

Чорнофостова К.В.

Одеський національний політехнічний університет

Беглов К.В.

Одеський національний політехнічний університет

МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІНИ КОНЦЕНТРАЦІЇ БОРНОЇ КИСЛОТИ В ТЕПЛОНОСІЇ ПЕРШОГО КОНТУРУ ЕНЕРГОБЛОКУ АЕС З ВВЕР-1000

У статті розглянуто математичну модель концентрації борної кислоти у першому контурі енергоблоку АЕС з реактором ВВЕР-1000. Особливістю моделі є нелінійна залежність динамічних властивостей об'єкта від витрати розчину кислоти або чистого конденсату. Розроблена імітаційна модель дозволяє дослідити реакцію об'єкта керування під час безперервної зміни керувального впливу від позитивного, тобто витрати борної кислоти, до негативного, тобто витрати конденсату. Зроблено висновки щодо зміни концентрації борної кислоти, яка у разі введення концентрованої борної кислоти та у разі підживлення чистим конденсатом відбувається за різними залежностями (під час використання безперервного способу керування).

Вагомою задачею на атомних електростанціях з реакторами типу ВВЕР є контроль певних параметрів теплоносія. Контроль вмісту борної кислоти в технологічних розчинах енергоблоків виступає одним із них (параметрів). Як результат, знаним методом регулювання є зміна концентрації БК у теплоносії першого контуру АЕС.

Борне регулювання – управління інтенсивністю ланцюгової реакції поділу (реактивністю) в дво-контурних водо-водяних ядерних реакторах. Призначено для компенсації повільних змін реактивності під час експлуатації реактора. Борне регулювання здійснюється зміною концентрації борної кислоти у першому контурі шляхом введення концентрованої борної кислоти (КБК) або чистого конденсату (ЧК) із системи підживлення-продувки. За збільшення концентрації борної кислоти у першому контурі відбувається зниження швидкості ядерної реакції і рівня потужності, а за зниження концентрації – збільшення потужності. Застосування борного регулювання дозволяє знизити нерівномірність енерговиділення в активній зоні реактора і збільшити час роботи реактора на номінальному рівні потужності. Тому виникає задача синтезу імітаційної моделі для дослідження концентрації борної кислоти в теплоносії першого контуру енергоблоку АЕС, що дозволяє відстежити зміну концентрації БК.

Ключові слова: енергоблок АЕС, маневрування, борне регулювання, концентрація борної кислоти, нелінійна модель.

Постановка проблеми. У нинішній час ситуація на енергоринку України склалася така, що енергоблоки АЕС залучають до компенсації добових коливань споживання електричної енергії. Конструкція енергетичної установки з реакторами типу ВВЕР-1000 не передбачає її використання у маневрових режимах. Але дослідження [1–4] показують, що під час виконання деяких умов та обмежень це можливо.

Одною з таких умов є використання борного регулювання для оперативної зміни потужності реактора за обмеження діапазону регулювання від 100 до 85%.

Зараз змінення потужності виконується оперативним персоналом у ручному режимі. Це приводить до великого психофізичного навантаження

на персонал АЕС та врешті-решт може спричинити помилкові дії, що приведе до аварійної ситуації. Тому необхідно синтезувати автоматизовану систему регулювання потужності енергоблоку за допомогою використання борного регулювання. Перша задача, яку необхідно вирішити при цьому, – це побудувати адекватну математичну модель, що враховує вплив витрати кислоти або чистого конденсату на статичні та динамічні властивості об'єкта керування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Математичні моделі концентрації борної кислоти від витрати кислоти чи конденсату розглянуті в роботах [5, с. 22] і [6, с. 18–24].

У роботі [5, с. 22] розглянута залежність концентрації в АЗ за введення БК та за

введення чистого конденсату в теплоносій першого контуру. Наведено криві розгону по вказаних каналах та обґрунтовано використання безперервного способу керування замість ступінчастого.

У роботі [6, с. 18–24] побудована математична модель, яка враховує різницю статичних та динамічних властивостей за зміни знаку керувального впливу. Ця модель побудована у припущенні, що витрати кислоти та конденсату максимальні.

Але в процесі регулювання витрати технологічних потоків змінюються в широких межах. Тому синтезовані раніше моделі є адекватними лише в обмеженому діапазоні витрат.

Постановка завдання. Таким чином, метою роботи є моделювання зміни концентрації борної кислоти в теплоносій першого контуру енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Отримати залежність постійної часу від зміни витрати борної кислоти $G_{bor/bor}$ та постійної часу від зміни витрати чистого конденсату $G_{bor/kon}$.
2. Синтезувати імітаційну модель для дослідження концентрації борної кислоти в теплоносій першого контуру енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000 за безперервної зміни витрат технологічних потоків.

На практиці борне регулювання (БР) полягає в дискретному введенні певної кількості концентрованої борної кислоти (КБК) або чистого конденсату (ЧК) до отримання бажаного результату, а оцінку своїх дій по БР оперативний персонал здійснює зазвичай за зміною рівня потужності, аксіального офсету і значенням коефіцієнтів нерівномірності енерговиділення, а не за значенням концентрації борної кислоти. Якщо необхідну кількість концентрованої борної кислоти або чистого конденсату вводити монотонно, то кількість рідких радіоактивних відходів знижується [7, с. 3021–3026].

Зміна концентрації борної кислоти в теплоносій у випадку підживлення концентрованою борною кислотою при номінальній витраті борної кислоти (Рисунок 1(а)):

1. $\Delta G_{bor/bor} = 60 \text{ м/год}$;
2. $\Delta G_{bor/bor} = 50 \text{ м/год}$;
3. $\Delta G_{bor/bor} = 40 \text{ м/год}$;
4. $\Delta G_{bor/bor} = 30 \text{ м/год}$;
5. $\Delta G_{bor/bor} = 20 \text{ м/год}$;
6. $\Delta G_{bor/bor} = 10 \text{ м/год}$.

Зміна концентрації борної кислоти в теплоносій у випадку підживлення чистим конденса-

том при номінальній витраті чистого конденсату (Рисунок 1(б)):

1. $\Delta G_{bor/kon} = 50 \text{ м/год}$;
2. $\Delta G_{bor/kon} = 40 \text{ м/год}$;
3. $\Delta G_{bor/kon} = 30 \text{ м/год}$;
4. $\Delta G_{bor/kon} = 20 \text{ м/год}$;
5. $\Delta G_{bor/kon} = 10 \text{ м/год}$.

Для моделювання цієї залежності були ідентифіковані та описані такими диференціальними рівняннями:

– за введення розчину борної кислоти:

$$T_1 * \frac{dC_{bor}}{dt} + \Delta C_{bor} = k_1 * \Delta G_{bor}$$

– за введення чистого конденсату:

$$T_2 * \frac{dC_{bor}}{dt} + \Delta C_{bor} = k_2 * \Delta G_{H_2O}$$

де C_{bor} – концентрація борної кислоти, $\frac{г}{кг}$;
 k_1, k_2 – коефіцієнти передачі, $\frac{г/кг}{м/год}$;
 T_1, T_2 – постійні часу, с;

ΔG_{bor} – зміна витрати розчину борної кислоти, $\frac{т}{год}$;

ΔG_{H_2O} – зміна витрати чистого конденсату, $\frac{т}{год}$.

У рамках дослідження було прийнято, що номінальна витрата борної кислоти $\Delta G_{bor} = 40 \frac{т}{год}$, номінальна витрата чистого конденсату $\Delta G_{H_2O} = 40 \frac{т}{год}$ [5, с. 22]

Для таких витрат коефіцієнти передачі об'єкта регулювання незмінні і дорівнюють:

$$k_1 = 40 \frac{г/кг}{м/год}, k_2 = 16 \frac{г/кг}{м/год};$$

Оскільки введення борної кислоти вважаємо монотонним, то постійна часу T для кожного з випадків буде різною. Отримаємо її, опрацювавши графіки (використовуючи метод найменших квадратів), зображені на Рисунку 1.

Побудуємо графіки залежності постійної часу T від зміни витрати борної кислоти G_{bor} :

За графіками можна зробити висновок, що зміна витрати борної кислоти G_{bor} відбувається за степеневу залежністю (Рисунок 2) та за експоненційною залежністю (Рисунок 3).

Далі синтезуємо імітаційну модель для дослідження концентрації борної кислоти в теплоносій першого контуру.

Для цього в середовищі імітаційного моделювання Simulink пакету MATLAB було розроблено схему зміни концентрації борної кислоти. Схема представлена на рисунку 4.

У результаті було отримано графіки:

З графіків видно, як змінюється концентрація БК в теплоносії у разі введення концентрованої борної кислоти (Рисунок 5) та у разі підживлення чистим конденсатом (Рисунок 6) за використання безперервного способу керування.

Висновки. У роботі було отримано залежність постійної часу від зміни витрати борної кислоти $G_{bor/bor}$ та залежність постійної часу від зміни витрати чистого конденсату $G_{bor/kon}$. Можна зробити висновки, що зміна витрати борної кислоти

G_{bor} відбувається за степеневою залежністю та за експоненційною залежністю.

Також було проведено синтез імітаційної моделі для дослідження концентрації борної кислоти в теплоносії першого контуру енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000 за безперервної зміни витрат технологічних потоків. Це дало змогу отримати графіки часових залежностей, де видно, як змінюється концентрація борної кислоти в теплоносії у разі введення концентрованої борної кислоти та у разі підживлення чистим конденсатом за використання безперервного способу керування.

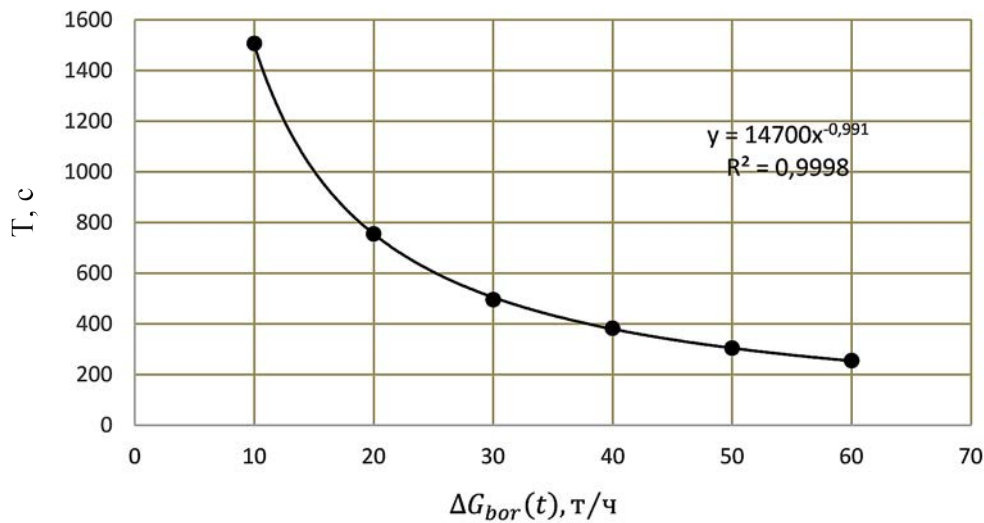


Рис. 2. Графік залежності постійної часу T від зміни витрати борної кислоти у разі підживлення концентрованою борною кислотою $G_{bor/bor}$

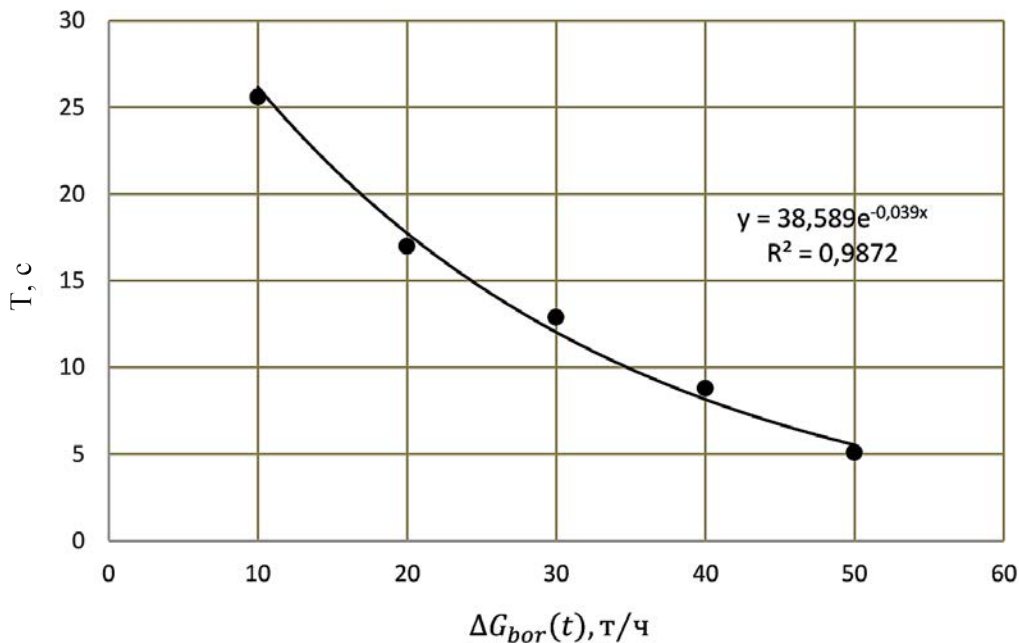


Рис. 3. Графік залежності постійної часу T від зміни витрати борної кислоти у випадку підживлення чистим конденсатом $G_{bor/kon}$

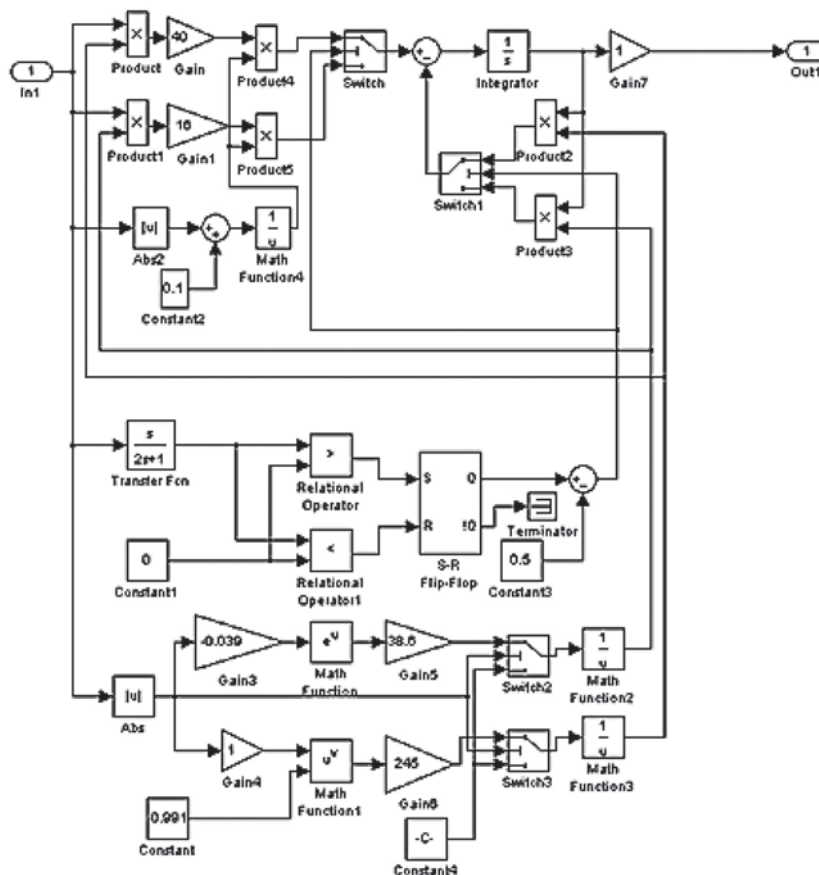


Рис. 4. Схема моделювання зміни концентрації борної кислоти

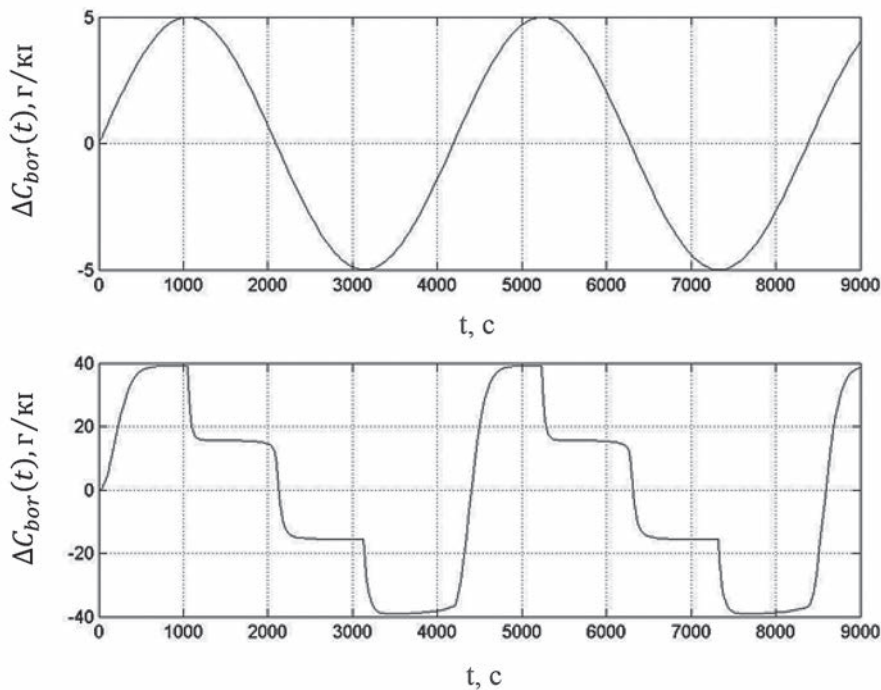
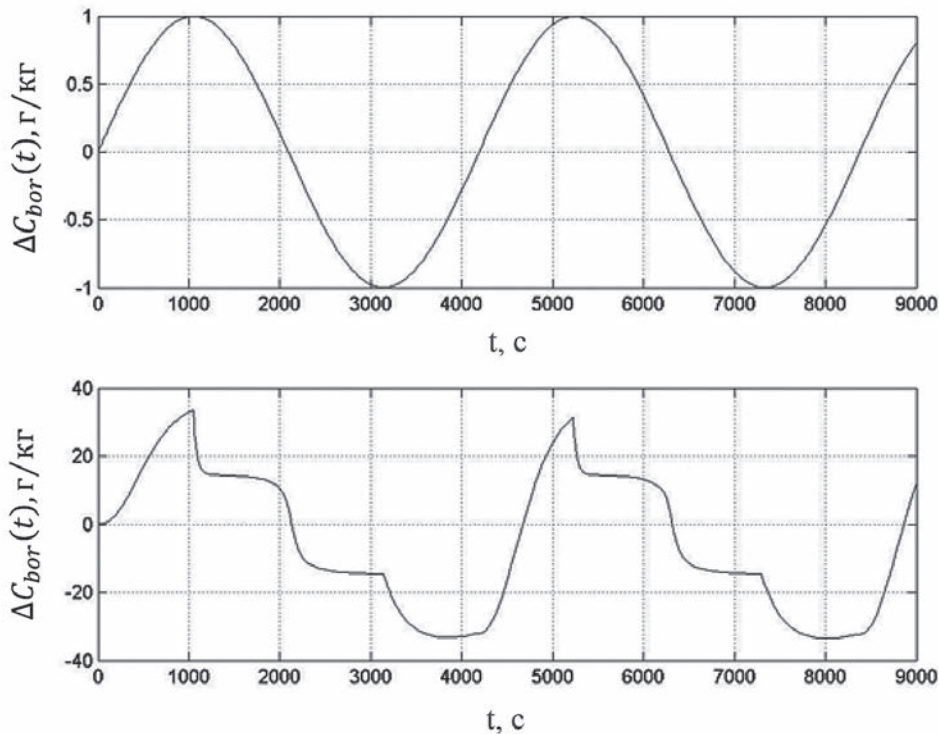


Рис. 5. Часові залежності-вхідний і вихідний сигнали. Зміна концентрації борної кислоти в теплоносії у разі підживлення концентрованою борною кислотою за монотонного введення в теплоносії



**Рис. 6. Часові залежності-вхідний і вихідний сигнали.
Зміна концентрації борної кислоти в теплоносії у разі підживлення
чистим конденсатом за монотонного введення в теплоносії**

Список літератури:

1. Беркович В.М., Горохов В.Ф., Татарников В.П. О возможности регулирования мощности энергосистемы с помощью атомных электростанций. *Теплоэнергетика*. 1974. № 6. С. 16–19.
2. Игнатенко Е.И., Пыткин Ю.Н. Маневренность реакторов типа ВВЭР. Москва : Энергоатомиздат, 1985. 83 с.
3. Баскаков В.Е. Алгоритм эксплуатации энергоблока с ВВЭР в поддержании суточного баланса мощности энергосистемы. *Труды Одесского политехнического университета*. Одесса, 2007. Вып. 2(28). С. 56–59.
4. Pelykh S.N. Cladding rupture life control methods for a power-cycling WWER-1000 nuclear unit / S.N.Pelykh, M.V. Maksimov. *Nuclear Engineering and Design*. 2011. Vol. 241, № 8. P. 2956–2963.
5. Медведєв Р.Б., Сангінова О.В. Оптимальне керування процесом зміни концентрації борної кислоти в теплоносії першого контуру АЕС з ВВЕР-1000. *Наукові вісті Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут"*. 2002. № 2 (22). С. 22.
6. Волошкіна О.О., Беглов К.В. Плахотнюк О.А. Дослідження регулятора концентрації рідкого поглинача енергоблоку АЕС. *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*. 2015. Т. 7. № 4. С. 18–24.
7. Maksimov M.V. Model of cladding failure estimation for a cycling nuclear unit / M.V. Maksimov, S.N. Pelykh, O.V. Maslov, V.E. Baskakov; *Nuclear Engineering and Design*, 2009. Vol. 239, № 12. P. 3021–3026.
8. Харабет О.М. Вивчення класичної теорії автоматичного управління за допомогою сучасного персонального комп'ютера : навч. посіб. Одеса : Бахва, 2014. 188 с.
9. Сучасні технології управління : монографія : в 2 т. / під заг. ред. С.В. Купрієнко ; Sworld. Одеса : Купрієнко С.В., 2012. 179 с.
10. Фощ Т.В., Максимов М.В., Никольский М.В. Анализ влияния методов управления мощностью энергоблока с водо-водяным реактором на аксиальный офсет. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2014. №2(8). С.19–27.
11. Аниканов С.С., Дунаев В.Г., Митин В.И. Управление энергораспределением ВВЭР-1000 в маневренном режиме. *Атомная энергия*. 1993. Т. 75, № 1. С. 3–8.

12. Чмелев Е.И. Давидченко Д.В., Беглов К.В. Исследование каскадной автоматизированной системы регулирования мощности энергоблока атомной электростанции. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Т. 29. № 1. С. 137–142

13. Кокол Е.А. Оптимальное управление мощностью ВВЭР-1000 за счет целевого выбора программы регулирования. *Автоматика 2015: XXII Междунар. конф. по автоматическому управлению*. (Одесса, 10–11 сентября 2015 г.). Одесса, 2015. С. 119–120.

Chornofostova K.V., Behlov K.V. MODELING OF CHANGE OF BORIC ACID CONCENTRATION IN THE FIRST CIRCUIT OF THE POWER PLANT OF WWER-1000 POWER PLANT

The article describes mathematical model of boric acid concentration in the first circuit of a WWER-1000. The peculiarity of the model is the nonlinear dependence of the dynamic properties of the object on the flow of acid solution or pure condensate. Developed model allows us to investigate the reaction of control object with continuous change of control influence from positive, that is consumption of boric acid, to negative, that is consumption of condensate. Conclusions were made regarding the change in the concentration of boric acid, which in the case of the introduction of concentrated boric acid and in the case of feeding with pure condensate has different depending (using a continuous control method).

An important task at nuclear power plants with WWER reactors is to control certain coolant parameters. Control of boric acid content in technological solutions of power units is one of them (parameters). As a result, a known method of regulation is to change the concentration of BA in the coolant of the first circuit of the NPP.

Boron control is the control of the intensity of the fission chain reaction (reactivity) in double-circuit water-water nuclear reactors. Assigned to compensate for slow changes in reactivity during the operation of the reactor, it is carried out by changing the concentration of boron (boric acid) in the water of the first circuit. Boron regulation is carried out by changing the concentration of boric acid in the first circuit by introducing concentrated boric acid or pure condensate from the feed-purge system. Increasing the concentration of boric acid in the first circuit reduces the rate of nuclear reaction and the level of power, and with a decrease in concentration – an increase in power. The use of boron control allows to reduce the irregularity of energy release in the reactor core and to increase the reactor operating time at the rated power level. Therefore, there is a problem synthesis of a simulation model to study the concentration of boric acid in the coolant of the first circuit of the NPP unit, allowing us to track the change in the concentration of boric acid.

Key words: NPP unit, maneuvering, regulation of boric acid, boric acid concentration, nonlinear model.