

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ХРАНЕНИЯ И ТРАНСПОРТИРОВКИ ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННОГО РАСТВОРА БОРА ДЛЯ ВВЭР, АЛГОРИТМ РАБОТЫ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

А. П. Швец¹, В. П. Кравченко²

¹ ГП «НАЭК «Энергоатом» ОП «Хмельницкая АЭС»

² Одесский национальный политехнический университет

Исследовалась возможность введения в состав технологического оборудования энергоблока АЭС, типа В-320, дополнительной подсистемы запаса концентрата раствора бора. Способность этой подсистемы для внесения положительного результата в управление и безопасную эксплуатацию энергоблоков и создание дополнительного физического и оперативного запаса поглотителя, а также, повышения показателя безопасности. Также исследовались возможные параметры и режимы эксплуатации предлагаемой подсистемы, ее вклад на обеспечение безопасности энергоблока при эксплуатации с системами безопасности и системами нормальной эксплуатации.

Введение

При эксплуатации атомных энергоблоков, особое место отведено обеспечению безопасной работы реакторной установки, а также, показателям обеспечения ядерной и радиационной безопасности. Для обеспечения которых служат физические барьеры глубокоэшелонированной защиты, целостность которых обеспечивается путем жесткого выполнения руководств нормативной и эксплуатационной документации, а также безотказной работой систем безопасности.

На энергоблоках проекта В-320, немаловажным есть качество и количество запаса жидкого поглотителя. При данном аспекте в обеспечении безопасности, должны быть гарантированы регламентируемые нормы по количеству неснижаемого запаса раствора борной кислоты, отвечающего требованиям качества и концентрации. Теоретически, с вероятностью возникновения аварийных ситуаций и при проявлении исходных событий, требующих немедленного введения отрицательной реактивности, накладывающих отказы оборудования или ремонт оборудования, наличие запасов жидких поглотителей может быть обеспечено частично или растянуто во времени. Используя консервативный подход анализа, расчетными методами можно обосновать актуальность наличия дополнительных обеспечивающих систем безопасности. Которые могли бы обеспечить, полностью или

частично, раствором борной кислоты работу защитных систем безопасности или систем важных для безопасности.

Постановка цели и задач научного исследования

Целью исследования является анализ возможности введения в состав технологических систем атомного энергоблока дополнительных обеспечивающих систем безопасности, которые могли бы резервировать подачу раствора борной кислоты к защитным системам безопасности и систем нормальной эксплуатации. Анализ работы таких систем и анализ их эффективности. Возможность взаимодействия с другими технологическими системами подачи концентрата раствора бора. Создание алгоритма работы оборудования системы.

Анализ проекта, состав, конструкция и назначение дополнительной системы хранения и подачи высококонцентрированного раствора бора

Возможностью для разработки данной подсистемы послужило исключение из технологического процесса аварийных баков системы технической воды группы «А» ответственных потребителей. Согласно техническим решениям, на атомных электростанциях происходит опытная и опытно-промышленная эксплуатация данной системы без указанных баков. На данный момент, предварительные результаты опытной эксплуатации показывают, что баки запаса технической воды ответственных потребителей будут полностью исключены из технологического процесса. Что повлечет за собой появление незадействованных производственных площадей, позволяя разместить новое или дополнительное оборудование систем безопасности или систем обеспечения.

Любое предлагаемое для размещения концептуальное оборудование, должно следовать принципам повышения безопасной эксплуатации АЭС. Одним из таких принципов есть наличие на объекте необходимого количества средств и материалов для управления цепной реакцией деления и отвода тепловой энергии. Которому следует представленная подсистема.

В связи с тем, что системы обращения с жидкими поглотителями на АЭС имеют определенное количество радиоактивных веществ и ионизирующих материалов в своем составе, размещаться они должны в помещениях зоны строго режима. Для размещения предлагаемой подсистемы, подходят помещения третьего канала системы технической воды ответственных потребителей. Что, также, дает возможность эффективного подключения к потребителям, размещенным в том же крыле главного корпуса энергоблока.

Для монтажа предлагаемой системы необходим демонтаж незадействованных элементов системы технической воды ответственных потребителей, а вместо их установка

оборудования и трубопроводов дополнительной подсистемы хранения и подачи высококонцентрированного раствора бора.

Оборудование системы проектируется в геометрической схожести пропорций оборудования системы технического водоснабжения ответственных потребителей. Данный критерий проектирования взят из основы конструкций помещения установки оборудования. Также, в состав системы вводится активная часть – насосный агрегат. Основным материалом изготовления оборудования и трубопроводов – нержавеющие стали (по примеру основных трубопроводов борсодержащих сред – 08X18H10T). Что связано с требованиями по эксплуатации оборудования и трубопроводов с содержанием агрессивных сред. Техническими характеристиками оборудования системы приняты:

- Бак, объем 90/85 м³ (полный/полезный), высота 581 см, ширина 581 см;
- Насос, подача 50 м³/ч, напор 5 кгс/см²;
- Трубопроводы подсистемы (Рис. 1) условным диаметром Ду Ø, мм:
 - 1 – 200, 2 – 50, 3 – 100, 4 – 30, 5 – 100, 6 – 100, 7 – 100, 8 – 400, 9 – 50, 10 – 400, 12 – 25, 13 – 400;
- Арматура: основных трактов– электроприводная, дренажных и рециркуляционных трактов – ручной привод;
- Дросельно-регулирующая шайба Р₁₄ (Рис. 2): пропускная способность до 25 м³/ч, при рабочем давлении 5 кгс/см².

Разница повысотных отметок установки оборудования 11 (отм. 33.2) и 14 (отм. 13.2) – 20 метров, что дает возможность создания подпора водного столба на линии всаса насоса до 2 кгс/см² (см. Рис. 1).

Также, ниже представлен Рис. 2 на представлены технологические связи подсистемы со смежными системами энергоблока, как с системами безопасности, так и с системами нормальной эксплуатации.

Алгоритмы работы дополнительной системы запаса раствора бора высокой концентрации и принцип работы

Алгоритмы работы подсистемы разработаны и основаны на принципах создания рабочих режимов и соблюдения эксплуатационных ограничений по ненарушению работы смежного оборудования. Для более логичного и легкого описания алгоритмов, оно взаимосвязано с Рис.1 и Рис.2, где отмечены компоненты подсистемы.

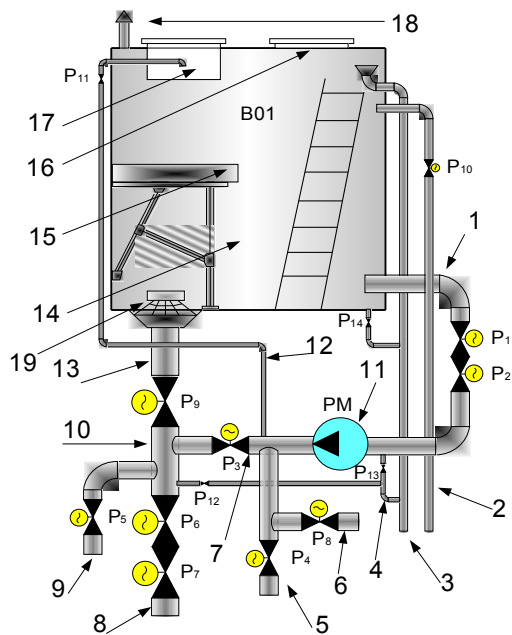


Рис. 1 – Принципиальная схема системы запаса бора высокой концентрации

1 – всас насосной части, 2 – трубопровод заполнения системы, 3 – трубопровод дренажно-переливной, 4 – дренажи, 5 – подача в систему подпитки-продувки, 6 – линия подачи раствора на очистку, 7 – напорный трубопровод насосной части, 8 – линия подачи к потребителям систем ввода бора, 9 – трубопровод потребителей системы ТВ, 10 – напорный трубопровод, 11 – насосный агрегат, 12 – напорный трубопровод разбавления хиреагентов, 13 – рециркуляционный и самотечно-подающий трубопровод, 14 – бак запаса раствора, 15 – улавливатель не растворившихся химреагентов, 16 – люк-лаз, 17 – лоток приема добавочных химреагентов, 18 – воздушник, 19 – рассекатель потока, PM – насос, B01 – бак, P1 - P14 — арматура.

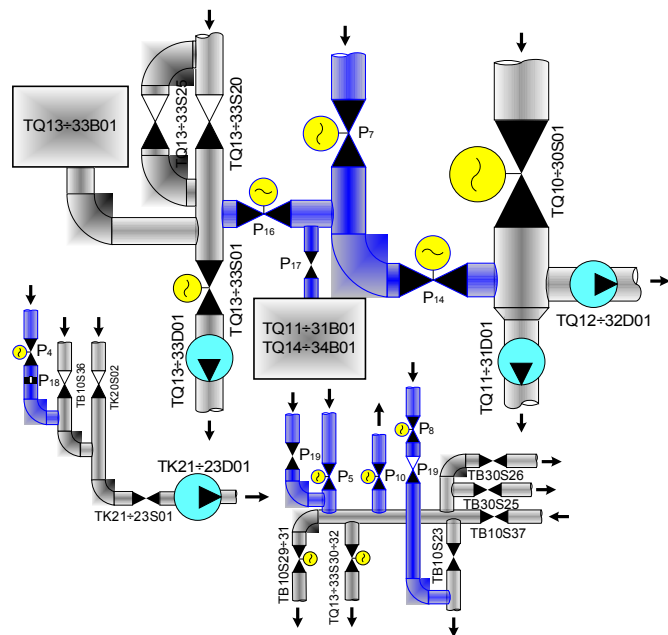


Рис.2 – Схема связей дополнительной системы бороконцентраата

Хранение концентрата. Бак заполнен раствором бора, концентрацией до 39,5 г/дм³ или более, до уровня 405...410 см. Производится регулярное включение системы на контур перемешивания раствора. Производится отбор проб на соответствие химическому составу. Подсистема находится в режиме «дежурство».

Перемешивание раствора. Операция предусмотрена для поддержания однородной концентрации раствора по всему объему системы и исключения загустевания и оседания борного концентрата в нижних точках жидкостного наполнения. Работа системы при перемешивании осуществляется по тракту: P₁ → P₂ → РМ → P₃ → P₉. Арматура P₄, P₅, P₆, P₇ - закрыта. Операция по перемешиванию производится один раз в семь суток, совместно с баками спринклерного раствора бора, Производится отбор проб среды на соответствие химическому составу. При несоответствии нормам, в бак системы дозируют химические реагенты. При этом, добавочные химические вещества дозируются в лоток и перемешиваются водой напора РМ при открытии арматуры P₁₁ на линии 12. Работа системы на перемешивание бака идет в противоток главного сливного трубопровода. Данный принцип работы основан на необходимости перемешивания нижних зон трубного тракта, которые могут выявиться застойными.

Включение на систему подпитки-продувки первого контура. Режим характеризуется подачей борного концентрата во всасывающий тракт системы подпитки-продувки первого контура. Предусмотрено два варианта работы системы: активный и пассивный. Активный режим, характеризуется подачей борного концентрата насосом РМ через арматуру P₁ → P₂ → РМ → P₄ → P₁₈. Арматура P₃ и P₈ закрыты. Дроссельная шайба P₁₈ ограничивает максимальную подачу в активном режиме и создает плавность подачи в пассивном режиме. Пассивному варианту работы системы характерна подача среды на потребитель самотеком, минимальным расходом борного концентрата. Данный режим работы применим в случае необходимости плавной коррекции концентрации в подпиточном тракте. Рабочая среда движется по трубопроводам самотеком, благодаря разнице повысотных отметок. В пассивном режиме подачи должна быть открыта арматура P₃, P₄, P₉, P₁₈. Арматура P₅, P₆, P₇, P₈ должна быть закрыта. Для лучшего протекания процесса возможно открытие арматуры P₁ и P₂ для протока среды через РМ и устранения возможного зависания рабочей среды в трубопроводах подсистемы.

Подача рабочей среды на очистку. Режим характеризуется необходимостью подачи раствора на очистку, при дренированиях системы или несоответствии среды водно-химическому режиму. Здесь, также, применимы пассивный и активный режимы работы. Основным является пассивный, из-за разницы высотных отметок размещения оборудования.

При этом должны быть открыты P₃, P₈, P₉. Арматура P₄, P₅, P₆, P₇ должна быть закрыта. Также, для лучшего протекания процесса, возможно открытие арматур P₁ и P₂ для протока среды через РМ и устранения возможного зависания рабочей среды в трубопроводах подсистемы. Полное дренирование производится через дренажную линию и арматуру P₁₉ в баки систем хранения бора ТВ30 через арматуры P₁₂, P₁₃, P₁₄.

Подача раствора бора на потребители системы ТВ10 и ТВ30. Режим работы применим в случае необходимости дозаполнения баков борсодержащих вод или приведения содержимое систем ТВ10 и ТВ30 к регламентным нормам по концентрации растворов, при отсутствии возможности подачи борного концентрата на эти системы со специального корпуса. Основной режим подачи, в данную линию потребителей – пассивный. Проток рабочей среды осуществляется по тракту - P₅, P₉. Остальная арматура системы должна быть закрыта.

Подача раствора бора к систем расхолаживания TQ. Режим, является основным целевым назначением системы и осуществим для случаев корректировки водно-химического режима, а также, подачи бороконцентрата в контур при аварии. Система производит подачу бороконцентрата в трубопроводы систем расхолаживания и ввода бора в первый контур. Подключение осуществляется к двум основным потокам – всасывающей линии бака аварийного запаса бора и всасывающей линии системы ввода бора высокого давления. В первом случае, система подает раствор на всас насосов аварийного расхолаживания активной зоны реактора. Работа системы осуществляется по тракту арматур P₇ и P₁₅. Во втором случае, система подает раствор бора на всас насосов системы ввода бора высокого давления, где параметры рабочей среды идентичны приведенной системе, повышая тем самым эффективный резерв продолжительности работы систем безопасности за счет дополнительного объема рабочей среды. Работа системы осуществляется по тракту арматур P₇ и P₁₆. Также, по этому тракту возможно дозаполнение баков системы. По тракту арматур P₇ и P₁₇ возможно производить дозаполнение баков систем аварийного впрыска бора и спринклерной системы. Принцип работы системы в данном режиме – пассивный. Подача бороконцентрата происходит за счет разниц повысотных отметок и самовсасывания при работе насосных агрегатов потребителей.

Анализ эффективности работы дополнительной системы запаса раствора бора высокой концентрации

В проекте В-320, основным критерием условий работоспособности систем безопасности рассматривается их работа при максимально-проектной аварии с двусторонним истечением теплоносителя первого контура и разрыве трубопровода чистого конденсата

второго контура. Это условие характеризуется исходным событием по понижению концентрации жидких поглотителей в баке аварийного запаса бора, путем разбавления его чистым конденсатом. Объем вероятностного разбавления чистым конденсатом взят из расчета, не менее, 100м³ дистиллята. Также, стоит учесть, что существуют недренируемые зоны на поверхностях строительных конструкций и оборудования, которые при работе спринклерных систем забирают на себя, не менее, 300м³ раствора бора.

При мгновенной разгерметизации первого контура, присущей максимально-проектной аварии, происходит мгновенное испарение около 30% теплоносителя главного циркуляционного контура. Таким образом, происходит вероятностное уменьшение эффективности работы систем безопасности, из-за уменьшения количества рабочей жидкости, расходуемой на паразитные объемы, испарение, заполнение оборудования. Для выравнивания количества охладителя и концентрации жидкого поглотителя в нем служат системы аварийного охлаждения активной зоны. На эксплуатируемых энергоблоках с установкой В-320 имеются аварийные запасы охладителя с раствором бора, которые наиболее эффективны в первые минуты максимально-проектной аварии состоящие из:

- баков системы аварийного ввода бора высокого давления – три бака объемом 15 м³ каждый, с концентрацией поглотителя $39,5 \geq 41,5$ г/дм³;
- емкости системы гидроаккумуляторов – четыре емкости по 60 м³, (41 м³ полезного объема каждая), с концентрацией поглотителя $16 \geq 20$ г/дм³;
- баков аварийного запаса бора, объемом 637.17 м³ с концентрацией поглотителя $16 \geq 20$ г/дм³;
- баков системы аварийного впрыска бора – три бака объемом 15 м³ каждый, с концентрацией поглотителя $39,5 \geq 41,5$ г/дм³;
- баков метабората калия спринклерной системы – три бака объемом 6м³ каждый, с концентрацией поглотителя $39,5 \geq 41,5$ г/дм³.

Также, в учет стоит ввести объем теплоносителя первого и второго контуров, которые остались в жидком состоянии в первые минуты максимально-проектной аварии, которые возможно использовать для охлаждения активной зоны.

Наиболее риск-ориентированным временем в протекании процесса максимально-проектной аварии являются первые 15 минут, из-за невозможности подачи охладителя в контур циркуляции от систем нормальной эксплуатации, по сигналам разрывной ращиты. Таким образом, получаем суммарное количество запасов жидкого охладителя доступного при возникновении максимально-проектной аварии (1) в м³, со средней концентрацией

поглотителя (2) г/дм³, в первые минуты протекания:

$$\begin{aligned} \sum V_{H_3BO_3}^{sol.} &= V_1 + V_2 \dots V_{\infty} = V_{201} + V_{TQ13} + V_{YT} + V_{TQ14} + V_{TQ11} + V_{I-k} + V_{II-k} = \\ &= 637.17 + 45 + 164 + 11.25 + 4.5 + 275 + 100 = 1236.92 \text{ м}^3 \end{aligned} \quad (1)$$

Где: V_{201} - объем в баке аварийного запаса бора, V_{TQ13} - объем раствора используемый из баков системы аварийного ввода бора высокого давления за 15 минут работы, V_{YT} - эффективный объем раствора гидроемкостей пассивных систем безопасности, V_{TQ14} - объем раствора используемый из баков системы аварийного впрыска бора высокого давления за 15 минут работы, V_{TQ11} - объем метабората калия используемый 15 минут работы, V_{I-k} - объем теплоносителя первого контура оставшийся после разрыва главного трубопровода, V_{II-k} - объем теплоносителя второго контура пролившийся после разрыва трубопровода чистого конденсата.

$$\begin{aligned} \eta_{H_3BO_3}^{average} &= \frac{\text{sol. } C_a^{H_3BO_3} \cdot (\rho_{m^{sol.a}}^{k_{i^0}^{msol.a}} \cdot V_{sol.a}^{sum}) + \text{sol. } C_b^{H_3BO_3} \cdot (\rho_{m^{sol.b}}^{k_{i^0}^{msol.b}} \cdot V_{sol.b}^{sum}) + \dots + \text{sol. } C_n^{H_3BO_3} \cdot (\rho_{m^{sol.n}}^{k_{i^0}^{msol.n}} \cdot V_{sol.n}^{sum})}{\text{Mass}_{sol.liq.}^{k_{i^0}^{msol.}}} = \\ &= \frac{\text{sol. } C_a^{H_3BO_3} \cdot (\rho_{m^{sol.a}}^{k_{i^0}^{msol.a}} \cdot V_{sol.a}^{sum}) + \text{sol. } C_b^{H_3BO_3} \cdot (\rho_{m^{sol.b}}^{k_{i^0}^{msol.b}} \cdot V_{sol.b}^{sum}) + \dots + \text{sol. } C_n^{H_3BO_3} \cdot (\rho_{m^{sol.n}}^{k_{i^0}^{msol.n}} \cdot V_{sol.n}^{sum})}{\text{Mass}_{sol.liq.}^{k_{i^0}^{msol.}}} = \end{aligned} \quad (2)$$

$$= 15,9506 \text{ г} / \text{дм}^3$$

Где: $\text{sol. } C_a^{H_3BO_3} \dots \text{sol. } C_n^{H_3BO_3}$ - учитываемые концентрации растворов, взятых в расчет;

$\rho_{m^{sol.a}}^{k_{i^0}^{msol.a}} \dots \rho_{m^{sol.n}}^{k_{i^0}^{msol.n}}$ - плотностные массы растворов при заданной температуре, взятые в расчет;

$V_{sol.a}^{sum} \dots V_{sol.n}^{sum}$ - суммарные объемы растворов, учитываемые в расчете для первых пятнадцати минут протекания аварии, $\text{Mass}_{sol.liq.}^{k_{i^0}^{msol.}}$ - общая масса жидких растворов с заданной массой при заданной температуре раствора, для первых пятнадцати минут протекания аварии.

Исходя из представленных кратких данных рассчитанных по (1, 2), можно вывести значения привносимого количественного эффекта добавочной системы хранения и транспортирования высококонцентрированного раствора бора, для разных условий, в первые пятнадцать минут протекания аварии. Например, значениями показателей для максимально-проектной аварии при срабатывании всех механизмов систем охлаждения активной зоны и ввода бора будут соответствовать значениям: $\sum V_{H_3BO_3}^{sol.} = 1321.92 \text{ м}^3$, $\Delta \eta_{H_3BO_3}^{addit. average} = 17,6285 \text{ г} / \text{дм}^3$.

Для ситуации когда, по какой-либо причине, в отказ полностью попал один канал систем охлаждения активной зоны и систем ввода бора, без задействования предлагаемой

системы, значения будут равны: $^{fail_1^{SSC}} V_{H_3BO_3}^{sol.} = 1301.67 м^3$, $^{fail_1^{SSC}} \Delta \eta_{H_3BO_3}^{average} = 15,5165 г / дм^3$.

При аналогичных условиях протекания процесса, но уже с использованием дополнительной системы транспортировки и хранения высококонцентрированного раствора

бора: $^{fail_1^{SSC}} V_{H_3BO_3}^{sol.} = 1386.67 м^3$, $^{fail_1^{SSC}} \Delta \eta_{H_3BO_3}^{average} = 17,24976 г / дм^3$.

Выводы

Расчет поставленной задачи и ее детерминирование показали положительный теоретический результат от внедрения предлагаемой технологической системы, направленной на поддержание концентрации жидких поглотителей в объемах технологических систем в период нормальной эксплуатации и объеме первого контура реакторной установки при аварийной ситуации и максимально-проектной аварии. Предлагаемая система может послужить вспомогательной подсистемой технологического оборудования, установленного на энергоблоках ВВЭР-1000, с энергетической установкой типа В-320, для поддержания качества растворов жидких поглотителей и замещающей системой для запаса концентрата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хмельницкая АЭС Энергоблок №2 Обеспечивающая система безопасности Система технического водоснабжения ответственных потребителей группы «А» (2VF) Разовая программа опытной эксплуатации системы охлаждения и технического водоснабжения ответственных потребителей группы «А» реакторного отделения с отключенными баками 2VF10,20,30B01 аварийного запаса технической воды № 2.ТЦ.6749.ПМ-11 2011 – 20 с.
2. Министерство топлива и энергетики Украины ГП НАЭК "Энергоатом" ОП Хмельницкая АЭС Система VF Энергоблоки №1, 2 Концептуальное техническое решение о проведении испытаний и опытной эксплуатации системы технического водоснабжения ответственных потребителей (группа «А») с отключенными баками 1,2VF10B01; 1,2VF20B01; 1,2VF30B01 запаса технической воды №0.ТЦ.0097.ТР-VF 2010 – 9 с.
3. Министерство топлива и энергетики Украины ГП НАЭК "Энергоатом" ОП Хмельницкая АЭС Система VF Энергоблок №2 Техническое решение о вводе в опытную эксплуатацию системы техводоснабжения ответственных потребителей (группа «А») с отключенными баками 2VF10B01; 2VF20B01; 2VF30B01 запаса технической воды №2.ТЦ.0112.ТР-VF 2012 – 5 с.
4. Министерство топлива и энергетики Украины ГП НАЭК "Энергоатом" ОП Хмельницкая АЭС Система VF Энергоблок №1 Техническое решение о вводе в опытную эксплуатацию системы техводоснабжения ответственных потребителей (группа «А») с отключенными баками

1VF10B01; 1VF20B01; 1VF30B01 запаса технической воды №1.ТЦ.0114.ТР-VF 2012 – 5 с.

5. Хмельницкая АЭС Защитные системы безопасности Том 6 Глава 6 Часть 1 Окончательный Отчет по Анализу Безопасности: Министерство топлива и энергетики Украины, ОАО «Киевский научно исследовательский и проектно-конструкторский институт «ЭНЕРГОПРОЕКТ»; рук. Чернавский В.Н. исполн.: Шендерович В.Я. [и др.]. – К., 2005 – 209 с. – Библиогр.: с.332-335 - №43-923.203.254.ОБ.06.01.РЕД.2.Ф.

ДОДАТКОВІ СИСТЕМИ ЗБЕРІГАННЯ Й ТРАНСПОРТУВАННЯ ВИСОКОКОНЦЕНТРОВАННОГО РОЗЧИНУ БОРУ ДЛЯ ВВЕР, АЛГОРИТМ РОБОТИ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ

О. П. Швець, В. П. Кравченко

Досліджувалась можливість уведення в склад технологічного обладнання енергоблоку АЕС, типу В-320, додаткової підсистеми запасу концентрату розчину бору. Спроможність цієї підсистеми до уведення позитивного результату у керування та безпечну експлуатацію енергоблоків та створення додаткового фізичного й оперативного резерву поглинача, так також, підвищення показника безпеки. Також, досліджувались ймовірні параметри та режими експлуатації пропонованої підсистеми, її вклад на забезпечення безпеки енергоблоку при експлуатації з системами безпеки й системами нормальної експлуатації.

ADDITIONAL SYSTEMS OF CHARGGING AND TRANSPORTING OF HIGHT CONCENTRATED BORANE FOR PWWER, ALGORITHM AND EFFICIENCY OF FUNCTIONING

Aleksandr Shvets, Vladimir Kravchenko

Considered the possibility of implantation in the structure of technological equipment of power cell-block, by B-320 type, an additional subsystem of supplied concentrate of boron solution. Ability of this subsystem for making the positive result in the operation and safe exploitation of power cells and creation of additional physical and operative margin of absorber, and also, improve the safety indicator. Probabilistic parameters and modes of exploitation of the proposed subsystem investigated too. Contribution to becoming of security of power cells with functioning of safety systems and the systems of normal exploitation.