

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621.039.58

**ОЦЕНКИ РАСХОДА ЧИСТОГО КОНДЕНСАТА ПРИ ВЫВОДЕ РУ
ТИПА ВВЭР-1200 НА МИНИМАЛЬНО КОНТРОЛИРУЕМЫЙ
УРОВЕНЬ МОЩНОСТИ ПОСЛЕ СРАБАТЫВАНИЯ АВАРИЙНОЙ
ЗАЩИТЫ**

© 2022 А.И. Аль-Шамайлах, Д.А. Соловьёв, А.А. Семенов, Н.В. Щукин,
А.Л. Лобарев, Д.А. Плотников, В.С. Потапов

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Приведение в действие аварийной защиты влечет за собой введение в активную зону реактора раствора борной кислоты до стояночного значения, далее производится поднятие органов регулирования, после чего возможно получение разрешения на пуск реактора. Первым этапом выхода на минимально контролируемый уровень мощности является подпитка чистым конденсатом (ЧК) до пускового интервала с большой скоростью введения, вторым – перемешивание 1-го контура и затем введение ЧК, но уже с малой скоростью. При этом в техническом регламенте безопасной эксплуатации указано, что расход ЧК в пусковом диапазоне должен не более чем на 10 т/ч превосходить расхода ЧК на компенсацию ксенонового отравления, а скорость ввода положительной реактивности не должна превышать $0,02 \beta_{эфф}/\text{мин}$. При этом не совсем ясно как оценить расход ЧК в пусковом интервале, поскольку на энергоблоке нет оборудования, измеряющего величину ксенонового отравления и скорость ввода реактивности. В этой статье ответим на вопрос какой допустимый расход ЧК может использовать оператор в пусковом интервале при наличии ксеноновых процессов.

Ключевые слова: ВВЭР-1200, МКУ, аварийная защита, чистый конденсат, технологический регламент безопасной эксплуатации.

Поступила в редакцию 12.01.2022

После доработки 01.03.2022

Принята к печати 11.03.2022

Введение

В практике эксплуатации АЭС с ВВЭР-1200 возможны ситуации выхода на минимально контролируемый уровень мощности (МКУ) сразу после срабатывания аварийной защиты (АЗ).

После срабатывания АЗ незамедлительно осуществляется введение в 1-й контур борной кислоты, для достижения её стояночного значения.

Стояночная концентрация борной кислоты в теплоносителе 1-го контура – это концентрация, превышающая на 1 г/кг концентрацию, обеспечивающую на текущий момент топливной кампании подкритичность реактора не менее 2% (при всех извлеченных поглощающих стержнях) для различных состояний реактора, в том числе холодные состояния.

Далее группы органов регулирования (ОР) СУЗ поднимаются, и получают разрешение на пуск. Процедура подготовки к пуску после АЗ представлена на рисунке 1.

При срабатывании АЗ реактор переходит в подкритическое состояние, начинается рост концентрации ^{135}Xe , то есть отравление ксеноном в результате сброса мощности

реактора, что приводит к вводу в активную зону большой отрицательной реактивности [1-7].

Специалисты отдела ядерной безопасности и надёжности проводит расчет критического значения концентрации борной кислоты в реакторе с использованием таких программ как БИПР-7А, имитатор реактора (ИР) [8-20].

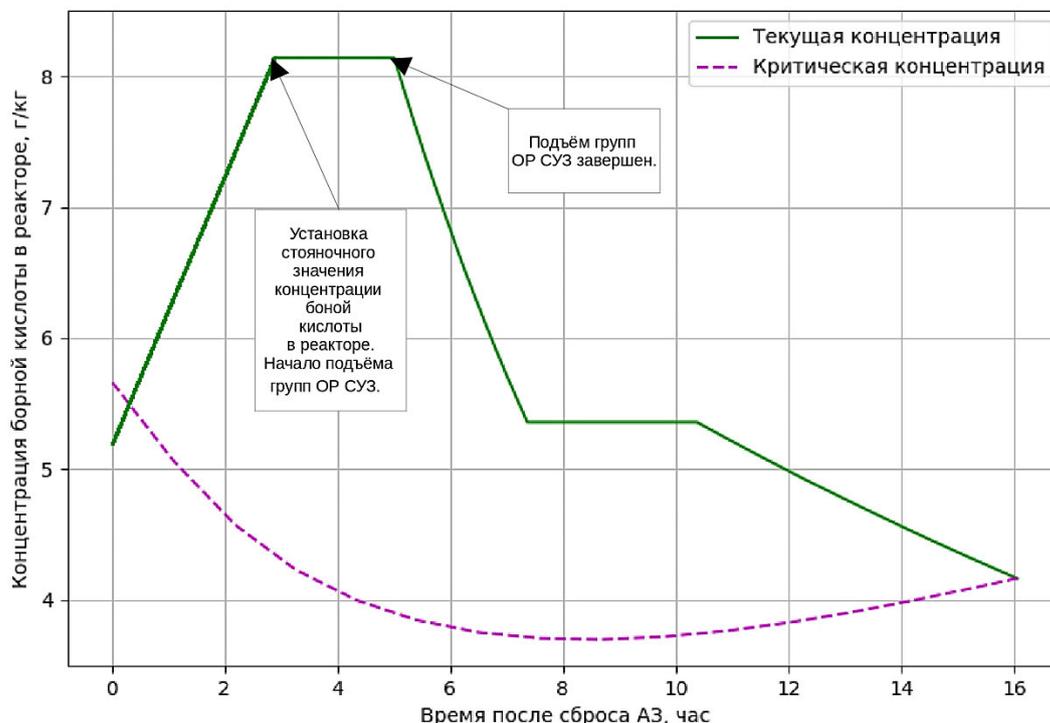


Рисунок 1 – Процедура подготовки к пуску после АЗ [Procedure for preparing for start-up after emergency protection]

Выделим ключевые моменты из документа «Технологический регламент безопасной эксплуатации» (ТРБЭ) АЭС. В нем указан общий порядок выполнения операций, связанных с безопасностью, при переводе реакторной установки (РУ) в состояние «Выход на МКУ мощности»:

- допустимая величина расхода чистого конденсата (ЧК) определяется исходя из свойств текущей топливной загрузки. Скорость ввода ЧК в пусковом диапазоне должна обеспечивать скорость ввода положительной реактивности не более $0,02 \beta_{эфф}/мин$;
- расход чистого конденсата в пусковом интервале должен быть не более 10 т/час выше необходимого для компенсации отравления ксеноном при пусках из отравленного состояния.

Данные формулировки ТРБЭ АЭС затруднительны для понимания. Поэтому возникают вопросы, например, как при вводе ЧК перевести скорость ввода положительной реактивности из величины $0,02 \beta_{эфф}/мин$ в величину расхода т/час, как оценить расход ЧК на компенсацию ксенонового отравления? Так как информация о скорости ввода положительной реактивности и о величине расхода на компенсацию отравления ксеноном на блочный пульт управления не выводится, а требования ТРБЭ требуют разъяснений, то постараемся ответить на эти вопросы в данной статье.

Оценки расхода ЧК в пусковом интервале

Пусковой интервал – это интервал, у которого нижняя граница равна критическому значению борной кислоты в реакторе, а верхняя равна критическому значению борной кислоты в реакторе плюс (1,1-1,3) г/кг. В пусковом интервале разрешается выход на МКУ с малой скоростью подпитки ЧК.

В статье приведены алгоритмы для оценки максимального и допустимого расхода ЧК в пусковом интервале [21]. Кратко рассмотрим полученные в этих алгоритмах формулы, а затем, используя их, получим результаты оценок расхода ЧК в пусковом интервале.

В ТРБЭ АЭС указано, что при переводе реакторной установки из «Горячего состояния» в состояние «Выход на МКУ мощности» скорость ввода ЧК в пусковом интервале должна обеспечивать скорость ввода положительной реактивности не более 0,02 $\beta\text{эф/мин}$.

Переведём такую оценку скорости (неравенство (1)) из $\beta\text{эф/мин}$ в величину расхода ЧК, т/ч:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} \leq V_{\max}, \quad (1)$$

где V_{\max} – максимальная скорость ввода положительной реактивности, равная 0,02 $\beta\text{эф/мин}$;

$\frac{\partial \rho}{\partial t}$ – скорость ввода положительной реактивности.

Проведя необходимые преобразования, получим неравенство (2):

$$-\frac{\partial \rho(Cb)}{\partial Cb} \frac{G}{M} Cb_0 \exp\left(-\frac{G}{M} t\right) \leq V_{\max} - \frac{\partial \rho_{\text{кс}}(t)}{\partial t}. \quad (2)$$

где $\frac{\partial \rho(Cb)}{\partial Cb}$ – чувствительности реактивности при различных значениях концентрации борной кислоты в 1-ом контуре;

M – масса теплоносителя 1-го контура;

G – массовый расход подпитки/продувки;

Cb – текущая концентрация борной кислоты в 1-м контуре;

Cb_0 – концентрация борной кислоты в 1-м контуре на начало процесса подпитки/продувки;

$\frac{\partial \rho_{\text{кс}}(t)}{\partial t}$ – изменение реактивности во времени за счет изменения концентрации ядер ксенона.

Получившееся неравенство (2) затруднительно решить аналитически, но оно легко решается численно. Численно решим его, перебирая расходы ЧК с необходимой нам точностью и получая оценку максимального расхода ЧК в пусковом интервале.

Как указано в ТРБЭ АЭС, расход ЧК в пусковом интервале должен быть не более 10 т/ч свыше требуемого для компенсации отравления ксеноном в условиях пусков из отравленного состояния.

Проведем оценки величины расхода ЧК с учетом ксенонового отравления.

Расход ЧК в пусковом интервале, необходимый для компенсации отравления ксеноном при пусках из отравленного состояния, рассчитывается по формуле (3):

$$G = - \frac{M}{Cb(t)} \frac{\partial Cb_{\text{крит}}(t)}{\partial t} \quad (3)$$

где $\frac{\partial Cb_{\text{крит}}(t)}{\partial t}$ – скорость изменения критической концентрации борной кислоты на компенсацию ксенонового отравления.

Согласно требованиям ТРБЭ АЭС расход ЧК ($G_{\text{допустимый}}$), который может использовать оператор на АЭС в пусковом интервале, должен быть не более чем на 10 т/ч свыше необходимого для компенсации отравления ксеноном при пусках из отравленного состояния. То есть для получения значения допустимого расхода ($G_{\text{допустимый}}$) добавим к получившемуся значению необходимого расхода для компенсации ксенона (G) 10 т/ч как в формуле (4):

$$G_{\text{допустимый}} = G + 10. \quad (4)$$

Представим здесь результаты оценки максимального и допустимого расхода ЧК при выводе РУ типа ВВЭР-1200 на МКУ мощности после срабатывания АЗ. Результаты представлены на рисунках 2-13 и приведены для начала и конца топливных кампаний №1 и №4 Нововоронежской АЭС (НВАЭС) и получены на основе формул 1-4. Сами результаты получены с использованием Класса анализаторов режимов реакторной установки (КАРРУ) энергоблоков № 1, 2 НВАЭС-2. КАРРУ используется в учебно-тренажерном пункте НВАЭС для обучения как российских, так и иностранных специалистов, готовящихся к эксплуатации строящихся в России и за рубежом АЭС по российским проектам.

КАРРУ разработан на базе программного комплекса ПРОСТОР [22, 23]. Программный комплекс ПРОСТОР предназначен для проведения взаимосогласованных нейтронно-физических и тепло-гидродинамических расчетов стационарных и нестационарных процессов в оборудовании 1-го контура действующих АЭС с реактором ВВЭР-1000, включая активную зону и парогенераторы со стороны 2-го контура с учетом влияния на них характеристик вспомогательного оборудования 1-го контура и работы систем управления и защиты.

Результаты были получены в предположении, что ввод концентрированной борной кислоты до стояночного значения после срабатывания АЗ осуществляется за 2,5 часа, затем за 2,5 часа со штатной скоростью поднимают ОР СУЗ, и сразу получают разрешение на пуск (рисунки 2-5). Подпитка ЧК до пускового интервала идет с расходом в 40 т/ч, а процесс перемешивания 1-го контура занимает 3 часа. Далее идет подпитка ЧК с расходом в 10 т/ч.

Представленные на рисунках 6-13 результаты позволяют сделать вывод, о том, что величина расхода ЧК в 10 т/ч, используемая в пусковом интервале при разотравленной по ксенону активной зоне, также может быть безопасно использована и при отравленной по ксенону активной зоне.

Ситуация с наименьшими запасами до предельных значений наблюдается для начала топливной кампании №4. При этом требования ТРБЭ АЭС выполняются.

Полученные результаты позволяют подтвердить безопасность требований ТРБЭ АЭС по расходу ЧК в пусковом интервале при выводе энергоблока с РУ типа ВВЭР-1200 на МКУ мощности после срабатывания АЗ.

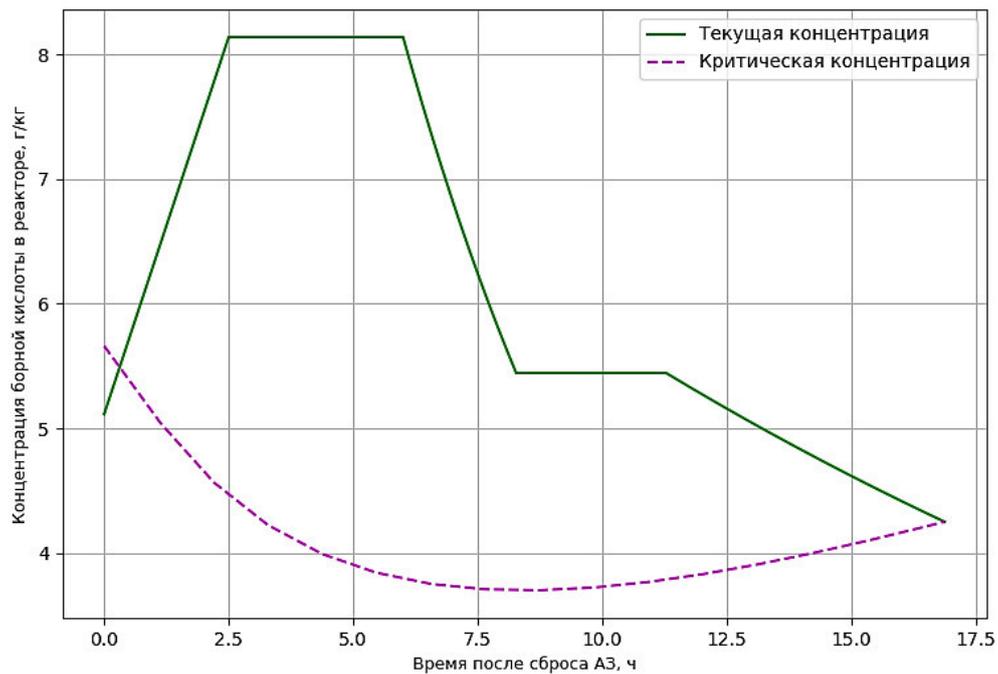


Рисунок 2 – Концентрация борной кислоты в реакторе при выходе на МКУ для начала 1-ой топливной загрузки блока №6 НВАЭС. Время выдержки после АЗ 6 часов [Concentration of boric acid in the reactor upon reaching the controlled power level for the start of the 1st fuel loading of Unit 6 of NVNPP. Dwell time after emergency protection is 6 hours]

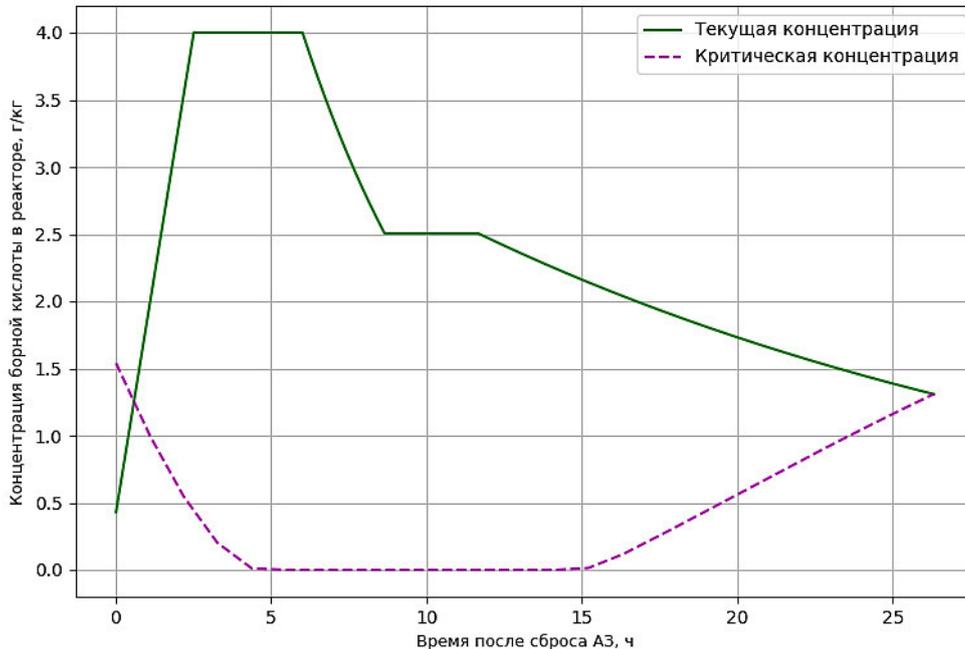


Рисунок 3 – Концентрация борной кислоты в реакторе при выходе на МКУ для конца 1-ой топливной загрузки блока №6 НВАЭС. Время выдержки после АЗ 6 часов [Concentration of boric acid in the reactor upon reaching the controlled power level for the finish of the 1st fuel loading of Unit 6 of NVNPP. Dwell time after emergency protection is 6 hours]

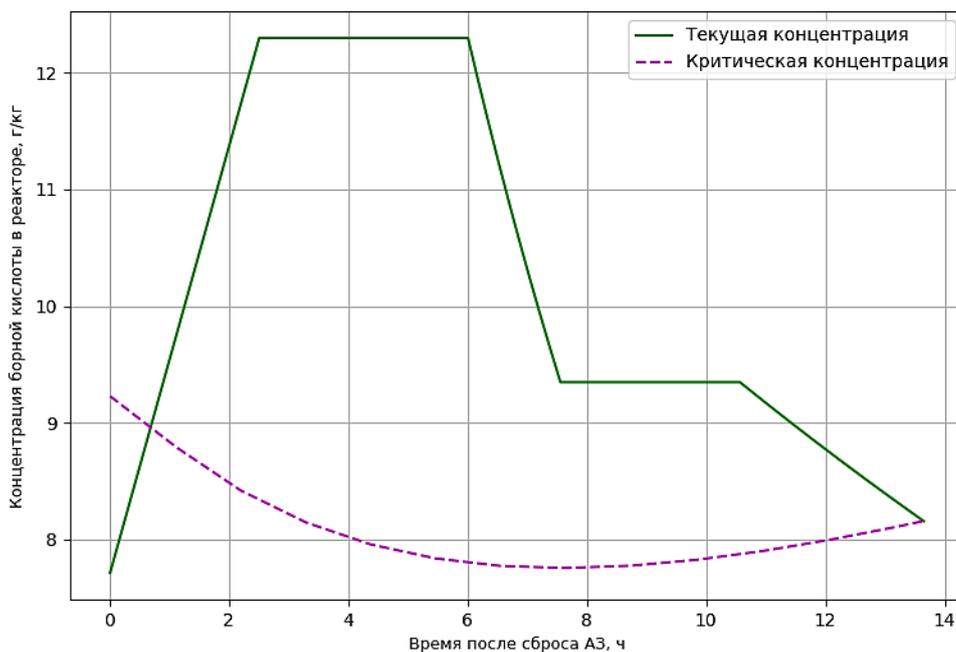


Рисунок 4 – Концентрация борной кислоты в реакторе при выходе на МКУ для начала 4-ой топливной загрузки блока №6 НВАЭС. Время выдержки после АЗ 6 часов [Concentration of boric acid in the reactor upon reaching the controlled power level for the start of the 4th fuel loading of Unit 6 of NVNPP. Dwell time after emergency protection is 6 hours]

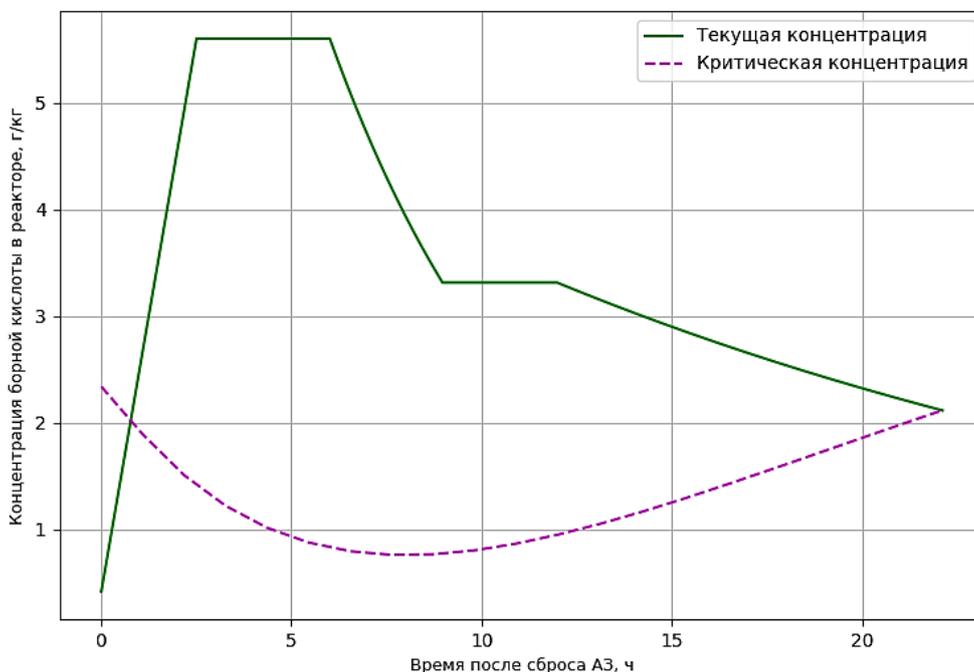


Рисунок 5 – Концентрация борной кислоты в реакторе при выходе на МКУ для конца 4-ой топливной загрузки блока №6 НВАЭС. Время выдержки после АЗ 6 часов [Concentration of boric acid in the reactor upon reaching the controlled power level for the finish of the 4th fuel loading of Unit 6 of NVNPP. Dwell time after emergency protection is 6 hours]

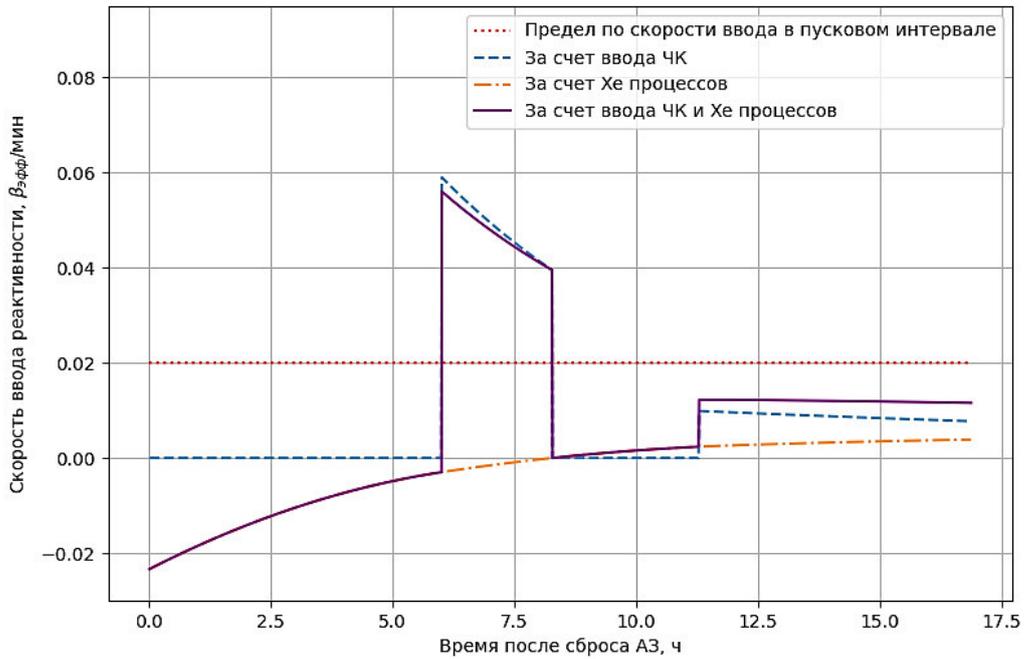


Рисунок 6 – Скорости ввода реактивности во время выхода на МКУ для начала 1-ой топливной загрузки блока №6 НВАЭС. Время выдержки после АЗ 6 часов [Reactivity insertion rates during reaching the monitored power level for the start of the 1st fuel loading of Unit 6 of NVNPP. Dwell time after emergency protection is 6 hours]

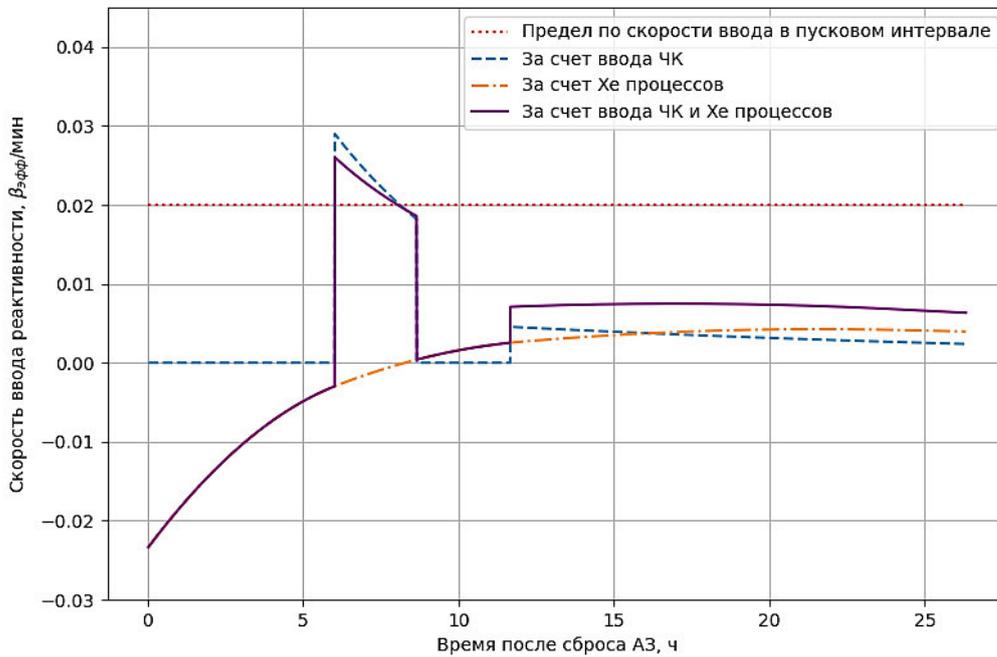


Рисунок 7 – Скорости ввода реактивности во время выхода на МКУ для конца 1-ой топливной загрузки блока №6 НВАЭС. Время выдержки после АЗ 6 часов [Reactivity insertion rates during reaching the monitored power level for the finish of the 1st fuel loading of Unit 6 of NVNPP. Dwell time after emergency protection is 6 hours]

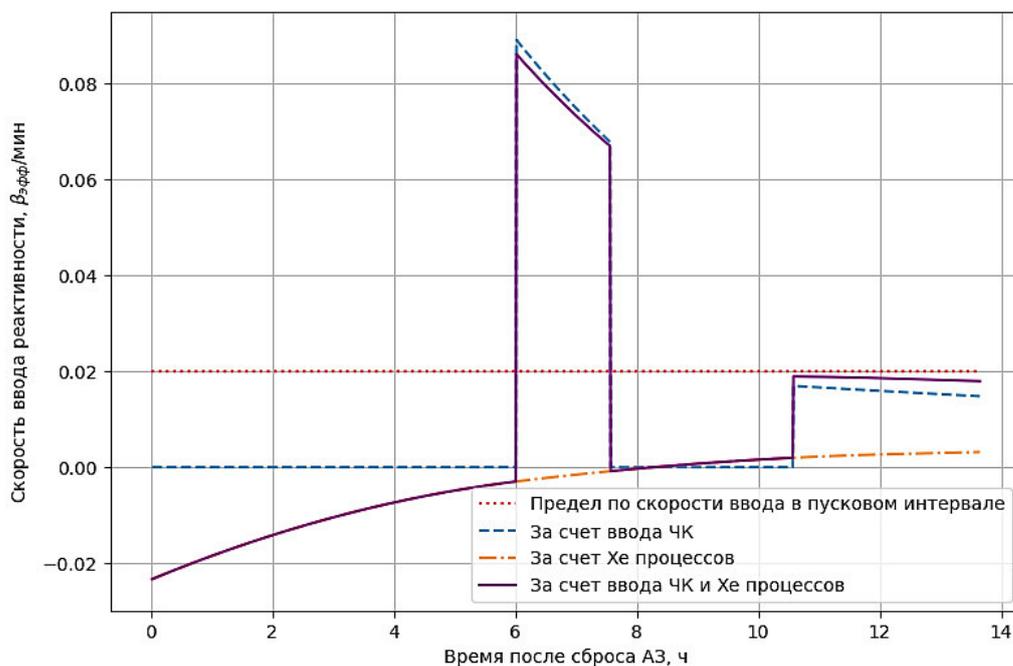


Рисунок 8 – Скорости ввода реактивности во время выхода на МКУ для начала 4-ой топливной загрузки блока №6 НВАЭС. Время выдержки после АЗ 6 часов [Reactivity insertion rates during reaching the monitored power level for the start of the 4th fuel loading of Unit 6 of NVNPP. Dwell time after emergency protection is 6 hours]

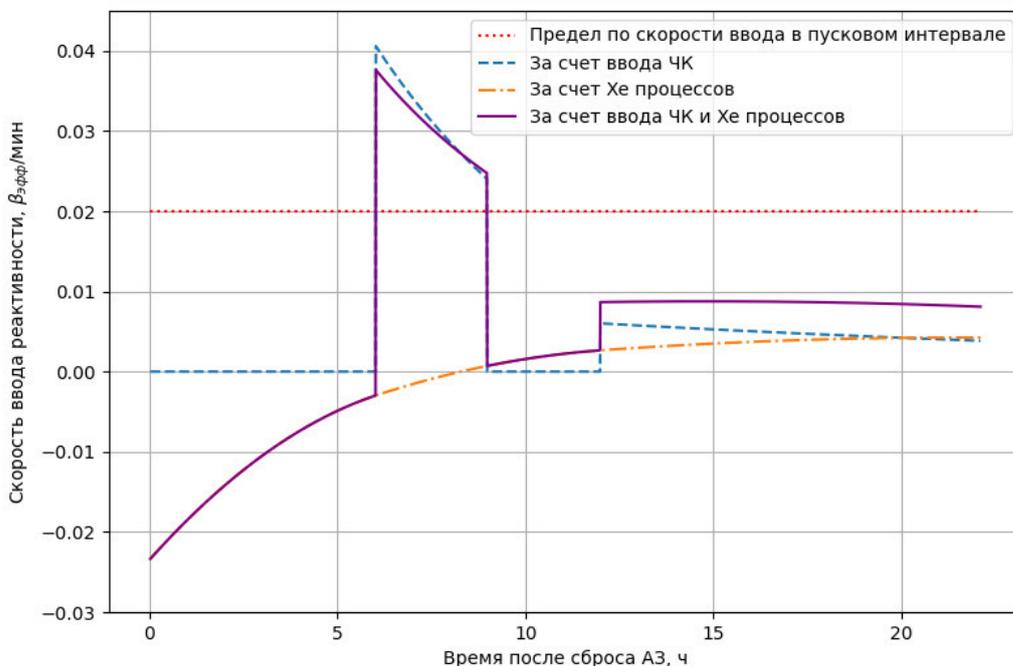


Рисунок 9 – Скорости ввода реактивности во время выхода на МКУ для конца 4-ой топливной загрузки блока №6 НВАЭС. Время выдержки после АЗ 6 часов [Reactivity insertion rates during reaching the monitored power level for the finish of the 4th fuel loading of Unit 6 of NVNPP. Dwell time after emergency protection is 6 hours]

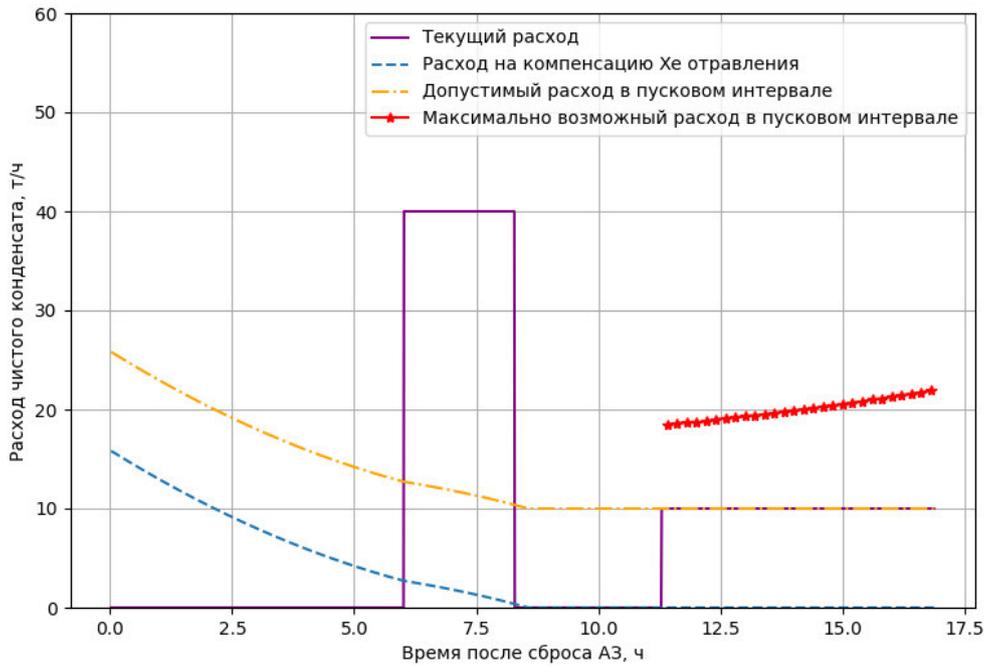


Рисунок 10 – Расходы ЧК во время выхода на МКУ для начала 1-ой топливной загрузки блока №6 НВАЭС. Время выдержки после АЗ 6 часов [Net condensate flow rates during reaching the monitored power level for the start of the 1st fuel loading of Unit 6 of NVNPP. Dwell time after emergency protection is 6 hours]

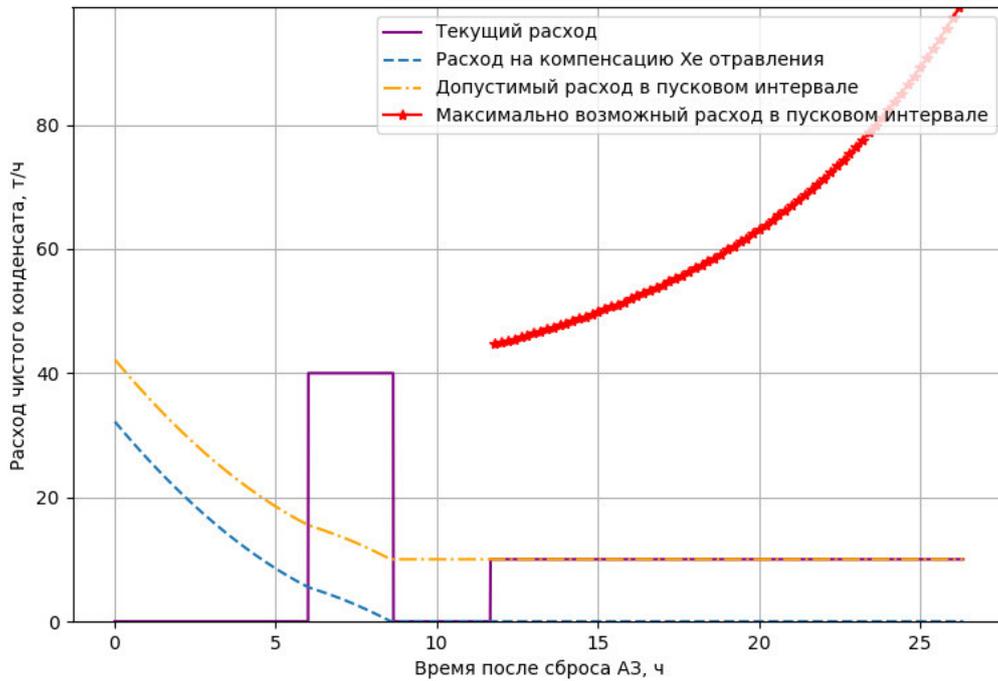


Рисунок 11 – Расходы ЧК во время выхода на МКУ для конца 1-ой топливной загрузки блока №6 НВАЭС. Время выдержки после АЗ 6 часов [Net condensate flow rates during reaching the monitored power level for the finish of the 1st fuel loading of Unit 6 of NVNPP. Dwell time after emergency protection is 6 hours]

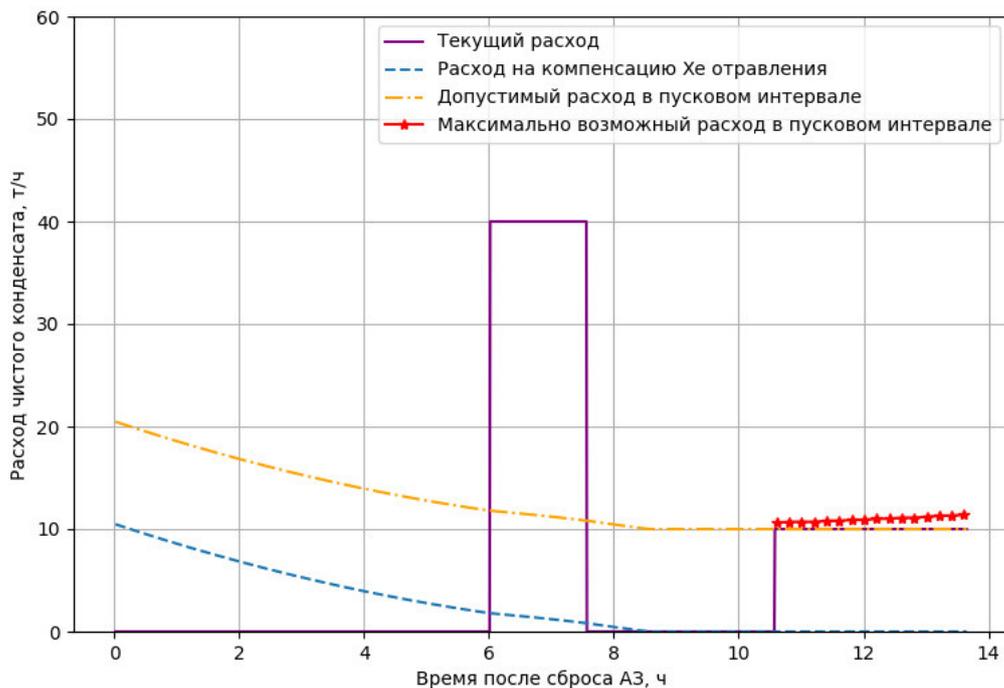


Рисунок 12 – Расходы ЧК во время выхода на МКУ для начала 4-ой топливной загрузки блока №6 НВАЭС. Время выдержки после АЗ 6 часов [[Net condensate flow rates during reaching the monitored power level for the start of the 4th fuel loading of Unit 6 of NVNPP. Dwell time after emergency protection is 6 hours]

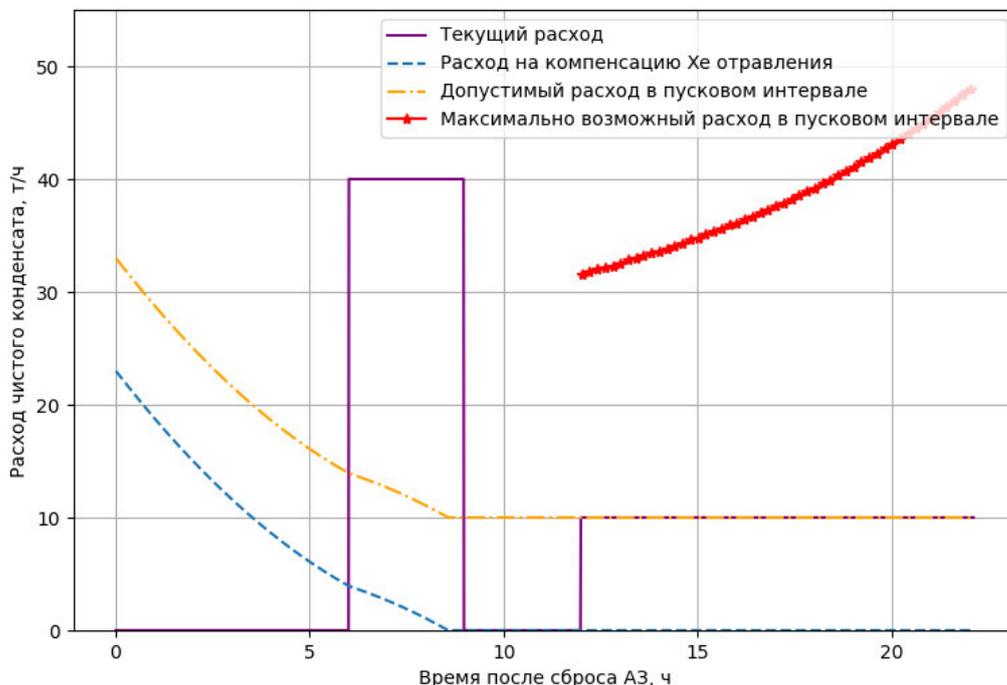


Рисунок 13 – Расходы ЧК во время выхода на МКУ для конца 4-ой топливной загрузки блока №6 НВАЭС. Время выдержки после АЗ 6 часов [Net condensate flow rates during reaching the monitored power level for the finish of the 4th fuel loading of Unit 6 of NVNPP. Dwell time after emergency protection is 6 hours]

Заключение

В статье приведены оценки расхода ЧК при выводе РУ типа ВВЭР-1200 на МКУ мощности после срабатывания АЗ.

Оценки выполнены для начала и конца топливных кампаний №1 и №4 НВАЭС. Сами результаты получены с использованием КАРРУ энергоблоков № 1, 2 НВАЭС-2.

Приведенные результаты показывают, что ситуация с наименьшими запасами до предельных значений наблюдается для начала топливной кампании №4 НВАЭС. При этом требования ТРБЭ АЭС выполняются.

Приведенные результаты позволяют сделать вывод, о том, что величина расхода ЧК в 10 т/ч, используемая в пусковом интервале при разотравленной по ксенону активной зоне, так же может быть безопасно использована и при отравленной по ксенону активной зоне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Семенов А.А., Соловьев Д.А., Чанаев В.М. Аттестационный паспорт программного средства: Программа mku01 (версия 1.0). Technical report. ЭНИКО ТСО, 21.02.2007.
- [2] Shimazu Y. Monitoring and control of radial xenon oscillation in PWRs by a three radial offset concept. J.Nucl. Sci. Technol, 2007, 44, 155.
- [3] Семенов, В.К., К вопросу о ксеноновых колебаниях в ядерном реакторе / В.К. Семенов, М.А. Вольман // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2015. – № 2. – С. 15-20.
- [4] Рябов, Н.А. Исследование точечной модели ксеноновых колебаний / Н.А. Рябов, А.А. Семенов // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2006. – № 2. – С. 66-73.
- [5] Аверьянова, С.П., Ксеноновая устойчивость ВВЭР-1200 / С.П. Аверьянова, П.И. Филимонов // Атомная энергия. – 2009. – № 6 (107). – С. 348-351.
- [6] Shimazu Y. Xenon oscillation control in large PWRs using a characteristic ellipse trajectory drawn by three axial offsets. J. Nucl. Sci. Technol, 2008, 45, 257. 22.
- [7] Поваров, В.П. Предупреждение и подавление аксиальных ксеноновых колебаний в активной зоне ВВЭР-1000 / В.П. Поваров, О.В. Лебедев, В.В. Макеев // Теплоэнергетика. – 2003. – № 5. – С. 11-15.
- [8] Программа БИПР-7А (версия 1.5). Аттестационный паспорт программного средства. Регистрационный номер ПС в ЦЭП №613 от 31.07.2008. Регистрационный номер паспорта аттестации ПС № 214 от 23.09.2008. Technical report, Федеральное надзор России по ядерной и радиационной безопасности. – Москва, 2008.
- [9] Программа ИР версия. WINDOWS. Инструкция пользователя, 2005.
- [10] Филимонов, П.И. Управление энергораспределением ВВЭР с помощью офсет-офсетной диаграммы / П.И. Филимонов // Атомная энергия. – 1992. – № 73(3). – С. 175-179.
- [11] Филимонов, П.И. Настройка модели на текущее состояние реактора / П.И. Филимонов, С.П. Аверьянова // Атомная энергия. – 1996. – №. 80(6). – С. 482 -485.
- [12] Филимонов, П.И. Управление группами рабочих органов СУЗ в маневренном режиме работы ВВЭР-1000 / П.И. Филимонов, С.П. Аверьянова, М.П. Филимонова // Атомная энергия. – 1998. – № 84(5). – 383-387.
- [13] Филимонов, П.И., Испытания маневренности ВВЭР-1000 на 5-м блоке Запорожской АЭС / П.И. Филимонов, С.П. Аверьянова, С.Г. Олейник, С.П. Климов, А.А. Депенчук // Атомная энергия. – 1998 – № 85(5). – С. 364-367.
- [14] Филимонов, П.И. Программа «Имитатор реактора» для моделирования маневренных режимов работы ВВЭР-1000 / П.И. Филимонов, В.В. Мамичев, С.П. Аверьянова // Атомная энергия. – 1998. – № 84(6) . – С. 260-263.
- [15] Филимонов, П.И. Поддержание равновесного офсета – эффективный способ подавления ксеноновых колебаний в ВВЭР-1000 / П.И. Филимонов, С.П. Аверьянова // Атомная энергия. – 2001. – № 90(3) . – С. 231-233.
- [16] Аверьянова, С.П. Развитие, внедрение и современное состояние расчетной программы «Имитатор реактора» / С.П. Аверьянова, А.И. Ковель, В.В. Мамичев, П.И. Филимонов // Атомная энергия. – 2008. – № 105(4). – С. 237-240.
- [17] Программа ИР (Имитатор Реактора) (версия 1.2.2 для энергоблока №4 Калининской АЭС), 2011.

- [18] Аль Шамайлах, А.И.. Методика определения времени до выхода на МКУ для ВВЭР / А.И. Аль Шамайлах, Д.А. Соловьев, А.А. Семенов, Н.В. Шукин [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. – 2020. – Вып. 1. – С. 56-60.
- [19] Al-Shamayleh A.I., Solovyov D.A., Semyonov A.A., Shcukin N.V., Djaroum B. and Tanash H.A. Determining the critical concentration of boric acid and the time of its onset when reaching to minimum controllable power for the water-water energetic reactor. // IJNGEE, 2021. Volume 5. N. 1. P. 37-45.
- [20] Al-Shamayleh A.I., Solovyov D.A., Semyonov A.A., Shcukin N.V., Djaroum B., Tanash H.A. and Molev I.A. Determining the critical concentration of boric acid and the time of its onset when reaching to minimum controllable power for VVER. // Journal of Physics: Conference Series, 2020.
- [21] Аль Шамайлах, А.И., Оценка расхода чистого конденсата в пусковом диапазоне для выхода на минимально контролируемый уровень мощности после срабатывания аварийной защиты / А.И. Аль Шамайлах, Д.А. Соловьев, А.А. Семенов, Н.В. Шукин [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. – 2022. – Вып. 1. – С. 74–81.
- [22] Выговский, С.Б. Опыт использования программного комплекса «ПРОСТОР» в расчетной поддержке эксплуатации Калининской АЭС и перспективы его дальнейшего применения на АЭС с ВВЭР-1000 С.Б. Выговский [и др.] // Сборник трудов 8-й международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», Подольск, 28-31 мая 2013. – Подольск : ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2013. – С. 121-123.
- [23] Аттестационный паспорт № 182 от 28.10.2004. Программный комплекс ПРОСТОР (версия 1). – Москва : Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор), 2004.

REFERENCES

- [1] Semenov A.A., Solov'yev D.A., Chapayev V.M. Attestatsionnyy pasport programmnoy sredstva: Programma mku01 (versiya 1.0). Technical report. ENIKO TSO, 21.02.2007. [Attestation Passport of the Software Tool: Program mku01 (version 1.0)]. Technical Report. ENIKO TSO, 21.02.2007 (in Russian).
- [2] Shimazu Y. Monitoring and control of radial xenon oscillation in PWRs by a three radial offset concept. J.Nucl. Sci. Technol, 2007, 44, 155 (in English).
- [3] Semenov V.K., Vol'man M.A. K voprosu o ksenonovykh kolebaniyakh v yadernom reaktore. [Issue of Xenon Oscillations in a Nuclear Reactor]. Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta [News of the Ivanovo State Power Engineering University]. 2015. – № 2. P. 15–20 (in Russian).
- [4] Ryabov N.A., Semenov A.A. Issledovaniye tochechnoy modeli ksenonovykh kolebaniy [Investigation of Point Model of Xenon Oscillations]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika [News of Higher Education Institutions Atomic Energy]. 2006. – № 2. P. 66–73 (in Russian).
- [5] Aver'yanova S.P., Filimonov P.Ye. Ksenonovaya ustoychivost' VVER-1200 [WWER-1200 Xenon Stability]. Atomnaya energiya [Atomic Energy]. 2009. – № 6 (107). P. 348–351. (in Russian)
- [6] Shimazu Y. Xenon oscillation control in large PWRs using a characteristic ellipse trajectory drawn by three axial offsets. J. Nucl. Sci. Technol, 2008, 45, 257. (in English).
- [7] Povarov V.P., Lebedev O.V., Makeyev V.V. Preduprezhdeniye i podavleniye aksial'nykh ksenonovykh kolebaniy v aktivnoy zone VVER-1000 [Prevention and Suppression of Axial Xenon Vibrations in the WWER-1000 Core]. Teploenergetika [Heat power engineering]. 2003. – № 5. P. 11–15 (in Russian).
- [8] Programma BIPR-7A (versiya 1.5). Attestatsionnyy pasport programmnoy sredstva. Registratsionnyy nomer PS v TSEP №613 ot 31.07.2008. Registratsionnyy nomer pasporta attestatsii PS № 214 ot 23.09.2008. Technical report, Federal'nyy nadzor Rossii po yadernoy i radiatsionnoy bezopasnosti, [BIPR-7A Program (version 1.5). Attestation Passport of the Software Tool]. Registration number of the substation in the CEP No. 613 dated 31.07.2008. Registration number of the passport of at-testation PS No. 214 dated 23.09.2008. Technical report, Federal Nuclear and Radiation Safety Inspectorate of Russia], Moscow, 2008 (in Russian).
- [9] Programma IR versiya. WINDOWS. Instruktsiya pol'zovatelya [IR Program Version. WINDOWS. User manual], 2005 (in Russian).
- [10] Filimonov, P.E. Upravlenie energoraspredeleniem VVER s pomoshch'yu ofset-ofsetnoj diagrammy [Control of Power Distribution in Water-Moderated Water-Cooled Power Reactors by Means of Offset-Offset Diagram]. Atomnaya energiya [Atomic Energy]. 1992. – № 73(3). P. 175-179 (in Russian).

- [11] Filimonov, P.B., Aver'yanova, S.P. Nastrojka modeli na tekushchee sostoyanie reaktora [Setting Up Computational Model of the Current Reactor State]. *Atomnaya energiya* [Atomic Energy]. 1996. – № 80(6). P. 482–485 (in Russian).
- [12] Filimonov, P.E., Aver'yanova, S.P. & Filimonova, M.P. Upravlenie gruppami rabochnih organov SUZ v manevrennom rezhime raboty VVER-1000 [Control of Control-Rod Groups in the Maneuvering Regime of WWER-1000 Operation]. *Atomnaya energiya* [Atomic Energy]. 1998. – № 84(5). P. 383–387 (in Russian).
- [13] Filimonov P.I., Aver'yanova S.P., Oleynik S.G., Klimov S.P., Depenchuk A.A. Ispytaniya manevrennost' VVER-1000 na 5-m bloke Zaporozhskoy AES [Testing the Maneuverability of WWER-1000 at the 5th unit of the Zaporozhye NPP]. *Atomnaya energiya* [Atomic Energy] 1998. № 85(5). P. 364–367 (in Russian).
- [14] Filimonov, P.E., Mamichev, V.V. & Aver'yanova, S.P. Programma «Imitator reaktora» dlya modelirovaniya manevrennyh rezhimov raboty VVER-1000 [“Reactor Simulator” Program for Simulating Load-Tracking States in WWER-1000 Reactor]. *Atomnaya energiya* [Atomic Energy]. 1998. – № 84(6). P. 260–263 (in Russian).
- [15] Filimonov, P.E., Aver'yanova, S.P. Podderzhanie ravnovesnogo ofseta – effektivnyj sposob podavleniya ksenonovyh kolebanij v VVER-1000 [Maintaining an Equilibrium Offset as an Effective Method for Suppressing Xenon Oscillations in WWER-1000]. *Atomnaya energiya* [Atomic Energy]. 2001. – № 90(3). P. 231–233 (in Russian).
- [16] Aver'yanova, S.P., Kovel, A.I., Mamichev, V.V. Razvitie, vnedrenie i sovremennoe sostoyanie raschetnoj programmy «Imitator reaktora» [Development, Introduction, and Current State of Computational Program “Reactor Simulator”] // *Atomnaya energiya* [Atomic Energy] 2008. – № 105(4). P. 237–240 (in Russian).
- [17] Programma IR (Imitator Reaktora) (versiya 1.2.2 dlya energobloka №4 Kalininskoy AES) [IR program (Reactor Simulator) (version 1.2.2 for power unit No. 4 of the Kalinin NPP)]. 2011 (in Russian).
- [18] Al' Shamaylekh A.I.AA., Solov'yev D.A., Semenov A.A., Shchukin N.V. i dr. Metodika opredeleniya vremeni do vykhoda na MKU dlya VVER [Method for determining the time before entering the Monitored Power Level for WWER] // *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Fizika yadernykh reaktorov* [Issues of Atomic Science and Technology. Ser. Physics of Nuclear Reactors], 2020. - Issue 1. P. 56–60. (in Russian).
- [19] Al-Shamayleh A.I., Solovyov D.A., Semyonov A.A., Shchukin N.V., Djaroum B. and Tanash H.A. Determining the critical concentration of boric acid and the time of its onset when reaching to minimum controllable power for the water-water energetic reactor. // *IJNGEE*, 2021. Volume 5. N. 1. P. 37–45 (in English).
- [20] Al-Shamayleh A.I., Solovyov D.A., Semyonov A.A., Shchukin N.V., Djaroum B., Tanash H.A. and Molev I.A. Determining the critical concentration of boric acid and the time of its onset when reaching to minimum controllable power for WWER. // *Journal of Physics: Conference Series*, 2020 (in English).
- [21] Al' Shamaylekh A.I.AA., Solov'yev D.A., Semenov A.A., Shchukin N.V. i dr. Otsenka raskhoda chistogo kondensata v puskovom diapazone dlya vykhoda na minimal'no kontroliruyemyy uroven' moshchnosti posle sbratyvaniya avariynoy zashchity [Estimation of Net Condensate Flow Rate in Start-Up Range for Reaching Minimum Controllable Power Level after Tripping of Emergency Protection] // *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Fizika yadernykh reaktorov* [Issues of Atomic Science and Technology. Ser. Physics of Nuclear Reactors], 2022. - Issue 1. P. 74–81 (in Russian).
- [22] Vygovsky S.B. Opyt ispol'zovaniya programmnoy kompleksa «PROSTOR» v raschetnoj podderzhke ekspluatatsii Kalininskoy AES i perspektivy ego dal'neyshego primeneniya na AES s VVER-1000 [Experience in Using the Complex of Applications "PROSTOR" in the Calculation Possibility of Using the Kalinin NPP and the Prospects for its Use at NPPs with WWER-1000] // *Sbornik trudov 8-j mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii «Obespechenie bezopasnosti AES s VVER»*, Podol'sk, 28–31 maya 2013 [Proceedings of the 8th International Scientific and Technical Conference "Discussion of the Safety of NPPs with VVER" Podolsk, Russia, May 28–31, 2013]. Podol'sk: OKB «GIDROPRESS» [Podolsk: OKB “GIDROPRESS”]. 2013. P. 121–123 (in Russian).
- [23] Attestacionnyj pasport № 182 ot 28.10.2004. Programmnyj kompleks PROSTOR (versiya 1) [Attestation Passport No. 182 dated October 28, 2004. PROSTOR Software Package (version 1)] - Moskva: Federal'naya sluzhba po ekologicheskomu, tekhnologicheskemu i atomnomu nadzoru (Rostekhnadzor) [Moscow: Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision (Rostekhnadzor)], 2004 (in Russian).

Estimates of Flow Rate of Pure Condensate when WWER-1200 Reactor Plant is Brought to the Minimum Controlled Power Level after the Emergency Protection Triggering

A.I. Al-Shamayleh¹, D.A. Solovyov², A.A. Semenov³, N.V. Shchukin⁴, A.L. Lobarev⁵,
D.A. Plotnikov⁶, V.S. Potapov⁷

National Research Nuclear University «MEPhI», Kashirskoye shosse, 31, Moscow, Russia 115409

¹ORCID iD: 0000-0002-0283-6798

WoS Researcher ID: AFT-1761-2022

e-mail: asema7078@gmail.com

²ORCID iD: 0000-0002-0507-0839

e-mail: vulture@inbox.ru

WoS Researcher ID: AFT-1248-2022

³ORCID iD: 0000-0002-5495-3662

WoS Researcher ID: AFT-1728-2022

e-mail: dozaand@main.ru

⁴ORCID iD: 0000-0002-4228-7228

WoS Researcher ID: AFT-1678-2022

e-mail: nvshchukin@mephi.ru

⁵ORCID iD: 0000-0001-5258-357

WoS Researcher ID: AFT-1155-2022

e-mail: lobarev.alexey@gmail.com

⁶ORCID iD: 0000-0001-9387-170X

WoS Researcher ID: AFT-1105-2022

e-mail: plotnikov@secnrs.ru

⁷ORCID iD: 0000-0001-8004-8212

WoS Researcher ID: AAH-5193-2021

e-mail: volodya.potapov.39@mail.ru

Abstract – Activation of the emergency protection entails the entering of boric acid solution into the reactor core to the parking value, then the control rods are raised, after which it is possible to obtain permission to start the reactor. The first stage of reaching the minimum controlled level (MCL) of power is feeding with pure condensate to the start-up interval at a high injection rate, the second is mixing the 1st circuit and then entering the pure condensate but at a low speed. At the same time, the technical regulations for safe operation indicate that the flow rate of pure condensate in the start-up interval should not exceed the flow rate of pure condensate to compensate for xenon poisoning by more than 10 t / h, and the input rate of positive reactivity should not exceed $0.02 \beta_{\text{eff}}/\text{min}$. At the same time, it is not entirely clear how to estimate the flow rate of pure condensate in the start-up interval, since there is no equipment on the power unit that measures the magnitude of xenon poisoning and the rate of reactivity input. This article will answer the question of what is the permissible flow rate of pure condensate the operator can use in the start-up interval in the presence of xenon processes.

Keywords: WWER-1200, MCL, reactor emergency protection, pure condensate, technological regulations for safe operations.