

ОПЫТ РАБОТ ОКБ «ГИДРОПРЕСС» ПО ПРОДЛЕНИЮ СРОКА СЛУЖБЫ ПГ АЭС БН-600 И ЗАДАЧИ РАЗРАБОТКИ ПГ ДЛЯ НОВЫХ ЭНЕРГООБЛОКОВ С РЕАКТОРАМИ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ

В.В. Денисов, М.Д. Лякишева, В.И. Карсонов, Н.Б. Трунов
ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», г. Подольск



В статье представлены работы ОКБ «Гидропресс» по определению остаточного ресурса и продлению срока службы парогенераторов ПГН-200М энергоблока БН-600. Обоснована прочность металлоконструкций, даны рекомендации по повышению сейсмостойкости. Отмечено несовершенство существующей нормативной базы, представлены мероприятия по его устранению. Положительный опыт эксплуатации парогенераторов БН-600, а также результаты исследования состояния критических узлов ПГ после длительной наработки дают возможность уверенно перейти к новому поколению корпусных ПГ со значительным повышением технико-экономических характеристик для перспективных проектов энергоблоков с реакторами на быстрых нейтронах.

Ключевые слова: модуль, наработка, нормативная база, парогенератор, ресурс.
Key words: steam generator heat exchanger, accumulated running hours, regulatory base, steam generator, lifetime.

На сегодня энергоблок № 3 с реактором БН-600 Белоярской АЭС – единственный в мире работающий энергоблок промышленного масштаба с реактором на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. Энергоблок был включен в энергосистему 8 апреля 1980г., т.е. эксплуатируется более 29 лет. Успешная эксплуатация энергоблока позволяет ставить задачу разработки новых энергоблоков с быстрыми реакторами.

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ, УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПГН-200М

Разработчик парогенератора блока №3 с реактором БН-600 – ОКБ «Гидропресс». Парогенератор «натрий-вода» ПГН-200М – прямоточный, высокого давления, секционный, модульный, с одностенным разделением рабочих сред. Компоновка РУ трехпетлевая. Парогенератор каждой петли состоит из 8 секций, буферной емкости и трубопроводов обвязки по II и III контурам. Каждая секция состоит из трех модулей (теплообменников): испарителя, перегревателя острого

© В.В. Денисов, М.Д. Лякишева, В.И. Карсонов, Н.Б. Трунов, 2009

пара (основной пароперегреватель) и перегревателя пара промежуточного давления (промпароперегреватель) (см. рис. 1). Конструкция ПГ предполагает возможность замены модулей.

В сравнении с парогенератором РУ с ВВЭР ПГН-200М эксплуатируется в более неблагоприятных условиях и вырабатывает пар более высоких параметров:

- давление 14,0 МПа (6,27 МПа ВВЭР);
- температура до 520°C (278°C ВВЭР).

При обосновании прочности парогенератора в этих условиях необходимо учитывать характеристики длительной прочности, пластичности и ползучести, уменьшающиеся с увеличением времени эксплуатации, тогда как в ВВЭР температура рабочих сред не превышает 350°C и учет длительных свойств не требуется.

При сравнении условий эксплуатации парогенератора и собственно реактора РУ БН-600 можно отметить, что в парогенераторе давление на порядок выше при сравнимом уровне температур.

ПГН-200М работает со средами (вода, пар, жидкий натрий), бурно взаимодействующими между собой, поэтому необходим особо ответственный подход к продлению ресурса парогенератора, тем более, что в мире нет аналогов с большей

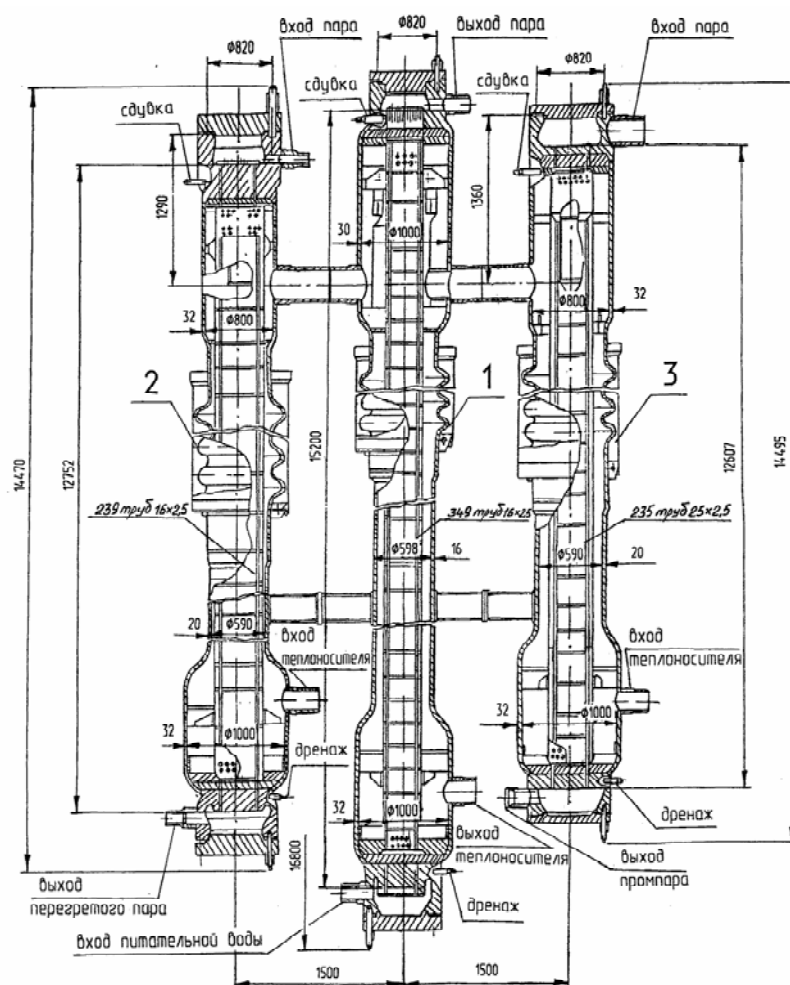


Рис. 1. Секция парогенератора ПГН-200М: 1 – модуль испарителя; 2 – модуль основного пароперегревателя; 3 – модуль промпароперегревателя

наработкой, чем этот парогенератор. Первоначально назначенный ресурс испарителя (сталь 10Х2М) – 50 тысяч часов (по мере наработки неоднократно продлевался), а основного и промежуточного пароперегревателей (сталь 08Х18Н9) – 200 тысяч часов.

В работах по продлению срока эксплуатации энергоблока определяющее значение имеет расчетное обоснование возможности продления ресурса его элементов. В отличие от расчетов в обоснование проекта, в которые закладывается консервативный подход, присущий Нормам расчета на прочность ПНАЭГ-7-002-86, в расчетах при продлении ресурса используются

- фактические условия эксплуатации;
- реальные параметры прохождения режимов;
- фактическое количество режимов;
- прогнозируемое количество режимов на продляемый период, которое, как правило, основывается на последних десяти годах работы РУ и существенно меньше, чем первоначально принятое в проекте.

Все это является предпосылками для возможного увеличения срока службы на прогнозируемый дополнительный период.

РАБОТЫ ПО ПРОДЛЕНИЮ РЕСУРСА

В соответствии с требованиями НД и программой обследования и оценки технического состояния и остаточного ресурса ОКБ «Гидропресс» в 2004–2008 гг. выполнены расчеты, необходимость проведения которых определялась следующим:

- несоответствие проектных расчетов действующим НД;
- несоответствие фактических режимов эксплуатации проектным;
- изменение спектров ответа при МРЗ;
- изменение свойств материала в зависимости от длительности нагружения;
- расчетное обоснование отклонений КД от требований действующей НД.

Для модулей парогенератора, буферной емкости и трубопроводов обвязки ПГ по натриевому и пароводяному контурам в границах проектирования ОКБ «Гидропресс» были выполнены следующие расчеты:

- на статическую и длительную статическую прочность;
- на воздействие МРЗ;
- на циклическую и длительную циклическую прочность.

Обоснована прочность металлоконструкций и элементов крепления модулей в НУЭ и при МРЗ. Даны рекомендации по повышению сейсмостойкости элементов крепления.

Расчетное обоснование проведено с учетом опыта неоднократного продления ресурса РУ БОР-60, на основе фактических режимов эксплуатации, предоставленных БАЭС, и с использованием разработанных и аттестованных ОКБ «Гидропресс», а также приобретенных современных отечественных и зарубежных расчетных кодов. Выполнены оценки возможности продления ресурса модулей и трубопроводов, для уточнения которых получены от головной материаловедческой организации характеристики длительных свойств материалов за время 300 тысяч часов.

На основании расчетов определены наиболее нагруженные (или наиболее опасные с точки зрения нормативных оценок прочности) элементы модулей, а также наиболее опасные режимы, существенно влияющие на прочность.

«Слабые» по расчетам места проявились и при эксплуатации. В композитных сварных соединениях трубопроводов острого и горячего пара промперегрева, эксплуатируемых в условиях высоких (более 510°C) температур, после длительной эксплуатации были выявлены трещины. Данные сварные швы на «горячих» ветках трубопроводов выполнены вновь.

Расчеты, а также проведенные на БАЭС и в ОКБ «Гидропресс» исследования, подтвердившие меньшую скорость коррозии металла теплообменных труб испарителей второго поколения, позволили продлить ресурс модулей испарителей до 125 тысяч часов. При этом длительность работы ПГ с отключенными по третьему контуру модулями ОП или ПП (что допускается руководством по эксплуатации ПГ) не должна превышать 10000 ч.

Проведенные расчеты распространяются и на вновь изготавливаемые модули испарителей ПГ, предназначенные для замены эксплуатируемых с целью продления срока эксплуатации энергоблока.

Проведенными расчетами был также подтвержден проектный ресурс основного и промежуточного пароперегревателей, но с уменьшением общего количества режимов относительно проектного, с учетом фактически достигнутых по опыту эксплуатации энергоблока величин давления и температур рабочих сред и исключения наиболее опасного режима подключения отключенной секции на «ходу».

На последующих этапах мероприятий по продлению срока службы блока №3 БАЭС с целью определения нагрузок на патрубки арматуры и возможности продления ресурса трубопроводов предусмотрено проведение (с привлечением специалистов ОКБ «Гидропресс») тензометрирования и определения остаточного (по отношению к проектному) натяга трубопроводов обвязки ПГ по третьему контуру после длительной эксплуатации.

НЕСОВЕРШЕНСТВО НОРМАТИВНОЙ БАЗЫ

В процессе проведения расчетов, обосновывающих возможность продления срока службы элементов парогенератора ПГН-200М, выявились недостатки норм расчета на прочность. Можно отметить, что если американский код ASME периодически дополняется, то наши нормы заморожены в своем развитии. Идут разговоры по созданию «Свода правил и регламентов», но уже сейчас ясно, что нормативная база отстала от задач по созданию РУ на более длительный срок (45–60 лет) эксплуатации и является в определенном смысле «тормозом».

В качестве примера несовершенства нормативной базы можно привести следующее.

Величина давления гидравлических испытаний теплообменной трубы испарителя (сталь 10Х2М) в соответствии с Правилами и Нормами должна определяться с учетом минимальных показателей механических свойств материала, в данном случае длительной прочности. При этом для испарителя БН-600 давление гидравлических испытаний с 20,6 МПа (по первоначальному проекту) должно быть увеличено до 23,2 МПа, а для пароперегревателя БН-800 нижняя граница гидроиспытаний должна была бы быть 42 МПа, что в 2,34 раза больше рабочего давления. Очевидна нецелесообразность такого подхода.

Для решения этой проблемы по инициативе ОКБ «Гидропресс» было разработано техническое решение «Определение параметров гидравлических испытаний парогенератора Н-272 РУ БН-800», опирающееся на зарубежный опыт, а также опыт эксплуатации БН-600. Решение распространено и на ПГ БН-600.

С целью приведения документации в соответствие с действующими НД и увеличения срока службы РУ БН-800 до 45 лет проводились работы по корректировке ранее выполненного технического проекта ПГ. При этом пришлось столкнуться с отсутствием в НД необходимых для расчета на прочность данных за время свыше 30 лет, с отсутствием в ТУ свойств материалов при повышенных температурах, невозможностью головной материаловедческой организацией прогнозирования длительных свойств конструкционного материала с более высокой категорией прочности, если даже таковые имеются для более низкой категории.

От разработчиков высокотемпературного оборудования в НТЦ ЯРБ направлены предложения по назревшей корректировке НД:

- основные нормативные документы должны быть приведены в соответствие между собой по обозначению основных и сварочных материалов, а также стандартам и ТУ на них;
- должны быть исправлены явные опечатки и несуразности, учтен опыт отечественных (например, аналогичные нормы для ТЭС) и зарубежных норм (ASME и т.д.);
- Нормы должны позволять обосновывать прочность оборудования АС на актуальный в настоящее время срок эксплуатации АЭУ в 45 – 60 лет при уточнении (по существующему опыту эксплуатации) необходимых характеристик материалов и используемых в Норме коэффициентов;
- должны быть приведены методики определения характеристик жаропрочности материалов при промежуточных временах и температурах как для более низких, так и для более высоких категорий прочности.

Необходимо также

- уточнить влияние науглероживания и обезуглероживания материалов на статическую и длительную статическую прочность;
- расширить содержание раздела для расчета на сопротивление хрупкому (вязкому) разрушению элементов из сталей, приведенных в табл. 1 для оборудования, при флюенсе более 10^{22} нейтрон/м² и при температурах более 350°C;
- уточнить методику расчета напряжений в тройниковом соединении с учетом реальной геометрии сварного шва или условного радиуса перехода;
- привести методику по учету релаксации напряжений в трубопроводах и узлах уплотнений и соответствующие характеристики релаксационной стойкости материалов;
- привести критерии допустимой величины ползучести типовых узлов деталей и конструкций;
- разработать методы обработки и критерии оценки результатов, полученных современными программными комплексами по объемным моделям;
- разработать методику определения допускаемых при эксплуатации дефектов в металле сварных швов соединений теплообменной труба-трубная доска ПГ РУ БН.

ПЕРЕХОД ОТ МОДУЛЬНЫХ ПГ К КОРПУСНЫМ

На сегодня в РФ освоены парогенераторы (ПГ), разработанные на базе секционно-модульной концепции, эксплуатируемые в составе РУ БН-600. ПГ аналогичного типа разработаны для строящейся РУ БН-800 (рис. 2).

ПГ надежны в эксплуатации, однако металлоемки и дороги. Применяемый для ПГ РУ БН-800 конструкционный материал позволяет обеспечить ресурс теплообменных модулей 150 тыс. ч, что предполагает необходимость замены ПГ за назначенный ресурс РУ (45лет).

Для РУ БН-1200 предполагается разработка и применение крупномодульных ПГ (рис. 3) или ПГ корпусного типа (рис. 4).

Предварительные проработки показали, что это позволит существенно (в 2-3 раза) улучшить технико-экономические показатели ПГ. Освоение новых конструкционных материалов позволит обеспечить заданный проектный срок службы (45-60 лет) таких ПГ. Заводом-изготовителем подтверждена возможность изготовления ПГ предлагаемых типов. Работоспособность отдельных узлов и систем, а также ПГ в целом в связи с увеличением габаритов и скоростей рабочих сред требует полного экспериментального подтверждения на моделях.

Существующий опыт разработки и эксплуатации секционно-модульных ПГ яв-

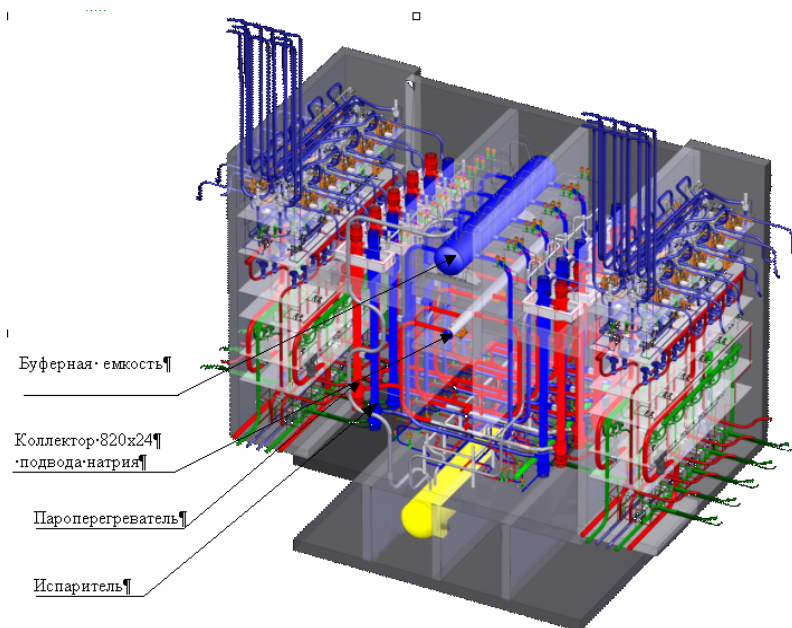


Рис. 2. Общий вид ПГ H272

ляется основой эволюционного пути развития к секционно-крупномодульным ПГ и ПГ корпусного типа.

ЗАДАЧИ РАЗРАБОТКИ ПГ ДЛЯ НОВЫХ ЭНЕРГБЛОКОВ С БЫСТРЫМИ РЕАКТОРАМИ

Одной из основных проблем является проблема выбора конструкционного материала для теплообменной поверхности и корпусных элементов ПГ. Материал

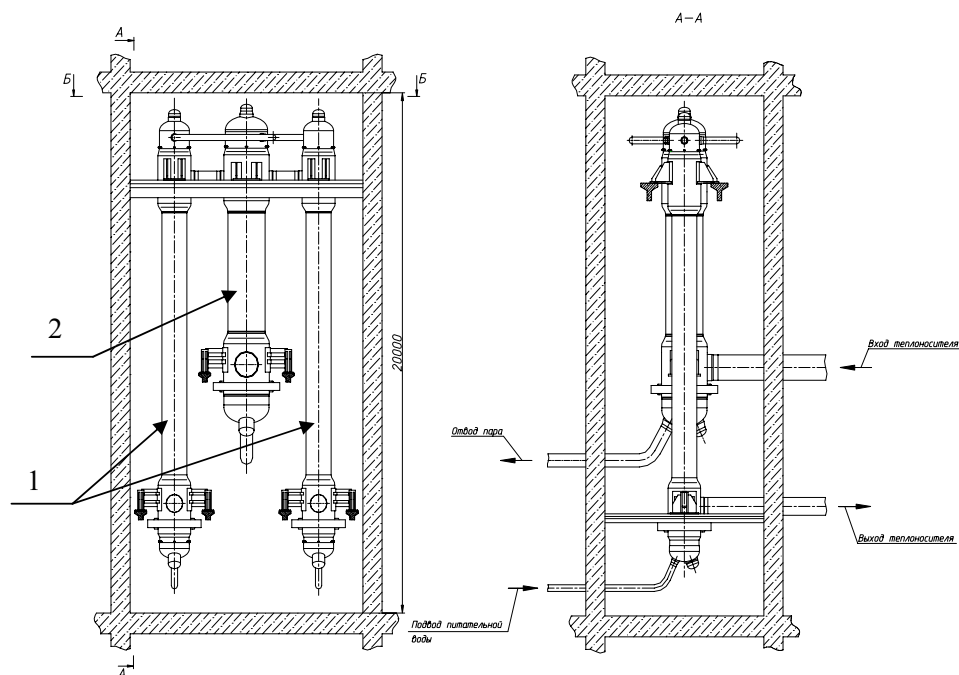


Рис. 3. Секционно-крупномодульный парогенератор односекционный: 1 – модуль испарителя; 2 – модуль пароперегревателя

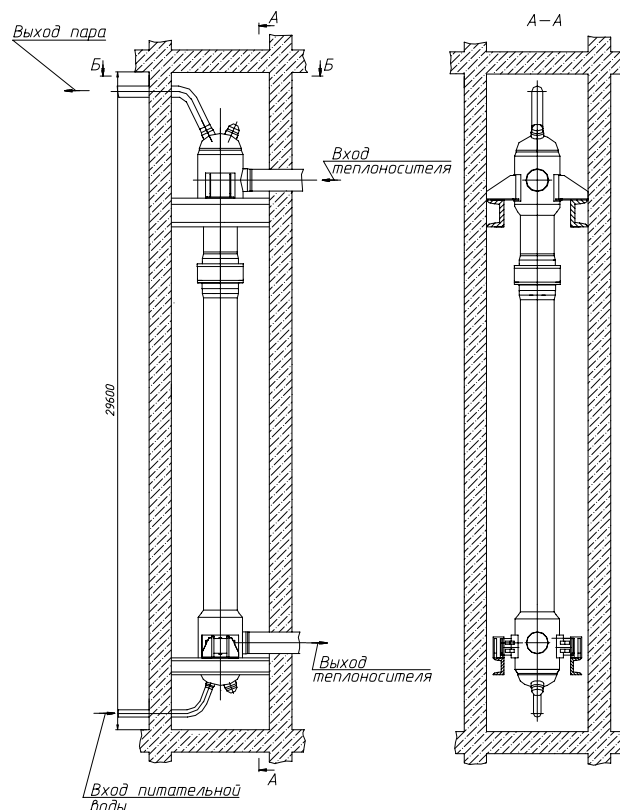


Рис. 4. Парогенератор корпусного типа (однокорпусной)

должен обеспечить требуемый срок службы ПГ при приемлемой стоимости и технологичности изготовления изделия. Применяемый сегодня материал (сталь 10Х2М) хорошо освоен, но, как считается, не может обеспечить требуемый срок службы ПГ.

Для накопления и сохранения опыта разработки и эксплуатации необходимо проведение исследований коррозионных, физико-механических свойств конструкционного материала (стали 10Х2М и 08Х18Н9) и состояния критических узлов заменяемых модулей ПГ РУ БН-600. Опыт продления ресурса модулей испарителей показал, что при качественной эксплуатации (улучшение ВХР, своевременная отмывка от отложений) модулей-испарителей второго поколения удалось существенно снизить скорость как общей, так и язвенной коррозии данной стали. Необходимо продолжить исследования калиброванных (размеры и расположение которых в трубных пучках указаны в паспортах модулей) трубок. Вполне возможно, что эти исследования позволят для парогенераторов РУ БН-1200, по крайней мере, для испарительной части, использовать технологически освоенную и относительно дешевую сталь 10Х2М.

Мирового опыта наработки даже уже достигнутого ресурса парогенераторов такого типа нет. То, что на энергоблоке № 3 после наработки около 140000 часов были выявлены сквозные дефекты в трех промпароперегревателях и то, что за меньший период в композитных сварных швах «горячих» трубопроводов третьего контура появились трещины, настораживает и требует детального изучения с целью исключения в дальнейшем или, по крайней мере, предсказуемости данных явлений. Поэтому еще раз подчеркнем, что нужны исследования основного ме-

талла и сварных соединений, а также критических узлов отработавших свой ресурс модулей ПГ РУ БН-600. Ввиду отсутствия «прямых» экспериментальных данных по длительным свойствам материалов на ресурс $3 \cdot 10^5$ ч достоверное прогнозирование длительной прочности, пластичности и ползучести является одной из важнейших задач для обеспечения надежной эксплуатации РУ.

Сегодня в качестве перспективного материала для ПГ РУ БН-1200 рассматривается сталь 07X12НМФБ, которая не имеет широкого применения. Она должна быть широко исследована на стендах ФГУП ЦНИИКИ «Прометей» и ФЭИ для получения всех необходимых физико-механических характеристик (в том числе кратковременных механических свойств, характеристик длительной прочности, пластичности и ползучести) на ресурс не менее 300 тыс. часов, коррозионной стойкости в продуктах взаимодействия воды и натрия. Для создания корпусных ПГ должны быть предусмотрены и работы по оформлению ТУ на поставку необходимых полуфабрикатов – поковок, листов, теплообменных труб длиной до 30 м (освоенная на сегодня длина 18 м).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работы по продлению срока службы оборудования действующей РУ БН-600 имеют большое значение как для назначения срока службы реактора и оборудования строящейся РУ БН-800 (45 лет), так и проектируемой РУ БН-1200 (60 лет). Для учета опыта эксплуатации и отхода от чрезмерного консерватизма в нормативных документах нужны исследования состояния металла и критических узлов ПГ, а также создание системы мониторинга эксплуатационных параметров рабочих сред, характеристик и количества эксплуатационных режимов и оценки их влияния на свойства материала и в, конечном итоге, на ресурс.

Положительный опыт эксплуатации парогенератора БН-600, а также результаты исследования состояния критических узлов ПГ после длительной наработки дают возможность уверенно перейти к новому поколению корпусных ПГ со значительным повышением технико-экономических характеристик.

ПЕРЕЧЕНЬ ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

ASME – американское общество инженеров-механиков
АЭУ – атомная энергетическая установка
БН – быстрые нейтроны
БОР60 – быстрый опытный реактор
ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор
ВХР – водно-химический режим
НД – нормативная документация
НТЦ ЯРБ – научно-технический центр ядерной и радиационной безопасности
НУЭ – нормальные условия эксплуатации
МРЗ – максимальное расчетное землетрясение
ОП – основной пароперегреватель
ПГ – парогенератор
ПП – промпароперегреватель
РУ – реакторная установка
ТЭС – тепловая электрическая станция
ФГУП ЦНИИКИ – федеральное государственное унитарное предприятие центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов
ФЭИ – физико-энергетический институт

Поступила в редакцию 30.03.2009

УДК 621.311.25: 621.039

Visualization of the Database on the Off-Normal Operation of Beloyarsk NPP Power Unit 3/P.P. Govorov, I.M. Krysanterev, A.M. Tuchkov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 4 pages, 3 illustrations. – References, 1 title.

The article briefly presents the code called «BN-600 archive» which allows one to quickly and clearly obtain the information on the off-normal operation of Beloyarsk NPP power unit 3 throughout its operating period.

УДК 621.311.25: 621.039

Gidropress Development Centres Experience of Working in the Field of the Extension of the BN-600 NPP Steam Generator Lifetime and Tasks of the Development of the Steam Generators for New Fast Reactor Power Units/V.V. Denisov, M.D. Lyakisheva, V.I. Karsonov, N.B. Trunov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 8 pages, 4 illustrations.

The article presents the work of the Gidropress development centre both on the evaluation of the residual lifetime and lifetime extension of the BN-600 power unit PGN-200M steam generators. The strength of the metal structures is justified, the recommendations are given on the seismic resistance improvement. The imperfection of the standing regulatory base is noted, the measures to correct this situation are highlighted. The positive operating experience from the BN-600 steam generators as well as the results of research into condition of the SG critical components accumulated a lot of running hours enable to confidently change over to the new generation of the large steam generators, thus considerably improving the technical and economic characteristics for the perspective designs of the fast reactor power units.

УДК 621.311.25: 621.039

Analysis of the Dynamics of Hydrogen Ingress to Secondary Sodium after the Replacement of the Steam Generator Stages of the BN-600 Power Unit/Yu.V. Nosov, G.N. Tsygankov, A.I. Karpenko, A.A. Kuznetsov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 10 pages, 4 illustrations. – References, 3 titles.

The article presents the methodology of the calculation of the rate of the ingress of hydrogen into secondary sodium of the BN-600 power unit. The sources and the mechanism of the hydrogen ingress after the replacement of a lot of the PGN-200M steam generator stages within the scope of work on the power unit operation lifetime extension are defined.

УДК 621.311.25: 621.039

13. Development of the System of the Digital Recording of the BN-600 Reactor Secondary Sodium Pump Speed/M.T. Telichko, P.P. Govorov, I.S. Pomortsev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 5 pages, 4 illustrations.

The article considers a digital system of the recording of the BN-600 power unit secondary sodium pump speed which complements the standard one.

УДК 621.039.542

Verification of the Operability of the Reactor Sub-Assemblies after Operation in the BN-600 Cores. The Second Modification of the Equipment of the Hot Cell/M.V. Bakanov, A.V. Nenakhov, V.V. Chuev, I.S. Dudnichenko, O.N. Lelikov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 20 pages, 2 tables, 14 illustrations. – References, 5 titles.

The current state of the methodological support to the post irradiation verification of the operability of the reactor sub-assemblies and their components implemented in accordance with the requirements of the regulations related to the nuclear safety of the nuclear plant reactors. The methodology of the verification is based on the experience of those mass primary post irradiation examinations of the condition of the sub-assemblies after operation in the