

ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАСХОЛАЖИВАНИЯ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ ТИПА БН

Е.Ю. Анишев*, В.С. Горбунов*, С.М. Дмитриев, С.Л. Осипов***

* Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африканова,
г. Н. Новгород

** Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
г. Н.Новгород



Рассмотрены режимы расхолаживания реакторной установки и условия
развития естественной циркуляции теплоносителя.

Ключевые слова: режим, расхолаживание, реактор, естественная циркуляция.

Key words: modes, cooling, reactor, natural circulation.

Установки с быстрыми реакторами отличаются высоким уровнем энергонапряженности активной зоны. Основными характеристиками в аварийных ситуациях являются уровень температур теплоносителя и твэлов в активной зоне реактора и температура корпуса реактора. Нормальная температура теплоносителя на входе и выходе активной зоны составляет 350 и 550°C соответственно. Нормальная температура корпуса реактора равна 450°C. При нарушениях режима циркуляции теплоносителя может происходить быстрый рост температуры натрия и твэлов, вызывая при этом опасность термоциклического нагружения элементов оборудования с глубокими (до ~250°C) и быстрыми (до нескольких десятков градусов в секунду) изменениями температур теплоносителя. Максимальная температура теплоносителя может достигать ~600°C [1]. Это предъявляет повышенные требования к системе аварийной защиты реактора и к надежности отвода остаточного тепловыделения от активной зоны в режимах расхолаживания активной зоны реактора. Предусмотрена уставка срабатывания быстрой аварийной защиты при повышении температуры натрия на выходе из реактора по двум из трех каналов измерения температуры. Важным аспектом безопасной эксплуатации реакторной установки (РУ) является необходимость согласования расходов теплоносителя первого и второго контуров в соответствии с изменением мощности в активной зоне.

В режимах нормальной эксплуатации для расхолаживания активной зоны РУ используется принудительная циркуляция теплоносителей с помощью основного оборудования контуров с главными циркуляционными насосами первого и второго контуров (ГЦН-1, ГЦН-2). Тепло отводится в третий паро-водяной контур. В случае невозможности работы основного оборудования для аварийного отвода тепла от активной зоны предусмотрены специальные петли с теплообменниками, насосами и автономным электропитанием. На рисунке 1 приведена принципиаль-

© Е.Ю. Анишев, В.С. Горбунов, С.М. Дмитриев, С.Л. Осипов, 2011

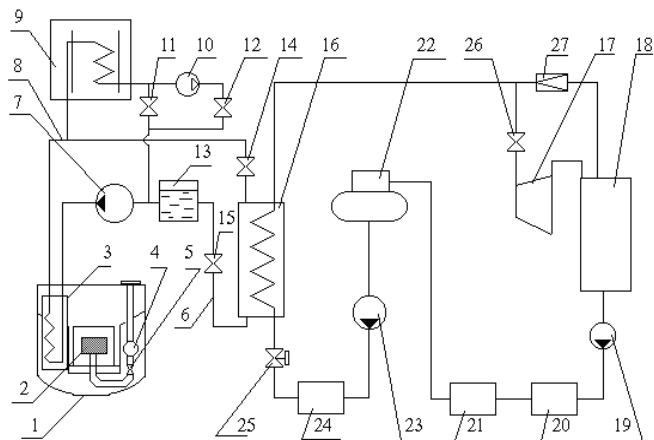


Рис. 1. Принципиальная схема РУ БН-800: 1 – корпус реактора; 2 – активная зона; 3 – промежуточные теплообменники; 4, 7 – насосы первого и второго контуров; 5 – обратный клапан; 6, 8 – трубопроводы; 9 – воздушный теплообменник; 10 – электромагнитный насос; 11, 12, 14, 15 – задвижки; 13 – буферная емкость; 16 – парогенератор; 17 – турбогенератор; 18 – конденсатор; 19 – конденсатный насос; 20, 21 – подогреватели низкого давления; 22 – деаэратор; 23 – питательный насос; 24 – подогреватель высокого давления; 25 – питательный клапан; 26 – паровая задвижка; 27 – редукционно-охлаждающее устройство

ная схема РУ БН-800, включающая в себя встроенную во второй контур систему расхолаживания с воздушными теплообменниками.

При потере принудительной циркуляции теплоносителей одним из методов поддержания циркуляции теплоносителя по первому и второму контурам является естественная конвекция, не требующая подвода энергии извне. Устойчивое развитие естественной циркуляции (ЕЦ) теплоносителя и ее величина характеризуют свойство повышенной безопасности установки пассивным способом отводить остаточное тепловыделение в запроектном режиме «полное обесточивание» и прекращение расхода питательной воды» за счет теплоемкости натрия и металлоконструкций первого и второго контуров и теплопотерь в окружающую среду от корпуса реактора и трубопроводов.

Однако малый уровень ЕЦ теплоносителя (например, в установке БН-600 ~2% от номинала [2]), по сравнению с остаточными тепловыделениями в реакторе, а также возможность появления отрицательного напора ЕЦ при сбросе мощности, требуют создания специальных условий проведения аварийной остановки реактора. Допустимые температуры в активной зоне необходимо сохранить как до момента полной остановки насосов, так и затем, при отводе тепла только с помощью ЕЦ.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Математические модели теплогидравлики, включая активную зону, главные и вспомогательные контуры с парогенератором, промежуточными и вспомогательными теплообменниками, рассмотрены в [2, 3]. Они применялись для исследования динамики рабочих режимов блока как с принудительной, так и с естественной циркуляцией. Выполненный по этим методикам расчетный анализ РУ БН-600 показал, что в случае полного отсутствия какого-либо вмешательства персонала максимальное значение температуры натрия на выходе из активной зоны в выше-названном режиме с использованием ЕЦ теплоносителя и со срабатыванием быстрой аварийной защиты не достигнет температуры кипения натрия. Рост темпера-

туры теплоносителя на входе в промежуточные теплообменники вызывает соответствующий нагрев корпуса реактора. Максимальная температура корпуса в этих условиях не превысит предельно допустимого значения.

ВЛИЯНИЕ ИНЕРЦИОННОСТИ ГЦН

Возможность возникновения событий с прекращением электропитания собственных нужд или подачи питательной воды в парогенераторы оказывает влияние на выбор конструкций циркуляторов, схемы расхолаживания и компоновки оборудования с точки зрения развития и последующего использования ЕЦ в контурах.

При проектировании установок одной из задач является выбор необходимых инерционных свойств средств для циркуляции теплоносителя. Несмотря на уже имеющиеся, как правило, значительные маховые массы насоса, его приводного электродвигателя, собственными моментами инерции этих элементов не ограничиваются и для увеличения длительности механического выбега добавляют массивные маховики.

В процессе эксплуатации при различных аварийных режимах нежелательны резкие изменения расхода теплоносителей с точки зрения ограничения термических нагрузок в металлоконструкциях. Например, в режиме перерыва питания при работе реактора на мощности с целью снижения отклонения температуры твэлов целесообразно иметь максимальную инерционность электронасосов во время их выбега. После восстановления электропитания насоса и его разгона эта инерционность затягивает время провала частоты вращения от исходной и уменьшает общее отклонение температуры ТВС.

При полной потере системного и аварийного электроснабжения (обесточивание) срабатывает аварийная защита, мощность быстро снижается до уровня остаточных тепловыделений. Отвод тепла осуществляется циркуляцией за счет естественного механического выбега частоты вращения насосов, в дальнейшем, после остановки насосов, за счет развития ЕЦ.

С одной стороны, увеличение инерционности вращающихся частей ГЦН-1, ГЦН-2 продлевает длительность принудительной циркуляции (ПЦ) теплоносителей главных контуров. С другой стороны, для создания благоприятных условий развития ЕЦ целесообразно максимально длительно сохранять номинальную температуру теплоносителя, выходящего из АЗ, что может быть достигнуто таким же быстрым изменением расхода теплоносителя первого контура, как темп изменения мощности реактора.

Отмеченное противоречие можно решить системой регулирования частоты вращения ГЦН-1, ГЦН-2, позволяющей изменять темпы выбега насосов главных контуров. Имеющийся опыт эксплуатации установки с быстрым реактором БОР-60 [4] показал возможность применения такого способа. В установках типа БН основным пока остается использование такого механического выбега насосов и соответствующего изменения расходов вплоть до уровня остаточных тепловыделений, чтобы расхолаживать реактор без недопустимых превышений температуры теплоносителя на выходе из активной зоны (оптимальный вариант без превышения номинального значения $T_{\text{вых}}^{\text{аз}}$).

В режиме перехода на ЕЦ критическим является момент окончания выбега насосов первого контура. Именно в этот момент расход ЕЦ теплоносителя через реактор имеет выраженный минимум. Последующий максимум температуры теплоносителя на выходе из активной зоны имеет ту часть теплоносителя, которая вошла в активную зону и находилась в ней наибольшее время к моменту достижения

ния минимума расхода. Причем абсолютные значения $T_{\text{вых}}^{\text{аз}}$ и ее максимума определяются отношением мощности, выделяемой в активной зоне реактора, к расходу теплоносителя в течение всего переходного процесса на ЕЦ. Этот рост температуры приводит к прогреву теплоносителя в верхней камере и, соответственно, к росту напора и расхода ЕЦ. В определенный момент времени наступает превышение расхода ЕЦ над тепловыделением, что сопровождается (с учетом тепловой инерционности твэлов) интенсивным снижением $T_{\text{вых}}^{\text{аз}}$ после достижения максимума. Расход ЕЦ стабилизируется.

Для обеспечения требуемого напора ЕЦ в первом контуре важно сохранить близкой к номинальной температуре теплоносителя в верхней камере смешения реактора. Существенным для развития ЕЦ в первом контуре является и распределение температуры теплоносителя в промежуточных теплообменниках (ПТО), которые в замкнутом контуре ЕЦ выполняют роль опускного участка. Степень захолаживания ПТО по первому контуру прежде всего определяется отношением расходов теплоносителей второго и первого контуров (G_2/G_1) в петле. На рисунке 2 приведена зависимость максимума температуры теплоносителя на выходе из АЗ (в момент перехода на ЕЦ) от конечного расхода $G_2^{\text{кон}}$ теплоносителя во втором контуре. На рисунке 3 приведена зависимость максимума температуры теплоносителя на выходе из АЗ (в момент перехода на ЕЦ) от исходного отношения расходов $\frac{G_2^{\text{исх}}}{G_1^{\text{исх}}}$

теплоносителей второго и первого контуров в петле. Видно, что чем больше $G_2^{\text{кон}}$ и $G_2^{\text{исх}}$, по сравнению с расходом в первом контуре, тем меньше $T_{\text{вых}}^{\text{аз max}}$.

На рисунке 4 (график 1) показана зависимость $T_{\text{вых}}^{\text{аз}}$ от длительности выбега при одинаковых «постоянных времени выбега» $\tau_{\text{выб}}$ (время, за которое обороты ГЦН1 и ГЦН2 уменьшаются в два раза). При этом длительность выбега ГЦН 2 принята такой же, как в первом контуре (одинаковые выбеги). На рисунке 4 (график 2) выбег насоса второго контура с увеличением своей длительности сохраняет постоянное превышение над кривой выбега насоса первого контура и составляет

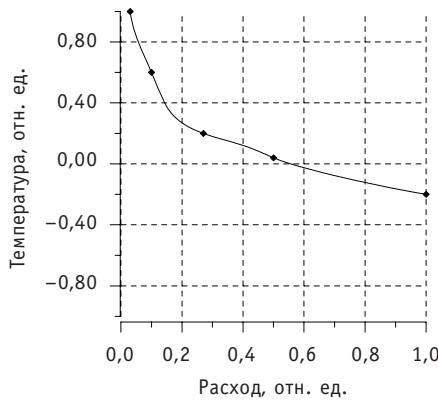


Рис. 2. Зависимость отклонения $T_{\text{вых}}^{\text{аз max}}$ (в момент перехода на ЕЦ) от конечного расхода $G_2^{\text{кон}}$ теплоносителя во втором контуре:
◆ – зависимость отклонения температуры теплоносителя на выходе из активной зоны от конечного расхода теплоносителя во втором контуре

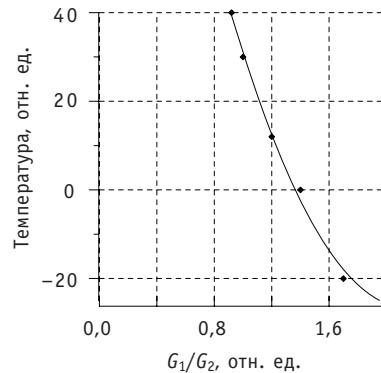


Рис. 3. Зависимость отклонения $T_{\text{вых}}^{\text{аз max}}$ (в момент перехода на ЕЦ) от исходного отношения $\frac{G_2^{\text{исх}}}{G_1^{\text{исх}}}$ теплоносителей второго и первого контуров:
◆ – изменение отклонения температуры теплоносителя на выходе из активной зоны от отношения расхода второго контура к расходу первого контура

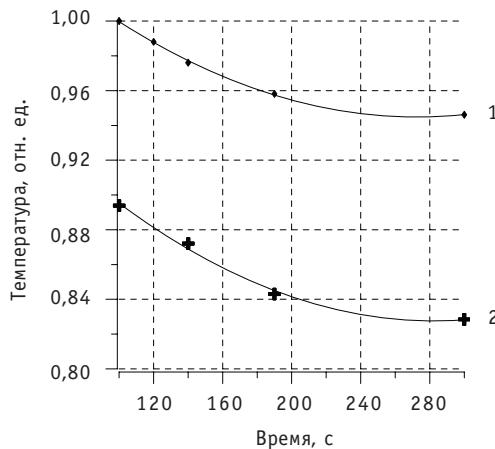


Рис. 4. Зависимости $T_{\text{вых}}^{\text{аз max}}$ от длительности выбега ГЦН первого контура

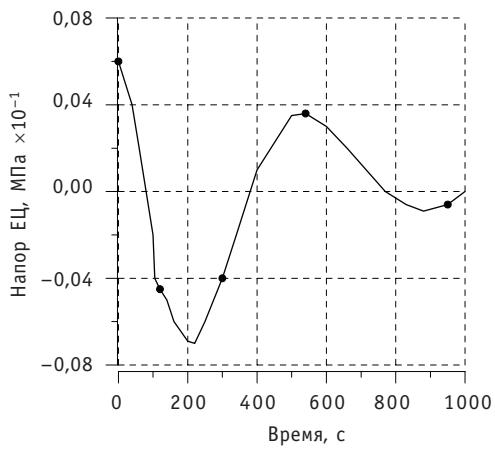


Рис. 5. Изменение напора ЕЦ во втором контуре в режиме «прекращение расхода питательной воды в парогенераторы» при принудительной циркуляции теплоносителя

~ 300 секунд. Такие естественные механические выбеги обеспечивают переход на ЕЦ по первому контуру без существенного превышения значений температур в АЗ.

О ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ИСПЛЬЗОВАНИЯ ВЫБЕГА ТУРБОГЕНЕРАТОРА

В установках типа БН по сигналу «потеря системного и аварийного электроснабжения» срабатывает аварийная защита и обычно происходит совместный выбег турбогенераторов (ТГ) с ГЦН и насосами, подающими питательную воду в парогенераторы. При безотказной работе схемы расхолаживания запускаются дизель-генераторы (ДГ) за время, меньшее времени выбега ТГ, и происходит подключение нагрузки собственных нужд к секциям надежного питания от этих ДГ. В противном случае прекращается подача питательной воды в парогенераторы, а по окончании выбега ТГ отвод тепла от реактора осуществляется при ЕЦ теплоносителей в первом и втором контурах. При этом отвод остаточных тепловыделений происходит с помощью воздушных теплообменников. Влияние длительности выбега ТГ на условия перехода на ЕЦ во втором контуре показано на рис. 5. Здесь рассмотрен режим «прекращение расхода воды в парогенераторы». Парогенераторы отключаются через 150 с, и расхолаживание осуществляется только через ВТО с принудительной циркуляцией в контурах за счет работы насосов на пониженных частотах вращения. Из графика следует, что напор ЕЦ в этом случае имеет отрицательные значения в промежутке времени от 1.5 до 6.5 мин. Возможное в это время отключение ГЦН может сопровождаться «копрокидыванием» циркуляции теплоносителя во втором контуре. На основании этого графика можно прогнозировать, в какой момент времени возможно отключение ГЦН второго контура. Из этого также следует, что при «обесточивании» целесообразно использовать только механический выбег насосов второго контура и без временной задержки, т.е. в случае последующего обесточивания использование выбега ТГ для целей электроснабжения ГЦН нецелесообразно. Отключение ГЦН должно происходить одновременно с исходным событием.

О ВОЗМОЖНОСТИ ДИНАМИЧЕСКОГО УВЕЛИЧЕНИЯ РАСХОДА ЕЦ В РЕЖИМЕ «ОБЕСТОЧИВАНИЕ»

Для исключения недопустимого перегрева активной зоны при ЕЦ существует два очевидных пути.

Первый путь состоит, как было отмечено выше, в создании насосов с максимальной инерционностью. Причем, постоянная времени и продолжительность выбега ГЧН2 должны быть больше, чем у ГЧН1.

Второй путь состоит в создании благоприятных условий развития ЕЦ требуемой величины. Сущность этого способа состоит в достижении высокого уровня расхода ЕЦ в первом контуре. Это должно произойти в момент перехода с ПЦ на ЕЦ за счет захолаживания теплоносителя в ПТО (опускных участках первого контура) более высоким расходом второго контура до температуры теплоносителя второго контура, а также за счет доставки более холодного теплоносителя из верхней камеры активной зоны в ПТО после срабатывания аварийной защиты с использованием системы регулирования расходов теплоносителей главных контуров [5].

ВЫВОДЫ

Вопрос целесообразности оптимизации маховых масс ГЧН должен решаться на основании комплексного анализа: с учетом проблем конструирования ГЧН, с одной стороны, а с другой стороны, в режимах перехода на ЕЦ с учетом влияния роста температуры на работоспособность оборудования активной зоны.

Использование теплового выбега ТГ не является практически важным, поскольку критичности изменений основных параметров в этот промежуток времени нет.

Литература

1. Технические проблемы реакторов на быстрых нейтронах/*Под ред. Ю.Е.Багдасарова.* – М. Атомиздат, 1969.
2. Митенков Ф.М., Багдасаров Ю.Е., Букша Ю.К., Востоков В.С., Горбунов В.С. и др. Инженерные методы анализа режимов с естественной циркуляцией в установках типа БН// Атомная энергия. – 1987. – Т. 62. – Вып. 3.
3. Анишев Е.Ю., Горбунов В.С. Моделирование переходных процессов в контурах атомной электростанции с реактором типа БН с участием регулируемых электроприводов главных циркуляционных насосов// Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2010. – №3. – С. 90-99.
4. Казачковский О.Д., Антипин Г.К., Афанасьев В.А. и др. Аварийное расхолаживание установки БОР-60// Атомная энергия. – 1973. – Т. 34. – Вып. 5. – С.341-344.
5. Востоков В.С., Горбунов В.С., Заец Н.П., Тихоновский В.В., Анишев Е.Ю. Способ аварийного расхолаживания многопетлевой установки с ядерным реактором и ядерная энергетическая установка. А.с. № 1816146, Б.И. № 22, 1996.

Поступила в редакцию 8.08.2011

gas processing, chemical industry, transport, nuclear power engineering, defense industry) is to detect leaks of combustible gases in the early stages. The system allowing one to detect small concentrations of combustible gases in air is capable of detecting an accident situation at an early stage. In the event of timely taken actions, such diagnostics can help prevent the accident situation or confine it in the early stages of its development.

Currently the systems based on capsular solid-electrolyte sensors are under development in the SSC RF-IPPE, which are capable of meeting these requirements.

The sensors monitor the oxygen content in gas including combustible impurities as well and provide the opportunity to make early detection of small concentrations of such impurities.

УДК 621.039.7

SHS-Immobilization of High-Level Waste of An-Tc Fraction into Ceramic-Metal Matrix Materials | E.E. Konovalov, T.O. Mishevets, S.V. Yudintsev, B.S. Nikonov, Yu.D. Boltov, S.S. Shulepov; Editorial board of journal «*Izvestia vishikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika*» (*Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering*) – Obninsk, 2011. – 6 pages, 2 tables, 4 illustrations. – References, 8 titles.

The study has been performed into metallothemic processes of ceramic-metal (cermets) matrices synthesis for immobilization of Nd, Sm and Re simulating actinides (An) and ^{99}Tc of high-level waste (HLW) produced in the mode of self-propagating high-temperature synthesis. These matrices include mineral-like formations having the structure of garnet and pyrochlore fixing neodium and samarium and alloys fixing rhenium. They are designed for long-term isolation of HLW from the environment.

УДК 621.039.7

Immobilization of Uranium Wastes into Glass-Crystal Matrix Using the Self-Propagating High Temperature Synthesis | E.E. Konovalov, T.O. Mishevets, S.V. Yudintsev, B.S. Nikonov, Yu.D. Boltov; Editorial board of journal «*Izvestia vishikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika*» (*Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering*) – Obninsk, 2011. – 5 pages, 1 table, 3 illustrations. – References, 5 titles.

The study has been performed into the immobilization of uranium waste into glass-crystal matrix material using the self-propagating high-temperature synthesis (SHS). Waste reprocessing involved the use of sorbent based on heat-treated silica gel enriched with uranium from liquid waste. The structure of synthesized matrix materials has been investigated by X-ray fluorescence analysis and scanning electron microscopy.

УДК 631.438: 621.41

The Influence of Physico-Chemical Properties of Soils on the Bioavailability of ^{60}Co | I.V. Kochetkov, V.S. Anisimov, I.A. Krikunov, M.V. Eremin; Editorial board of journal «*Izvestia vishikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika*» (*Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering*) – Obninsk, 2011. – 8 pages, 3 tables. – References, 6 titles.

The role of physico-chemical parameters of soils in the accumulation of ^{60}Co by plants (barley) was defined. A method for scoring the buffering capacity of soils as for ^{60}Co contamination was proposed. It's based on dependence between the main physico-chemical soil properties and accumulation of the radionuclide in plants (barley). Soils are ranked according to the buffering capacity with respect to ^{60}Co .

УДК 621.039.586

Studies of Shutdown BN Reactor Cooling-Down Modes | E.Yu. Anishev, V.S. Gorbunov, S.M. Dmitriev, S.L. Osipov; Editorial board of journal «*Izvestia vishikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika*» (*Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering*) – Obninsk, 2011. – 6 pages, 5 illustrations. – References, 5 titles. Emergency cooling modes of shutdown reactor and conditions for coolant natural circulation development are considered.

УДК 621.039.58

Experimental Investigations of Heat Transfer for the Case with Steam Condensing from the Steam-Air Mixture on the Heat-Exchange Surface of the Containment Emergency Pressure Reduction System | A.M. Bakhmetev, M.A. Bolshukhin, A.M. Hizbulin, M.A. Kamnev; Editorial board of journal «*Izvestia vishikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika*» (*Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering*) – Obninsk, 2011. – 8 pages, 1 table. – References, 13 titles.

Presented are experimental investigation results for heat transfer for a case with steam condensing from a steam-air mixture on an S-shaped heat-exchange surface of the containment emergency pressure reduction system. The investigations were conducted in the air mass concentration range of 0.270.7