 2015гг. собран достаточный объем статистических данных, позволяющих установить общие закономерности протекания процессов ТС в различных эксплуатационных режимах [13, 14]. При больших временных интервалах рассматриваемых данных и быстротечных процессах сложно судить о специфике расслоения потока только по графикам, на которых приведены абсолютные значения температур. В таком случае необходимо владеть информацией о градиенте температурного поля в контрольных сечениях ДТ, для того чтобы в последующем анализировать напряженно-деформированное состояние трубопровода. Для упрощенной количественной оценки величины ТС при анализе используется разность  $\Delta T$  между максимальным и минимальным значениями температур по сечению трубопровода.

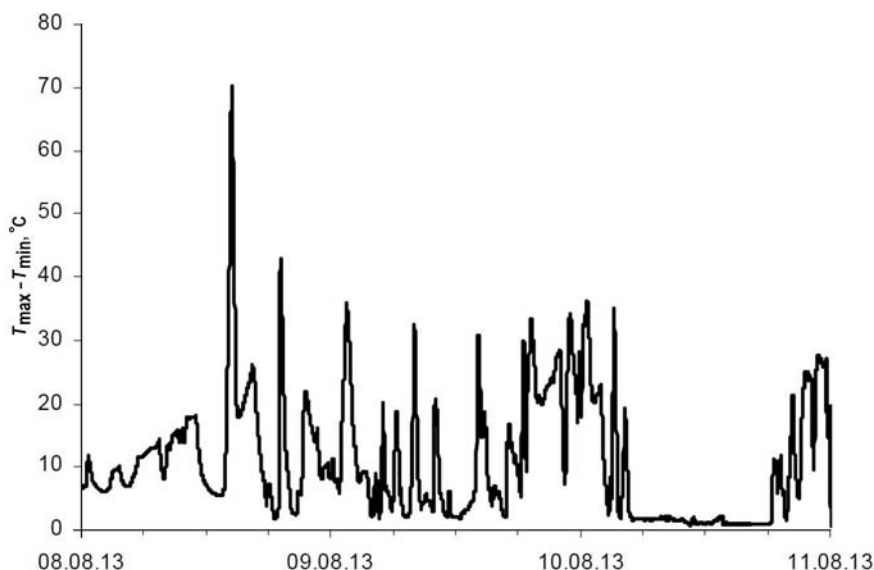


Рис. 2. Термическая стратификация в сечении № 4 в режиме разогрева РУ

Сравнительный анализ данных мониторинга, записанных во время разогрева РУ до «горячего» состояния, показал, что во всем дыхательном трубопроводе наблюдаются существенные пульсационные расслоения потока, а в контрольном сечении № 4 разность температур «холодного» и «горячего» потоков достигала максимального значения 71°C за все время пуска пятого блока (рис. 2). Таким образом, в режимах разогрева РУ до «горячего» состояния создаются условия, способствующие появлению процессов ТС в ДТ и поддержанию стабильности расслоенных потоков теплоносителя во времени. Отмечено, что в контрольных сечениях № 1 – 3 перепады температур по сечению, а следовательно, и величина ТС, существенно ниже по сравнению с сечением № 4.

«Горячее» состояние характеризуется установившейся температурой в ГЦТ около 280°C, в КД - около 345°C при давлении первого контура 15,7 МПа. Такое большое различие температуры в ГЦТ и КД способствует расслоению потока теплоносителя в ДТ с высокой разницей температур по сечению. Уровень воды в КД колеблется с амплитудой до 0,5 м, и теплоноситель внутри трубопровода перемещается в обе стороны. Это приводит к тому, что максимальная разница температур в контрольных сечениях колеблется с размахом выше 50°C.

Температурные нагружающие факторы при работе РУ на энергетических уровнях мощности и в режимах с плановым изменением мощности связаны, в основном, с циклическими колебаниями поля температур в контрольных сечениях ДТ. Число регулярных циклов термического нагружения ДТ при работе РУ на мощности в течение одной топливной кампании составляет в среднем 8 – 10 циклов в сутки. Размах колебаний средних температур в сечениях № 2 – 4 в режимах работы РУ на мощности 100 и 50% составляет около 10 и 15°C соответственно. В контрольном сечении № 1 (зона приварки ДТ к ГЦТ) при работе РУ на мощности циклические колебания температур не наблюдаются. Следует отметить, что в сечении № 4 регулярные термические циклы нагружения при работе РУ на мощности происходят с дополнительным наложением стратификации теплоносителя величиной 30 – 40°C. В то же время в контрольных сечениях № 2, 3 термическая стратификация практически отсутствует – разность между максимальной и минимальной температурами по указанным сечениям не превышает 5°C.

Наблюдаемые в ходе мониторинга циклические колебания температур в ДТ непосредственно связаны с изменением давления и уровня воды в КД. Прослеживается следующая взаимосвязь с параметрами РУ: с ростом уровня воды в КД происходит уменьшение температуры в контрольных сечениях – по дыхательному трубопроводу происходит переток теплоносителя из ГЦТ в КД. После этого идет обратный процесс – с уменьшением уровня воды в КД происходит увеличение температуры в контрольных сечениях – по дыхательному трубопроводу происходит переток теплоносителя из КД в ГЦТ. Указанные процессы напрямую связаны с регулированием давления (объема) первого контура [15].

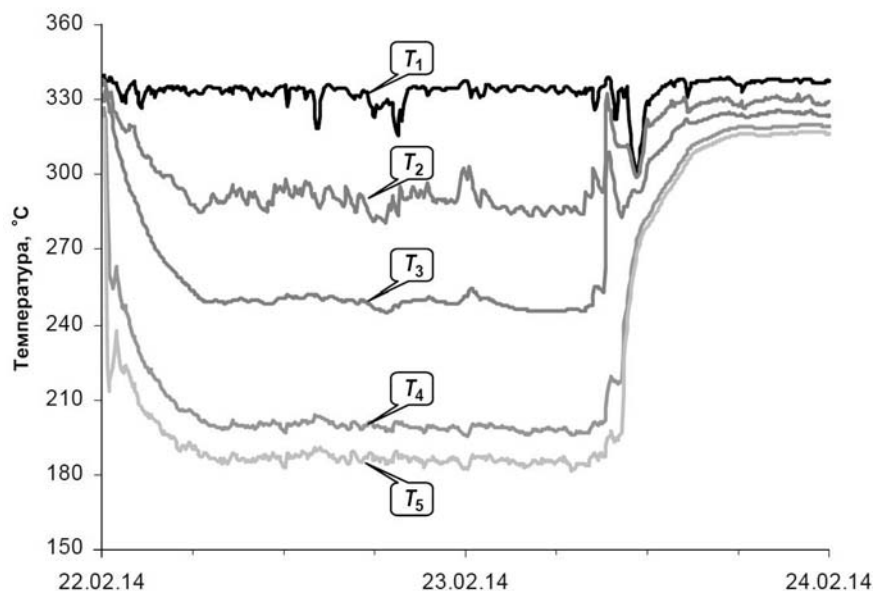


Рис. 3. Распределение температур по сечению № 4 при останове турбины

Максимальная ТС в ДТ, зафиксированная за время мониторинга, наблюдалась в режиме внепланового останова турбины, при котором произошло быстрое снижение мощ-



ности РУ со 100 до 50%. На рисунке 3 показаны графики термометрирования в сечении № 4, расположенном на первом горизонтальном участке от КД. Экспериментальные данные наглядно демонстрируют эффект ТС, который приводит к разнице температур по сечению от 30°C в нормальных условиях эксплуатации до 150С при нарушении нормальных условий эксплуатации и вызывает высокие температурные напряжения. При этом в других контрольных сечениях ТС не наблюдалась.

Показания термпар, установленных в четырех контрольных сечениях ДТ, были использованы в качестве исходных данных при выполнении расчетного обоснования прочности трубопровода. Расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) ДТ производился с использованием аттестованного программного средства UZOR 1.0, предназначенного для трехмерного расчета нестационарных полей температуры, упругого и упругопластического расчета НДС, параметров механики разрушения в элементах оборудования АЭС [16]. В программном средстве реализованы алгоритмы метода конечных элементов (МКЭ) и метода суперэлементов – надстройки по отношению к традиционному МКЭ, обеспечивающей существенное снижение потребления компьютерных ресурсов за счет поэтапного снижения размерности задачи [17].

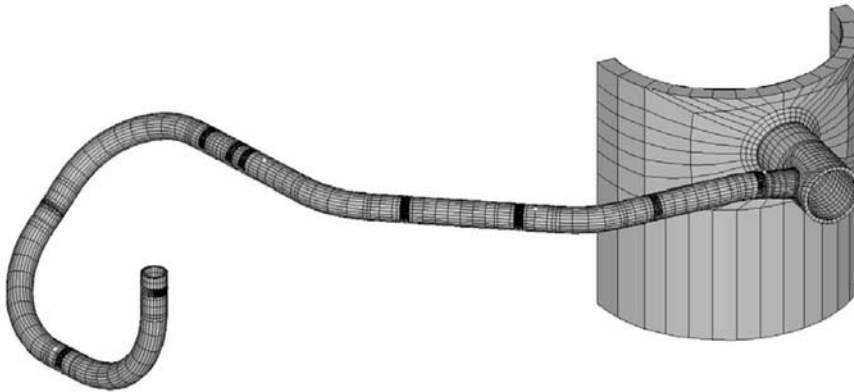


Рис. 4. Расчетная модель ДТ

Трехмерная расчетная модель ДТ энергоблока № 5 (рис. 4) построена с использованием проектно-конструкторской документации и полностью соответствует реальной конструкции трубопровода.

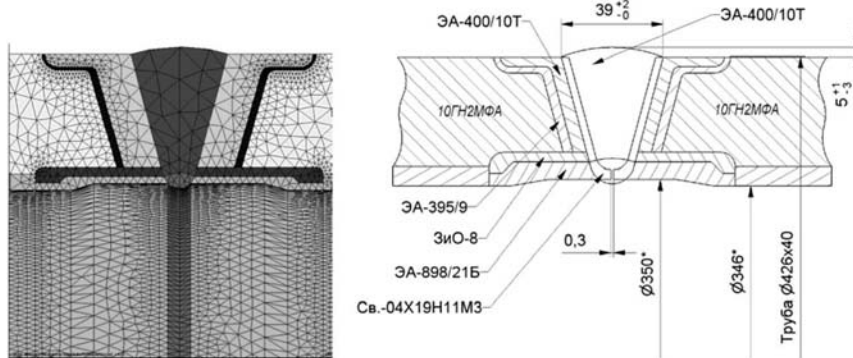


Рис. 5. Моделирование композитных сварных соединений

Основной особенностью сварных соединений (СС) ДТ является наличие в них основного металла перлитного класса (10ГН2МФА), сварного шва и наплавки, выполненных различными материалами аустенитного класса, т.е. СС ДТ являются композитными. Для возможности задания корректных исходных данных по фактическим

механическим свойствам материалов в различных зонах композитных СС выполнено их детальное моделирование (рис. 5).

Для расчетного анализа НДС ДТ из общего массива экспериментальных данных были выделены моменты времени, когда происходило изменение средней температуры в любом из контрольных сечений ДТ на величину более  $10^{\circ}\text{C}$  либо при наличии ТС величиной более  $10^{\circ}\text{C}$ . В каждый выделенный момент времени измеренные значения температур аппроксимировались на трехмерную расчетную модель ДТ, и полученные неравномерные температурные поля использовались для проведения расчетов НДС.

По результатам расчетно-экспериментальной оценки НДС ДТ установлено, что наибольшие термосиловые нагрузки вследствие ТС наблюдаются в контрольном сечении № 4. Эффект ТС при максимальной разности температур  $150^{\circ}\text{C}$ , зафиксированной в режиме непланового останова турбины, вызывает изменение приведенных напряжений на внешней поверхности СС на величину более 100 МПа. Эффект ТС величиной  $30 - 40^{\circ}\text{C}$ , наблюдаемый в сечении № 4 при работе РУ на энергетических уровнях мощности, приводит к возникновению циклических напряжений с размахом около  $25 - 30$  МПа. Несмотря на относительно невысокий уровень циклических нагрузок, вызванных ТС, регулярное повторение подобных режимов с частотой  $8 - 10$  циклов в сутки приводит к интенсивному накоплению усталостных повреждений в рассматриваемой зоне. Максимальная величина накопленного повреждения ДТ от нестационарных температурных воздействий, рассчитанная без учета остаточных сварочных напряжений, составляет в среднем 0,01 за одну топливную кампанию.

Согласно расчету, в сечении № 4 на внешней поверхности СС в зоне наплавки электродами ЭА395/9 и ЭА400/10Т наблюдаются зоны с максимальной накопленной повреждаемостью, которые совпадают с местами обнаружения фактических эксплуатационных дефектов в СС ДТ в виде продольных и поперечных трещин. Материал переходной наплавки из электрода ЭА-395/9 имеет наихудшие свойства с точки зрения циклической прочности по сравнению с основным металлом 10ГН2МФА и основным электродом ЭА-400/10Т в связи с низкими пластическими свойствами переходного электрода ЭА-395/9 [18]. Также следует отметить, что на повышенную повреждаемость данной зоны оказывают влияние температурные напряжения, возникающие в месте сплавления разнородных материалов вследствие различия коэффициентов температурного расширения сталей перлитного и аустенитного классов.

В процессе сварки трубных блоков ДТ в СС могут возникать высокие остаточные напряжения, так как технология сварки не предусматривает проведение восстановительной термообработки СС после монтажа. Оценка циклической прочности СС ДТ с учетом остаточных напряжений выполнена по формулам, связывающим допускаемые амплитуды напряжений и допускаемое число циклов нагружения согласно [19]. Результаты расчета получены с учетом коэффициентов асимметрии цикла и приведенных напряжений в упругопластической области нагружения, рассчитанных для проектных параметров нагружения первого контура ВВЭР-1000 при работе на номинальном уровне мощности РУ. Консервативный расчет показал, что для материала переходного электрода ЭА-395/9 при амплитуде напряжений 15 МПа допускаемое число циклов без учета остаточных напряжений составляет 300000 циклов, а с учетом остаточных растягивающих напряжений на уровне предела текучести металла – 60000 циклов. Регулярные циклы термического нагружения ДТ вследствие ТС с амплитудой напряжений около 15 МПа наблюдаются в сечении № 4 в процессе работы РУ на мощности. По данным мониторинга ТС ДТ число подобных циклов нагружения за одну топливную кампанию составляет в среднем 3000 циклов. Таким образом, выполненные консервативные оценки показывают, что при наличии высо-

ких остаточных сварочных напряжений в СС ДТ максимально допустимое значение накопленного усталостного повреждения  $[a] = 1$  может быть достигнуто уже через 20 лет эксплуатации только за счет рассмотренного режима циклического нагружения при работе РУ на мощности. Следует обратить особое внимание на то, что первые случаи обнаружения поверхностных трещин в СС ДТ были зафиксированы через 27 лет после начала эксплуатации энергоблока № 5.

Обнаружение эксплуатационных дефектов в СС ДТ обуславливает необходимость разработки и внедрения эффективных компенсирующих мероприятий, направленных на повышение остаточного ресурса ДТ. В качестве подобного компенсирующего мероприятия была предложена процедура обработки СС ДТ методом поверхностного пластического деформирования (ППД) [20]. Метод ППД основан на создании высоких остаточных сжимающих напряжений в поверхностном слое металла, что позволяет минимизировать влияние растягивающих эксплуатационных напряжений в зоне эксплуатационной дефектности, а также нивелировать влияние остаточных сварочных напряжений. Практическое внедрение процедуры обработки металла методом ППД позволит снизить вероятность образования поверхностных трещин в СС ДТ и обеспечить их безопасную эксплуатацию в период продленного срока службы энергоблока № 5 Нововоронежской АЭС.

### Литература

1. Шарый Н.В., Семишкин В.П., Пиминов В.А., Драгунов Ю.Г. Прочность основного оборудования и трубопроводов реакторных установок ВВЭР. – М.: ИздАТ, 2004. – 496 с.
2. Шарый Н.В. Актуальные проблемы расчетного обоснования прочности реакторных установок ВВЭР и пути их решения // ВАЭТ. Серия: Обеспечение безопасности АЭС. – 2010. – Вып. 27. – С. 5-21.
3. IPSN/OECD-NEA/WANO. Specialists meeting on experience with thermal fatigue in LWR piping caused by mixing and stratification. Proceedings. Paris, 1998. Режим доступа: <https://www.oecd-nea.org/nsd/docs/1998/csni-r98-8.pdf> (дата обращения 24.01.2017).
4. Беркович В.Я., Богачев А.В., Муравин Д.Б., Фомин А.В. Расчет нагружающих факторов по показаниям штатных датчиков системой САКОР-320 на 2 энергоблоке Ростовской АЭС / VII Международная научно-техническая конференция «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». Подольск, ОКБ «Гидропресс», 2011. Режим доступа: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2011/documents/mntk2011-111.pdf> (дата обращения 24.01.2017).
5. Саунин Ю.В., Добротворский А.Н., Семенихин А.В. Исследование факторов, определяющих температурную стратификацию теплоносителя в горячих нитках петель 1-го контура РУ с ВВЭР-1000 / VIII Международная научно-техническая конференция «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». Подольск, ОКБ «Гидропресс», 2013. Режим доступа: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2013/autorun/article133-ru.htm> (дата обращения 24.01.2017)
6. IAEA-TECDOC-1361. Assessment and management of ageing of major nuclear power plant components important to safety. Primary piping in PWRs. International Atomic Energy Agency, 2003. Режим доступа: [http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te\\_1361\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1361_web.pdf) (дата обращения 24.01.2017)
7. NUREG-1801. The Generic Aging Lessons Learned (GALL) Report. United States Nuclear Regulatory Commission, 2010. Режим доступа: <https://www.nrc.gov/docs/ML1034/ML103490041.pdf> (дата обращения 24.01.2017)
8. Safe management of the operating lifetimes of nuclear power plants INSAG-14. A report by the International Nuclear Safety Advisory Group. International Atomic Energy Agency, 1999. Режим доступа: [http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/P085\\_scr.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/P085_scr.pdf) (дата обращения 24.01.2017).



9. Бакиров М.Б. и др. Анализ термосиловой нагруженности дыхательного трубопровода и оценка остаточного ресурса с учетом влияния термической стратификации и старения металла в период сверхпроектного срока службы энергоблока № 5 НВАЭС. Технический отчет № 03/14-2. 000 «НСУЦ «ЦМиР», 2014.

10. Бакиров М.Б. и др. Анализ термосиловой нагруженности дыхательного трубопровода и оценка остаточного ресурса с учетом влияния термической стратификации в период сверхпроектного срока службы энергоблока № 5 НВАЭС по данным мониторинга, записанным в течение 31-й топливной кампании. Технический отчет № 03/15-2. 000 «НСУЦ «ЦМиР», 2015.

11. Резепов В.К., Денисов В.П., Кириллюк Н.А., Драгунов Ю.Г., Рыжов С.Б. Реакторы ВВЭР-1000 для атомных электростанций. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 333 с.

12. Бакиров М.Б., Поваров В.П. Система многопараметрического непрерывного мониторинга эксплуатационной повреждаемости оборудования атомной электростанции. Российская Федерация. Патент на изобретение № 2574578. Заявка: №2014104752/07 от 12.02.2014. Опубликовано: 10.02.2016.

13. Бакиров М.Б. и др. Сбор, обработка и анализ данных мониторинга термической стратификации дыхательного трубопровода 5 блока НВАЭС в различных режимах эксплуатации реакторной установки. Технический отчет № 03/14-1. 000 «НСУЦ «ЦМиР», 2014.

14. Бакиров М.Б. и др. Сбор, обработка и анализ данных, записанных системой мониторинга термической стратификации дыхательного трубопровода при работе на мощности и останове энергоблока № 5 НВАЭС в течение 31-й топливной кампании. Технический отчет № 03/15-1. 000 «НСУЦ «ЦМиР», 2015.

15. Овчинников Ф.Я., Семенов В.В. Эксплуатационные режимы водо-водяных энергетических реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 359 с.

16. Киселев А.С., Киселев А.С., Даничев В.В. Аннотация программы UZOR1 // ВАНТ. Серия: Физика ядерных реакторов. – 1999. – Вып. 1. – С. 109-113.

17. Постнов В.А., Дмитриев С.П. Метод суперэлементов в расчетах инженерных сооружений. – Л.: Судостроение, 1979. – 287 с.

18. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварка и наплавка. Основные положения. ПНАЭ Г-7-009-89. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 136 с.

19. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПНАЭ Г-7-002-86. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.

20. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием. Справочник. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.

Поступила в редакцию 25.04.2016 г.

#### Авторы

Поваров Владимир Петрович, директор Нововоронежской АЭС, канд. техн. наук  
E-mail: PovarovVP@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Уразов Олег Владимирович, начальник отдела дефектоскопии металлов и технического контроля Нововоронежской АЭС  
UrazovOV@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Бакиров Мурат Баязитович, генеральный директор ООО «НСУЦ «ЦМиР», д-р техн. наук  
mareeva-test@yandex.ru

Левчук Василий Иванович, начальник лаборатории, канд. техн. наук  
leavcs@mail.ru

**DESIGN AND EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF THERMAL STRATIFICATION INFLUENCE ON OPERATIONAL LOADING OF SURGE LINE OF NOVovorONEZH NPP, UNIT №5**

Povarov V.P. \*, Urazov O.V. \*, Bakirov M.B. \*\*, Levchuk V.I. \*\*

\*The branch of JSC «Concern Rosenergoatom» «Novovoronezh Nuclear Power Plant» (Novovoronezh NPP)

396071, Russia, Voronezh reg., Novovoronezh, industrial zone Yuzhnaya 1

\*\* Center of material science and lifetime management (CMSLM, Ltd).

140002, Moscow reg., Lyubertsy, Kirova str., 7, office 5

ABSTRACT

One of the main tasks of NPP lifetime justification consists in detailed consideration of all factors affecting the residual life of critical NPP components. Particular attention should be paid to studying the phenomenon of thermal stratification (TS), which is the effect of coolant lamination to the “cold” and “hot” layer in a horizontal pipelines while flows having different temperatures stream with slow rates. The relevance of this issue is stipulated for the fact that cyclic loads caused by TS result in accumulation of metal damage due to thermal fatigue and can initiate formation and accelerated growth of defects.

The work is devoted to complex analysis of coolant TS observed in the horizontal runs of the surge line (SL) on WWER-1000 units. Comprehensive assessment of TS effects on a stress-strain state and cyclic damage accumulation of metal was also made. The experimental data regarding the distribution of temperature fields in horizontal SL sections, as well as cyclic loading history during several reactor campaigns were recorded by on-line monitoring system, put into operation on Novovoronezh NPP, Unit 5. Data analysis allowed to establish some distinctive features of TS in SL of Unit 5, depending on operational modes. The most significant TS effects were observed in the control section located in the first horizontal run nearby the pressurizer.

Experimental records were used as initial data for calculations which were provided in order to evaluate the stress-strain state of SL considering TS effects. Results of stress analysis allow to conclude that actually observed effects of thermal stratification and thermal fatigue have a significant impact on SL lifetime. Indicated by calculations areas, in which maximum accumulated damage is observed, coincide with places of operational defects being revealed during outage of Unit 5. As a compensatory measure aimed at increasing the SL residual life, it is proposed the procedure of treatment of SL weld joints using the method of surface plastic deformation.

**Key words:** thermal stratification, surge line, thermal fatigue, thermomechanical load, on-line monitoring, stress-strain state.

REFERENCES

1. Sharyj N.V., Semishkin V.P., Piminov V.A., Dragunov Ju.G. *Prochnost' osnovnogo oborudovaniya i truboprovodov reaktornykh ustanovok VVER* [Strength of main equipment and pipelines of WWER reactor assemblies]. Moscow. Izdat Publ. 2004. 496 p. (in Russian).
2. Sharyj N.V. *Aktual'nye problemy raschyotnogo obosnovaniya prochnosti reaktornykh ustanovok VVER i puti ih resheniya* [Topical problems of strength calculation of VVER reactor assemblies and ways of solving]. *VANT. Ser. Obespechenie bezopasnosti AES.*, 2010, iss. 27, pp. 5-21 (in Russian).
3. IPSN/OECD-NEA/WANO. Specialists meeting on experience with thermal fatigue in LWR piping caused by mixing and stratification. Proceedings. Paris, 1998. Available at:

- <https://www.oecd-nea.org/nsd/docs/1998/csni-r98-8.pdf> (accessed 24 Jan. 2017).
4. Berkovich V. Ya., Bogachev A. V., Muravin D. B., Fomin A. V. *Raschet nagruzhajuschih faktorov po pokazaniyam shtatnyh datchikov sistemoy SAKOR-320 na 2 energobloke Rostovskoj AES* [Calculation of loading factors SACOR-320 by indications of standard detectors on Rostov NPP, unit 2]. The VII-th International scientific and technical conference «Safety Assurance of NPP with WWER». Podol'sk, OKB «Gidropress», 2011 (in Russian). Available at:  
<http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2011/documents/mntk2011-111.pdf> (accessed 24 Jan. 2017).
5. Saunin Yu. V., Dobrotvorskiy A. N., Semenihih A. V. *Issledovanie faktorov, opredelyayuschih temperaturnyuyu stratifikaciju teplonositelya v gorjachih nitkah petel' 1-go kontura RU s VVER-1000* [Examination of factors, determining the coolant thermal stratification in hot legs of primary circuit loops of RP with WWER-1000]. The VII-th international scientific and technical conference «Safety Assurance of NPP with WWER». Podol'sk, OKB «Gidropress», 2013 (in Russian). Available at:  
<http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2013/autorun/article133-ru.htm> (accessed 24 Jan. 2017).
6. IAEA-TECDOC-1361. Assessment and management of ageing of major nuclear power plant components important to safety. Primary piping in PWRs. International Atomic Energy Agency, 2003. Available at: [http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te\\_1361\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1361_web.pdf) (accessed 24 Jan. 2017).
7. NUREG-1801. The Generic Aging Lessons Learned (GALL) Report. United States Nuclear Regulatory Commission, 2010. Available at:  
<https://www.nrc.gov/docs/ML1034/ML103490041.pdf> (accessed 24 Jan. 2017).
8. Safe management of the operating lifetimes of nuclear power plants INSAG-14. A report by the International Nuclear Safety Advisory Group. International Atomic Energy Agency, 1999. Available at:  
[http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/P085\\_scr.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/P085_scr.pdf) (accessed 24 Jan. 2017).
9. Bakirov M. B., Levchuk V. I., Kiselev A. S. *Analiz termosilovoj nagruzhennosti dyhatel'nogo truboprovoda i oценка ostatochnogo resursa s uchetom vliyaniya termicheskoy stratifikacii i stareniya metalla v period sverhproektnogo sroka sluzhby energobloka № 5 NVAES* [Analysis of thermal loads in the surge line and assessment of its residual lifetime considering effects of thermal stratification and metal ageing during long term operation of Novovoronezh NPP, Unit 5]. Technical report № 03/14-2. CMSLM Ltd., 2014 (in Russian).
10. Bakirov M. B., Levchuk V. I., Kiselev A. S. *Analiz termosilovoj nagruzhennosti dyhatel'nogo truboprovoda i oценка ostatochnogo resursa s uchetom vliyaniya termicheskoy stratifikacii v period sverhproektnogo sroka sluzhby energobloka № 5 NVAES po dannym monitoringa, zapisannym v techenie 31-j toplivnoj kampanii* [Analysis of thermal loads in the surge line and assessment of its residual lifetime considering effects of thermal stratification during long term operation of Novovoronezh NPP, Unit 5 using monitoring data obtained during 31 fuel campaign]. Technical report № 03/15-2. CMSLM Ltd., 2015 (in Russian).
11. Rezepov V. K., Denisov V. P., Kirilyuk N. A., Dragunov Yu. G., Ryzhov S. B. *Reaktory VVER-1000 dlja atomnyh elektrostancij* [Reactors WWER-1000 for nuclear power plants]. Moscow, Akademkniga Publ., 2004. 333 p. (in Russian).
12. Bakirov M. B., Povarov V. P. *Sistema mnogoparametricheskogo nepreryvnogo monitoringa ekspluatacionnoj povrezhdaemosti oborudovaniya atomnoj elektrostancii* [System of multi-parametric on-line monitoring of operational damageability of nuclear power plant equipment]. Russian Federation. Patent for invention № 2574578. Request № 2014104752/07 12.02.2014. Published: 10.02.2016 (in Russian).
13. Bakirov M. B., Levchuk V. I., Kiselev A. S. *Sbor, obrabotka i analiz dannyh monitoringa termicheskoy stratifikacii dyhatel'nogo truboprovoda 5 bloka NVAES v razlichnyh rezhimakh ekspluatatsii reaktornoj ustanovki* [Collection, processing and analysis of monitoring data concerning thermal stratification in the surge line of Novovoronezh NPP, Unit 2 in various operational modes of the reactor facility]. Technical report № 03/14-1. CMSLM Ltd., 2014 (in Russian).
14. Bakirov M. B., Levchuk V. I., Kiselev A. S. *Sbor, obrabotka i analiz dannyh, zapisannyh sistemoy monitoringa termicheskoy stratifikacii dyhatel'nogo truboprovoda pri rabote na*

*moshhnosti i ostanove energobloka № 5 NVAES v techenie 31-j toplivnoj kampanii* [Collection, processing and analysis of monitoring data recorded by the thermal stratification monitoring system of the surge line during power operation and cooldown of Novovoronezh NPP, Unit 5 during 31 fuel campaign].

Technical report № 03/15-1. CMSLM Ltd., 2014 (in Russian).

15. Ovchinnikov F.Ya., Semenov V.V. *Ekspluatacionnye rezhimy vodo-vodjanyh energeticheskikh reaktorov* [Operational modes of pressurized water reactors]. Moscow. Energoatomizdat Publ. 1988. 359 p. (in Russian).

16. Kiselev A.S., Kiselev A.S., Danichev V.V. *Annotacija programmy UZOR1* [Annotation of the software UZOR1]. *VANT. Ser. Fizika yadernykh reaktorov*. 1999, iss. 1, pp. 109-113 (in Russian).

17. Postnov V.A., Dmitriev S.P. *Metod superelementov v raschetah inzhenernykh sooruzhenij* [The method of super elements in calculations of engineering structures]. Leningrad. Sudostroenie Publ. 1979. 287 p. (in Russian).

18. *Oborudovanie i truboprovody atomnykh energeticheskikh ustanovok. Svarka i naplavka. Osnovnye polozeniya* [Equipment and pipelines of atomic electric power plants. Welding and cladding. General provisions]. PNAEG-7-009-89. Moscow. Energoatomizdat Publ. 1991. 136 p. (in Russian).

19. *Normy rascheta na prochnost' oborudovaniya i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok* [Norms for strength calculations of equipment and pipelines of atomic electric power plants]. PNAEG-7-002-86. Moscow. Energoatomizdat Publ. 1989. 525 p. (in Russian).

20. Odincov L.G. *Uprochnenie i otdelka detalej poverhnostnym plasticheskim deformirovaniem* [Hardening and treatment of components using surface plastic deformation]. Handbook. Moscow. Mashinostroeine Publ. 1987. 328 p. (in Russian).

#### Authors

Povarov Vladimir Petrovich, Director of the Novovoronezh NPP, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: PovarovVP@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Urazov Oleg Vladimirovich, Head of Department

E-mail: UrazovOV@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Bakirov Murat Bayazitovich, Director General of CMSLM Ltd., Doct. Sci. (Engineering)

E-mail: mareeva-test@yandex.ru

Levchuk Vasilij Ivanovich, Head of Laboratory CMSLM Ltd., Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: leavc@mail.ru