

## АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ПОСТУПЛЕНИЯ ВОДОРОДА В НАТРИЙ ВТОРОГО КОНТУРА ПОСЛЕ ЗАМЕНЫ МОДУЛЕЙ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ ЭНЕРГОБЛОКА БН-600

**Ю.В. Носов, Г.Н. Цыганков, А.И. Бельтюков, П.П. Говоров,  
А.А. Кузнецов**  
*Белоярская АЭС, г. Заречный*



Представлена методика расчета поступления водорода в натрий второго контура энергоблока БН-600 после замены модулей парогенератора ПГН-200М. Показано, что основной источник поступления – диффузия водорода со стороны третьего контура с новых испарительных модулей, поверхности теплообмена которых еще не прошли пассивацию.

**Ключевые слова:** водород, методика расчета, парогенератор, продление срока эксплуатации, ресурс.

**Key words:** hydrogen, computational technique, steam generator, lifetime extension, lifetime.

### ВВЕДЕНИЕ

Энергоблок №3 Белоярской АЭС с реактором на быстрых нейтронах БН-600 введен в эксплуатацию 8 апреля 1980 г. 30-летний опыт работы энергоблока показал его надежность, безопасность и эффективность. Максимальный коэффициент использования установленной мощности (КИУМ), достигнутый на энергоблоке БН-600, – 83,5%, средний КИУМ (медиана) – 75,7%. Период эксплуатации энергоблока БН-600 в режиме выработки электроэнергии превысил соответствующие периоды всех когда-либо действовавших крупных реакторных установок на быстрых нейтронах (свыше 200 000 часов). За это время выработано более 100 млрд. кВт·ч электроэнергии.

Назначенный проектом 30-летний срок эксплуатации энергоблока БН-600 истек в апреле 2010 г. Успешная эксплуатация блока в течение проектного срока службы, комплекс работ, выполненных в рамках программы подготовки блока к продлению срока эксплуатации, позволили продлить расчетный срок службы энергоблока БН-600 с 30 до 40 лет – до 2020 г.

В числе работ по замене оборудования, выработавшего свой ресурс, особняком (и по объему, и по сложности) стоит замена модулей парогенераторов ПГН-200М. Весной 2007 г. заменены четыре испарительных, два основных и два промежуточных пароперегревательных модуля парогенератора пятой петли; в 2008 г. – шесть полных секций (18 модулей) парогенератора петли № 4, весной 2009 г. – 23 мо-

© Ю.В. Носов, Г.Н. Цыганков, А.И. Бельтюков, П.П. Говоров, А.А. Кузнецов, 2011

дуля парогенератора петли № 6. В апреле-мае 2010 г. заменены две секции (6 модулей) ПГ № 4, три полных секции и один основной пароперегревательный модуль петли №5. В общей сложности с 2007 по 2010 гг. выполнена замена 65-ти из 72-х модулей парогенераторов энергоблока БН600.

Подобные по масштабу и характеру работы велись только при монтаже третьего блока Белоярской АЭС в 1970-х гг., и в условиях его промышленной эксплуатации произведены впервые.

В таких условиях острее проявляются процессы, возможно, носившие не столь выраженный характер при вводе блока в эксплуатацию. В частности, при пусках блока и последующей работе на мощности после замены модулей в 2007–2009 гг. отмечено повышение концентрации водорода в натрии второго контура. Согласно действующей эксплуатационной документации, концентрация водорода во втором контуре в 0,35 ppm считается признаком межконтурной течи парогенератора, поэтому особенно важно было однозначно установить источники и механизм поступления водорода во второй контур, а также оценить возможные скорости его поступления после проведения последующих замен модулей парогенераторов. Указанной цели удалось достичь, проведя сравнительный анализ динамики поступления водорода во второй контур во время пусков и работы блока на мощности после замены модулей ПГ пятой и четвертой петель в 2007 и 2008 гг. соответственно.

### **КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ И СИСТЕМ**

Источником тепла блока №3 Белоярской АЭС служит реактор на быстрых нейтронах БН-600 тепловой мощностью 1470 МВт. «Горячий» натрий, выходящий из активной зоны и зоны воспроизводства поступает в верхнюю смесительную часть корпуса реактора и далее на вход шести (по два на петлю циркуляции) промежуточных теплообменников (ПТО), где отдает тепло натрию второго контура.

Из ПТО «горячий» натрий второго контура поступает в раздающий коллектор ПГ, затем снизу-вверх в межтрубное пространство основных и промежуточных пароперегревательных модулей, откуда по переливным трубопроводам попадает в межтрубное пространство испарительных модулей парогенератора.

После испарителей охлажденный натрий второго контура поступает в «холодный» коллектор, затем в буферный бак натрия и всасывающий коллектор главного циркуляционного насоса второго контура (ГЦН-2), откуда вновь нагнетается в ПТО соответствующей петли. Конструкция секции парогенератора ПГН-200М представлена на рис. 1.

В составе оборудования второго контура предусмотрены четыре бака запаса натрия, предназначенные для аварийного слива теплоносителя одной из петель, хранения запаса натрия для расхолаживания низов испарителей при подключении петли на работающем блоке, а также компенсации изменений объема натрия в петлях при изменении температуры.

Очистка натрия второго контура от примесей осуществляется холодными фильтрами-ловушками (ФЛ), которых имеется по две на петлю циркуляции. Натрий подается на очистку с напора и возвращается во всасывающий коллектор ГЦН-2 соответствующей петли. Принцип очистки заключается в охлаждении натрия до температуры несколько ниже температуры насыщения при имеющейся концентрации примесей в контуре и улавливании выпавших кристаллов примесей в зонах фильтрации, охлаждения и отстойника. Существующая технологическая схема позволяет подключать ФЛ одной петли на очистку натрия любой другой петли циркуляции, а также баков запаса натрия второго контура.

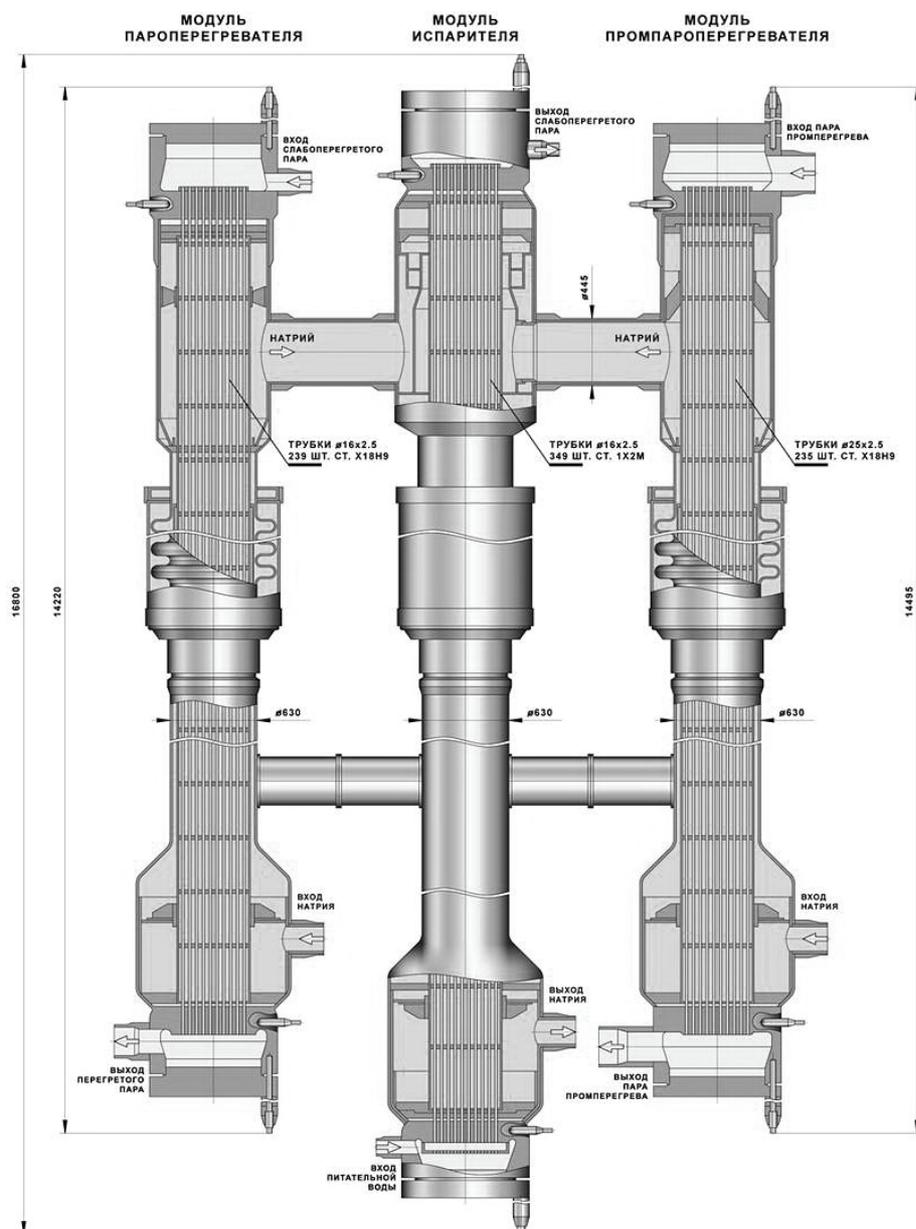


Рис. 1. Секция парогенератора ПГН-200М

Для третьего контура энергоблока БН-600 принят аммиачно-гидразинный водно-химический режим, позволяющий осуществлять подачу в питательный тракт аммиака для поддержания рН питательной воды в пределах 9,1–9,5 и ввод в конденсатный тракт гидразин-гидрата до содержания его в питательной воде 20–60 мкг/кг.

Для контроля межконтурной плотности парогенератора по изменению концентрации водорода в натрии в составе каждой петли циркуляции по второму контуру предусмотрены восемь индикаторов водорода автоматических ИВА – по одному на каждую секцию парогенератора. Датчик водорода представляет собой ни-

келевую мембрану толщиной 0,25 мм. Внешняя поверхность мембраны омывается натрием, внутренняя полость вакуумируется магнитоэлектрическим насосом. В полости насоса под действием напряжения в 4,5 кВ происходит ионизация проникающего через мембрану водорода. Образовавшиеся в результате протоны перемещаются к титановым катодным пластинам, создавая ток через электронную измерительную схему. Отбор натрия на индикаторы водорода осуществляется с выхода испарительных модулей.

### **ИСТОЧНИКИ ПОСТУПЛЕНИЯ ВОДОРОДА В НАТРИЙ ВТОРОГО КОНТУРА**

Источники поступления водорода в натрий второго контура можно разбить на две категории. Во-первых, это водородосодержащие химические соединения, имевшиеся в контуре до заполнения его натрием по окончании ремонтных работ. Сюда входят продукты взаимодействия остатков теплоносителя с воздухом, проникающим во внутренние полости оборудования при производстве работ с его вскрытием по второму контуру. Несмотря на принятие ряда эффективных мер для минимизации такого взаимодействия с учетом большого объема монтажных работ по замене модулей парогенератора количество водорода, поступившего во второй контур с атмосферной влагой, может оказаться существенным. Другим источником водорода этой категории являются загрязнения поверхностей вновь устанавливаемого оборудования, вызванные технологией его изготовления, качеством консервации, обращением перед монтажом в контур (например, отложения продуктов коррозии на поверхности новых модулей, в том числе гидратированная окись железа). Учитывая, что технология очистки внутренних поверхностей модулей парогенератора в условиях Белоярской АЭС к настоящему времени не разработана, единственным доступным способом удаления таких загрязнений признан их смыв натрием после монтажа в контур.

Ко второй категории можно отнести смежные с натриевым оборудованием водородосодержащие технологические среды. В отсутствие протечек масла через уплотнения ГЦН, межконтурных течей парогенератора и при надлежащем качестве защитного газа основным источником водорода этой категории является его диффузия со стороны третьего контура. В нормальных условиях скорость поступления водорода в натрий со стороны третьего контура составляет 5–10 г/сут, или 0,2–0,4 г/ч.

### **МЕТОДИКА РАСЧЕТА СКОРОСТИ ПОСТУПЛЕНИЯ ВОДОРОДА В НАТРИЙ ВТОРОГО КОНТУРА**

Изменение массы некоторой примеси в контуре в общем случае можно описать следующим соотношением:

$$\partial m_k = \partial m_{\text{вн}} - (\partial m_{\text{фл}} - \partial m'_{\text{фл}}),$$

где  $\partial m_k$  – изменение массы примеси в контуре;  $\partial m_{\text{фл}}$  – масса примеси, уносимая с расходом теплоносителя на систему очистки;  $\partial m'_{\text{фл}}$  – остаточная масса примеси, возвращаемая в контур после очистки на ФЛ;  $\partial m_{\text{вн}}$  – изменение массы примеси, обусловленное другими внутренними или внешними процессами.

Переходя от масс к массовым концентрациям и расходам, получим

$$M \partial C = \partial m_{\text{вн}} - (C - C') G \partial \tau,$$

$$\frac{\partial m_{\text{вн}}}{\partial \tau} = M \frac{\partial C}{\partial \tau} + (C - C') G,$$

где  $M$  – масса теплоносителя в контуре;  $C$  и  $C'$  – концентрации примеси в контуре

и теплоносителе, возвращаемом после очистки;  $G$  – расход натрия на очистку;  $\tau$  – время.

Скорость поступления водорода во второй контур  $\frac{\partial m_{\text{вн}}}{\partial \tau}$  нетрудно рассчитать, используя показания индикаторов водорода ИВА, данные по расходу натрия через ФЛ, и полагая  $C'$  равной концентрации водорода в насыщенном растворе в натрии при температуре на выходе из фильтров-ловушек.

Все перечисленные параметры регистрируются штатными измерительными приборами и хранятся в базе данных вычислительной сети Белоярской АЭС. Для расчетов использовались усредненная концентрация водорода по ИВА, расходы на общем выходе и температуры натрия на выходе подключенных к петле фильтров-ловушек.  $\frac{\partial C}{\partial \tau}$  вычислялась как разность между последовательными значениями усредненной концентрации водорода по ИВА, деленная на интервал времени между моментами регистрации соответствующих параметров в вычислительной сети.

### **АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ПОСТУПЛЕНИЯ ВОДОРОДА В НАТРИЙ ВТОРОГО КОНТУРА**

На основе изложенной выше методики получены данные по скоростям поступления водорода в натрий второго контура в предпусковой период, при пусках и при работе блока на мощности после замены модулей парогенераторов весной 2007 и 2008 гг.

При анализе поступления водорода в натрий второго контура исходили из того, что водород может поступать из двух источников:

- за счет растворения поверхностных загрязнений вновь установленных модулей, а также продуктов взаимодействия натрия с влагой воздуха, попавшего в полости ПГ по стороне второго контура при ремонтных работах;
- за счет диффузии со стороны третьего контура.

При этом в случае растворения поверхностных загрязнений скорость поступления водорода во второй контур, при прочих равных условиях, будет пропорциональна площади их контакта с натрием, а в случае коррозионного происхождения водорода – площади контакта теплообменной поверхности вновь установленных модулей с водой.

На рисунке 2 представлены графики скоростей поступления водорода в натрий второго контура пятой и четвертой петель при пуске и работе блока на мощности после замены модулей парогенераторов в пересчете на один вновь установленный испаритель. Ноль временной шкалы соответствует достижению блоком рабочих параметров. Как видим, за исключением пускового периода и примерно трех суток по завершении пусковых операций эти скорости совпадают. Следовательно, в долгосрочной перспективе поступление водорода в натрий в обоих случаях определялось коррозионными процессами со стороны третьего контура.

Однако при пуске блока скорость поступления водорода в натрий пятой петли была значительно – до трех раз – выше, чем для четвертой, что требует дополнительного анализа. В связи с этим необходимо отметить некоторые важные факты:

- в весенний ремонт 2007 г. была произведена замена двух полных секций и двух испарителей парогенератора петли № 5, весной 2008 г. заменены модули шести секций парогенератора четвертой петли;
- в обоих случаях при заполнении ПГ по второму контуру проводилось «ополаскивание» вновь установленных модулей натрием из баков запаса второго контура для смыва поверхностных загрязнений;

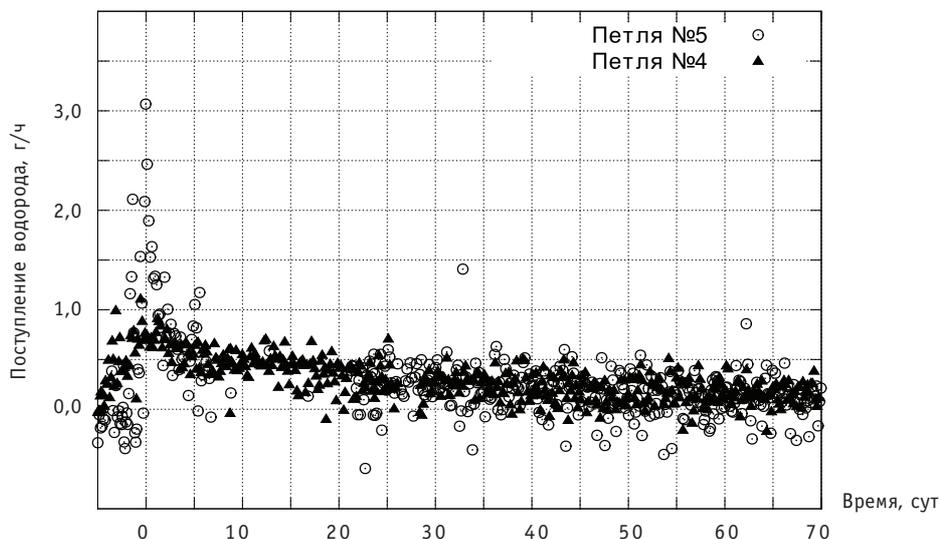


Рис. 2. Скорости поступления водорода в натрий второго контура пятой и четвертой петель после замены модулей парогенераторов в пересчете на один вновь установленный испаритель

- пневмоиспытания новых модулей парогенератора петли № 5 проводились аргонном без подъема температуры во втором контуре.
- пневмоиспытания вновь установленных модулей парогенератора четвертой петли проводились в составе контура 19.05.2008 г. с подъемом температуры натрия до 325°C;
- пуск блока весной 2007 г. проходил на двух петлях; в процессе пуска при температуре в горячей части пятой петли около 375°C обнаружена неплотность задвижки 6М-200Б, после чего примерно к 0:00 13.05.2007 г. блок был разгружен для устранения дефекта; выход на рабочие параметры состоялся около 6:00 14.05.2007 г.; общая продолжительность пусковых операций – около двух суток;
- при пуске блока весной 2008 г. делались выдержки со стабилизацией параметров для оценки темпов роста концентрации водорода во втором контуре четвертой петли; выход на рабочие параметры состоялся 28.05.2008 г.; в общей сложности на пусковые операции ушло больше трех суток;
- в 2007 и 2008 гг. поступление водорода во второй контур пятой и четвертой петель в предпусковой период в целом отсутствовало вплоть до их заполнения по третьему контуру – в том числе при повышении температуры натрия во время пневмоиспытаний четвертой петли. В то же время при заполненных по третьему контуру парогенераторах уже сравнительно небольшой подъем параметров приводит к тому, что скорость поступления водорода во второй контур приобретает в среднем положительные значения.

Последнее можно объяснить лишь в том случае, если источником поступления водорода в натрий при пусках после замены модулей была исключительно его диффузия со стороны третьего контура.

Рассмотрим подробнее, как менялась скорость поступления водорода в натрий четвертой, пятой и шестой петель при пусках блока весной 2007 и 2008 гг. На петле № 6 в весенний ремонт 2007 г. была проведена химпромывка, и диффузионное происхождение поступающего во второй контур водорода не вызывает сомнений.

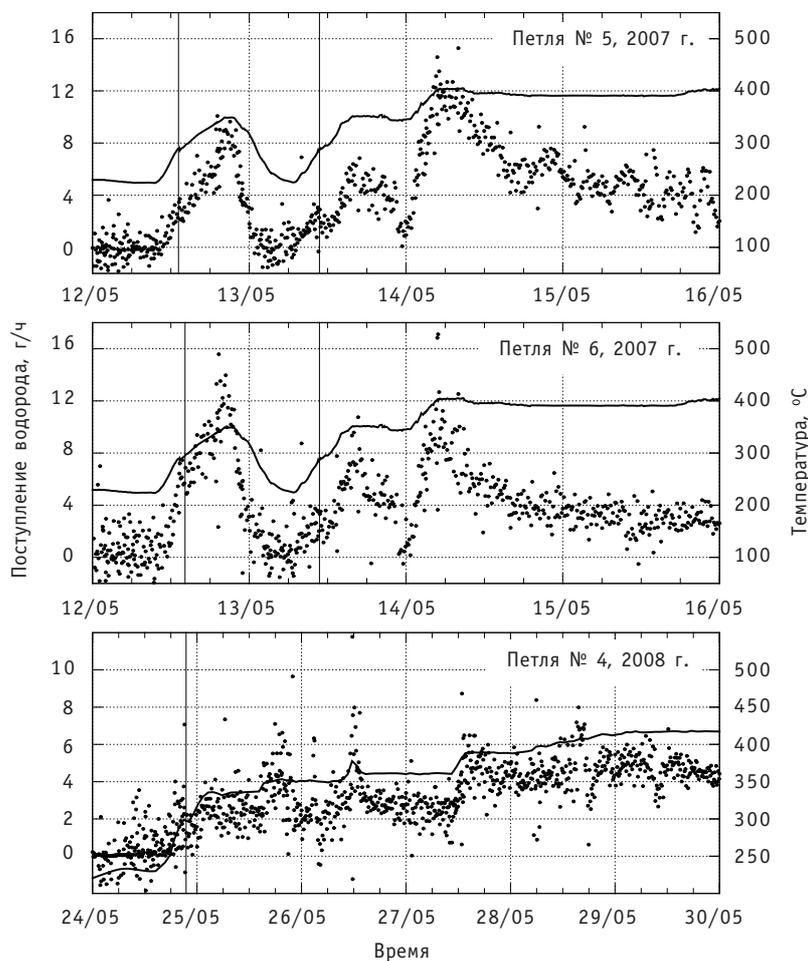


Рис. 3. Скорость поступления водорода в натрий второго контура петель №4, 5, 6: ● – скорость поступления водорода; — – средняя температура натрия в парогенераторе; сплошными вертикальными линиями отмечены моменты перевода парогенераторов в паровой режим

Соответствующие графики приведены на рис.3. Сплошными вертикальными линиями помечены моменты перевода парогенераторов в паровой режим. Как уже говорилось, в случае коррозионного происхождения поступающего во второй контур водорода скорость его поступления должна быть пропорциональна площади контакта теплообменной поверхности испарителей с водой. Следовательно, при переводе парогенератора в паровой режим поступление водорода во второй контур должно снижаться с уменьшением этой площади.

Как видно из графиков на рис. 3, снижение скорости поступления водорода имело место во всех случаях. Однако при первом переводе на пар парогенераторов пятой и шестой петель, примерно в 14:00 12.05.07, относительное снижение скорости поступления водорода ниже, чем при повторном, около 11:00 13.05.07, что указывает на существование в третьем контуре существенного источника водорода помимо коррозии и сравнительно малый вклад коррозии в суммарный поток водорода со стороны третьего контура.

В условиях принятого на блоке водно-химического режима таким источником водорода в третьем контуре может быть гидразин. Известно, что в парогенераторе излишки этого вещества, не израсходованные на связывание кислорода и восстановление железа, могут разлагаться с выделением водорода.

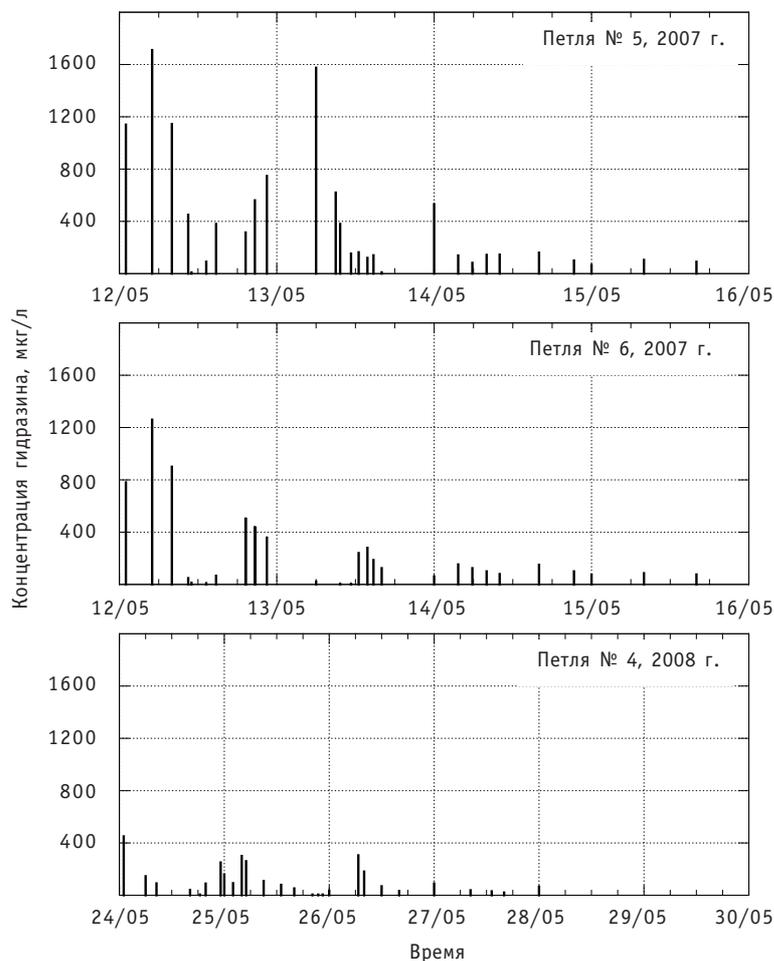


Рис. 4. Концентрация гидразина в питательной воде парогенераторов по данным химанализа

Характер изменения концентрации гидразина в питательной воде парогенераторов в анализируемые периоды представлен на графиках рис. 4. Как видим, значительные различия в динамике поступления водорода в натрий четвертой, пятой и шестой петлей при пусках блока после замены модулей парогенераторов могли быть вызваны значительно более высокой концентрацией гидразина в питательной воде в случае петель № 5 и 6.

По результатам проделанного анализа были сделаны следующие выводы.

- Причиной повышенного поступления водорода в натрий второго контура после замены модулей парогенераторов пятой и четвертой петлей блока № 3 Белоярской АЭС явилась его диффузия со стороны третьего контура.

- Водород имел, в основном, коррозионное происхождение. Исключение составил период от начала пуска блока до двух-трех суток с момента достижения рабочих параметров в случае пятой петли, когда дополнительным источником водорода могли быть излишки гидразина в питательной воде.

- При последующих заменах модулей ПГ ожидаемая скорость поступления только коррозионного водорода в натрий второго контура в начальный период после достижения блоком рабочих параметров составит около 0,8 г/ч на вновь установленный испаритель.

С учетом полученных результатов откорректированы требования эксплуатационной документации в части ведения водно-химического режима блока после замены модулей парогенераторов и проведения химпромывок с целью снижения концентрации гидразина в питательной воде.

Перед пуском блока после замены 23-х модулей ПГ № 6 в мае 2009 г. была выполнена прогнозная оценка скорости поступления водорода во второй контур шестой петли после вывода блока на номинальную мощность. Ее величина составила 6,5 г/ч. При этом фактическая скорость поступления водорода во второй контур ПГ № 6 по достижении блоком номинальных параметров составила  $\approx 7$  г/ч.

В весенний ремонт 2010 г. заменены две секции (шесть модулей) ПГ № 4, три испарительных и один основной пароперегревательный модуль петли № 5. Скорость поступления водорода во второй контур по достижении блоком номинальных параметров прогнозируется на уровне 1,7 г/ч для четвертой петли и 2,5 г/ч для петли № 5. При этом при расходе натрия на очистку в 8 м<sup>3</sup>/ч и температуре натрия на выходе из ФЛ 130°C концентрация водорода в натрии четвертой петли может достигнуть 0,3 ррт, пятой петли – 0,4 ррт.

Для сравнения, скорость поступления водорода во второй контур в случае течи воды в натрий величиной 0,1 г/с составит 40 г/ч, что значительно выше скоростей поступления коррозионного водорода, и позволяет по существенному превышению фактической скорости поступления водорода над прогнозной судить о наличии межконтурной неплотности парогенератора.

### **Литература**

1. Арчаков Ю.И. Водородная коррозия стали. – М.: Металлургия, 1985. – С. 8-54.
2. Ермолаев Н.П., Смыков В.Б. и др. Закономерности поведения коррозионного водорода в парогенераторах типа «натрий-вода»/Опыт эксплуатации Белоярской АЭС. Часть 3. – Свердловск: УрО АН СССР, 1988.
3. Химическая технология теплоносителей атомных энергетических установок. – М.: Атомэнергоиздат, 1985.

Поступила в редакцию 14.10.2010

**УДК 621.039.546.54**

*Analysis of the Dynamics of Hydrogen Ingress into Secondary Sodium after Replacement of the BN-600 Power Unit Steam Generator Stages* \ Yu.V. Nosov, G.N. Tsygankov, A.I. Beltyukov, P.P. Govorov, A.A. Kuznetsov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 9 pages, 4 illustrations. – References, 3 titles.

The technique of calculation of hydrogen ingress into the secondary circuit of the BN-600 power unit after replacement of the PGN200M steam generator stages is presented. The hydrogen diffusion from the water-steam circuit from the new evaporator stages of which the heat exchange surfaces have not been subjected to the passivation yet is shown to be the main source of ingress.

**УДК 621.039.54**

*Operating Experience from Europium Absorbers in the BN-600 Reactor and Perspectives of Their Further Utilization in the Innovation Nuclear Reactors* \ V.D. Risovany, A.V. Zakharov, E.P. Klochkov, V.V. Maltsev, A.I. Karpenko, V.I. Ogleznev, A.M. Tuchkov, I.A. Chernov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 5 pages, 2 tables, 2 illustrations.

An extensive operating experience from the europium control rods has been accumulated. Research into materials has shown that the BN-600 reactor europium rods have high lifetime characteristics. A set of the studies on utilization of europium radionuclides in the gamma-emitting sources has been conducted. The most promising line is a utilization of double-purpose designs of the control rods with an absorbing kernel in the form of the inserts of the active part of the standard gamma-emitting sources.

**УДК 621.039.54**

*Genetic Algorithm for the Localization of Defective Fuel Assemblies in the BN-600 Reactor Core* \ A.O. Skomorokhov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 8 pages, 2 tables, 3 illustrations. – References, 10 titles.

The article considers the problem of determining the location of the fuel assemblies with leaky fuel rods in the reactor BN-600. The problem is solved by the method of neutron flux tilting at the operating reactor. Perturbations of the neutron field in the motion of control rods can be approximated by using a radial-basis neural network. A genetic algorithm for the localization of defective fuel assemblies is proposed.

**УДК 621.039.56**

*Additional Method of Determination of the Predictive Position of the Shim Rods of the Beloyarsk NPP* \ V.A. Zhyoltyshev, A.A. Lyzhin, V.A. Shamansky; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 7 pages, 3 tables, 1 illustration. – References, 9 titles.

BN-600 reactor in the critical condition The additional method of determination of the predictive position of the KS1-18 control rods in the critical condition after refuelling is justified. Together with the existing method the above-mentioned method makes it possible to reliably determine the KS1-18 control rod position in the critical condition and improve safety and effectiveness of the BN-600 reactor operation.

**УДК 621.039.56**

*Experimental and Computational Justification of the Reactivity Balance and Power Distribution in the BN-600 Core* \ V.A. Zhyoltyshev, V.V. Maltsev, V.F. Roslyakov, A. V. Moiseev, M.Yu. Semyonov, Yu.S. Khomyakov, A.A. Belov, E.F. Seleznyov, B.A. Vasilev, M.R. Farakshin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 15 pages, 4 tables, 12 illustrations. – References, 13 titles.

For the 30-year history of the BN-600 reactor operation a set of the computational and experimental measures on the monitoring of the reactor core neutron-physical characteristics has been perfected. In this paper the results achieved by means of the reactivity and spectrum measurements and their computational analysis by all the available domestic software packages are presented.