

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY

<https://doi.org/10.26583/gns-2025-01-05>

EDN RYMTXH

Оригинальная статья / Original paper



Многоузловая модель динамики реактора ВВЭР-1200 для синтеза системы автоматического регулирования

С.С. Правосуд

АНО ДПО Техническая академия Росатома, г. Обнинск, Российская Федерация
Северский Технологический Институт НИЯУ МИФИ, г. Северск, Российская Федерация

✉ ssepravosud@rosatom.ru

Аннотация. В данной работе предложена и смоделирована в среде MATLAB многоточечная модель динамики ядерного реактора ВВЭР-1200, состоящая из различной совокупности моделей многоточечной кинетики, определенной в рамках подхода связанных реакторов Эйвери в аксиальном направлении. Количество рассмотренных моделей составляет от двух до двадцати. Для более точного описания динамических режимов работы реактора модель была расширена теплогидравлической моделью Манна, в рамках которой предполагается, что к одному топливному узлу примыкает два узла последовательных узла теплоносителя. Для моделирования суточных маневренных режимов были учтены пространственные ксеноновые колебания и введен параметр Axial Xenon Oscillation Index. В работе также предложена новая математическая многоузловая модель воздействия борной кислоты, полученная из модели изменения концентрации борной кислоты в геометрии канала. Данная модель связана с моделью теплогидравлических процессов через массовый расход теплоносителя. Результаты численного моделирования в двух экспериментах: при изменении положения 12 группы органов регулирования системы управления и защиты, а также концентрации жидкого поглотителя в теплоносителе первого контура показывают, что статистическая точность предложенной модели является более чем удовлетворительной в сравнении с многофункциональным тренажером, а общий вид переходных процессов согласуется с физическими представлениями. Представленная работа способствует дальнейшему развитию связанных в нейтронно-физическом смысле точечных моделей ядерного реактора для улучшения синтеза автоматического регулятора мощности.

Ключевые слова: ВВЭР, динамика реактора, моделирование, MATLAB, многоузловая модель, многоточечная кинетика, режим следования за нагрузкой, модель Эйвери, модель Манна, аксиальный офсет, ксеноновые колебания, верификация.

Для цитирования: Правосуд С.С. Многоузловая модель динамики реактора ВВЭР-1200 для синтеза системы автоматического регулирования. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(1):40–59. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-01-05>

For citation: Pravosud S.S. Multi-node model of VVER-1200 reactor dynamics for automatic control system synthesis. *Nuclear Safety*. 2025;15(1):40–59. (In Rus.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-01-05>

Multi-node model of VVER-1200 reactor dynamics for automatic control system synthesis

Sergei S. Pravosud

Rosatom Technical Academy, Obninsk, Russian Federation
Seversk Technological Institute the branch of the National Research Nuclear University «MEPhI», Seversk,
Russian Federation

✉ ssepravosud@rosatom.ru

Abstract. This paper presents multipoint kinetics of the VVER-1200 nuclear reactor model determined under the Avery coupled reactors formulation. Different numbers, from two to twenty, of axial nodes are modelled in MATLAB. For a more precise description of the transient's nature, this model was extended by Mann's thermal hydraulic model. Within the frame of Mann's approach, one fuel node is adjacent to two coolant nodes. For daily maneuvering modes space-dependent xenon oscillations are considered and the Axial Xenon Oscillation Index is introduced. This paper also intro-

duces the novel nodal mathematical model of the boron acid which is coupled with thermal hydraulic model by coolant mass flow rate. The computational results show that the accuracy of the proposed model is more than satisfactory, and general assumptions about transients align with their physical definitions. This research contributes to the advancement of the point-like nuclear reactor modeling for further improvement of the automatic power controller design.

Keywords: VVER, reactor dynamics, modelling, MATLAB, multi-node model, multipoint kinetics, load-following mode, Avery's model, Mann's model, axial offset, xenon oscillations, verification.

Введение

К 2050 г. ядерная энергия по ожиданиям МАГАТЭ станет доминирующей на мировом энергетическом рынке, и реалистичные прогнозы указывают на значительное увеличение мощности, вырабатываемой АЭС по всему миру – до 792 ГВт для удовлетворения растущего спроса на низкоуглеродную электроэнергию. Поскольку страны стремятся сократить выбросы парниковых газов, роль передовых ядерных технологий становится все более важной [1].

Современные исследования подчеркивают важность внедрение сложных стратегий управления для повышения безопасности и эффективности реакторов с водой под давлением (PWR). Передовые системы управления, например, методы на основе нейронных сетей (Neural Networks Based Control) для реакторов с водой под давлением, показаны в работе Жоу и Тана [2]. Авторами рассмотрены, среди прочего, нейро-ПИД управление и нейро-предиктивное-ПИ управление. В стратегии нейро-ПИД управления параметры классического ПИД регулятора подстраиваются под изменяющуюся динамику объекта управления в режиме реального времени для оптимизации производительности и снижения рисков, связанных с потенциальными авариями. В стратегии нейро-предиктивного-ПИ управления прогнозирующая функция нейронной сети объединена с классическим ПИ-регулятором. При таком использовании нейронная сеть имеет две основные функции: первая – использование в качестве модуля прогнозирования для оптимизации параметров обычного ПИ-регулятора, вторая – использование в контуре системы управления для прогнозирования изменения параметров сложной и нелинейной системы такой как ядерный реактор. Стратегия нейро-предиктивного-ПИ управления может быть реализована на рос-

сийских ВВЭР-1200, так как подавление аксиальных ксеноновых колебаний с помощью автоматического регулятора мощности (АРМ), в основе которого лежит классический пропорционально-интегральный закон управления, без привлечения дополнительных управляющих воздействия не позволяет удерживать значение аксиального офсета в границах офсетномощностной диаграммы [3].

Сравнительный обзор моделирования современных стратегий управления, таких как управление на нечеткой логике (Fuzzy Logic Control), управление в скользящем режиме (Sliding Mode Control), линеаризация обратной связью (Feedback Linearization Control), прогнозирующее управление моделью (Model Predictive Control), глубокое обучение (Deep Learning), обучение с подкреплением (Reinforcement Learning), алгоритм суперскручивания (Super Twisting Algorithm) и других, проведен Донгом и др. [4]. Ими также отмечено, что моделирование стратегии управления является важной частью, гарантирующей устойчивость замкнутой системы, стабильные рабочие точки и удовлетворительные переходные процессы. С другой стороны, адекватность разработанных стратегий управления сильно зависит от выбора математической модели объекта управления, и в настоящий момент используются два основных подхода:

- 1) моделирование на основе физических законов (Mechanism-Based Modeling), базирующийся на уравнении кинетики нейтронов, сопряженной с моделью теплогидравлических процессов. Такие модели часто представляют в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ), системы дифференциальных уравнений в частных производных (ДУЧП), а также передаточных функций;

2) второй тип моделей представляют собой модели на основе данных (черный ящик), и определение параметров модели с заданной топологией происходит исключительно на основе эксплуатационных данных.

Следует отметить, что оба подхода к моделированию имеют недостатки: ухудшение производительности моделей на основе физических законов в основном вызвано невозможностью смоделировать точную динамику, а также неопределенностью параметров, в то время как ухудшение производительности моделей на основе данных в основном обусловлено отсутствием адекватного числа обучающих выборок, поэтому в некоторых случаях используются гибридные модели, нивелирующие вышеперечисленные недостатки.

Так как ядерный реактор является объектом с распределенными параметрами [5], то использование ДУЧП для моделирования его динамики выглядит оптимальным. Например, уравнение распределения тепла в ТВЭЛ в простейшем случае имеет следующий вид (1):

$$C_p \rho \frac{\partial z(x, t)}{\partial t} = K_0 \frac{\partial^2 z(x, t)}{\partial x^2}, x \in (0, L), t \geq 0 \quad (1)$$

где C_p – удельная теплоемкость стержня;

ρ – плотность стержня;

K_0 – теплопроводность стержня;

L – длина стержня.

Уравнение (1) также может описывать диффузию нейтронов. Получить передаточную функцию для систем с распределенными параметрами, такими как уравнение (1), в целом возможно, однако ее вид, а также расположение нулей и полюсов передаточной функции, сильно зависит от выбора граничных условий, что естественно будет оказывать значительное влияние на производительность регулятора системы управления [6]. В исследовании Бриджеса [7] получены передаточные функции для двугруппового уравнения диффузии нейтронов с обратными связями по температуре топлива и замедлителя в отношении расположения внешнего источника нейтронов в активной зоне, однако автор считает их аналитический вид достаточно громоздким для включения в данную статью. В таком случае использование

системы ОДУ (моделей со сосредоточенными параметрами) выглядит предпочтительнее.

В своей работе Шимжит [и др.] отмечает, что модели, используемые для детальных расчетов активной зоны реактора, не всегда подходят для синтеза системы управления, требующей в большинстве случаев моделей низкого порядка [8]. Среди различных методов моделирования узловый метод (Nodal Method) или многоточечная модель кинетики (Multipoint Kinetics) больше подходит для данной задачи благодаря своей простоте, а сама структура уравнений позволяет прямо выбирать переменные для представления в форме пространства состояний. Полученная таким образом модель усовершенствованного реактора на тяжелой воде АНWR имеет гораздо меньший порядок, чем та, которая использовалась для детального расчета. Также отмечено, что схема, состоящая из 17 узлов, будет подходящей для исследований, связанных с пространственным управлением АНWR, поскольку она включает в себя все основные свойства линейной системы, и в то же время демонстрирует удовлетворительную точность моделирования стационарного состояния и переходных процессов.

Ванг с соавторами представил узловую модель реактора с водой под давлением AP-1000, являющуюся актуальной задачей ввиду значительного отношения высоты активной зоны к ее диаметру [9]. Предложенная узловая модель основана на разделении активной зоны реактора AP1000 на ряд узлов как вдоль аксиальной оси реактора, так и в радиальном направлении. Оптимальная схема деления представляет собой 14 аксиальных узлов и 6 радиальными узлов, соответственно. Результаты численного моделирования показали, что разработанная модель может довольно точно отражать не только осредненную информацию по объему активной зоны, но и информацию о пространственных распределениях, такую как аксиальный офсет и профиль распределения температуры топлива.

В своей работе Донг [и др.], мотивированные фактом недостатка классической модели динамики реактора ВТГР, основанной на лишь точечной кинетике, и необходимо-

стью получения более точной модели активной зоны для моделирования системы управления, получили многоточечную модель кинетики нейтронов, а также представили соответствующую многоузловую теплогидравлическую модель, суммарно состоящую из 10 узлов в аксиальном направлении [10]. Результаты численного моделирования показали, что предлагаемая модель активной зоны имеет высокую точность описания переходных процессов при ступенчатом изменении реактивности, а также при изменениях расхода и температуры гелия на входе в активную зону. Важной особенностью разработанной модели является то, что она позволяет отслеживать изменение аксиального офсета.

В своих работах Пучальски с соавторами [11,12] расширили теплогидравлическую модель Манна [13] с использованием коэффициентов распределения тепловой мощности, получив в итоге многоузловую модель типового реактора PWR. Сама модель Манна предполагает, что к одному топливному узлу примыкает два узла теплоносителя, что демонстрирует лучшую производительность по сравнению с традиционной моделью, где к одному топливному узлу примыкает один узел теплоносителя, а температура узла теплоносителя предполагается равной полусумме входной и выходной его температур [14]. Главным преимуществом подхода расширенной многоузловой модели, полученной Пучальски с соавторами, является то, что температуры в различных зонах активной зоны реактора могут быть оценены более точно, что позволяет разработать более совершенные системы управления активной зоной реакторов с водой под давлением. Более того, полученная модель была кросс-верифицирована с ПО Apros [15], которое используется для моделирования переходных процессов.

При всех вышеперечисленных достоинствах, представленные модели [8–12] не лишены своих недостатков: математическая модель реактора ВТГР не включает в себя обратные связи по ксенону, модель реактора АНWR не включает в себя явную модель теплогидравлических процессов, многоузловая типовая модель PWR не рассматривает в

явном виде многоточечную кинетику, а лишь использует коэффициенты энерговыделения в различных узлах ТВЭЛ. Модель AP-1000 выглядит более точной с точки зрения моделирования физических процессов, однако она, как и другие модели, не включает в себя явную модель органов регулирования, что не позволяет исследовать режим следования за нагрузкой и установить передаточную функцию в координатах «положение ОР СУЗ – мощность реактора» или «положение ОР СУЗ – аксиальный офсет». Для устранения последнего недостатка автором в [16] предложена многоточечная модель ВВЭР-1200 и явная модель органов регулирования, использующая комбинацию функций знака sign и учитывающая нелинейную характеристику органов регулирования по высоте, позволяющая воздействовать на узлы последовательно при их вводе. Однако, такая нелинейная модель для простоты моделирования переходных процессов была охвачена лишь мощностной обратной связью. Более того, в работах [9,11,12,16] не учитывается возможность борного регулирования.

Большинство работ, ставящих целью разработку системы управления аксиальным офсетом в режиме следования за нагрузкой, ограничиваются либо двумя, либо четырьмя аксиальными узлами. Например, Маусказеми предложил адаптацию параметров ПИД-регулятора для двухточечной модели типового реактора PWR используя оптимизацию методом роя частиц [17]. Афтаб и Луан [18] смоделировали регулятор на нечеткой логике методом Такаги–Сугено для управления мощностью для ВВЭР-1000 для достижения точного следования за нагрузкой в ситуациях с различными внешними возмущениями и внутренними неопределенностями модели на основе двухточечного подхода. Для поддержания аксиальных ксеноновых колебаний в заданных пределах, Элиаси [и др.] предложили робастное управление с предсказанием, основываясь на двухточечной модели [19], в то время как Рафизель [и др.] ограничились дробно-пропорциональным ПИД законом регулирования [20]. Абдулрахим с соавторами использовали адаптивное управление в скользящем режиме второго порядка, способное эффективно подавлять

ксеноновые колебания в режиме следования за нагрузкой, базируясь на верифицированной четырехточечной модели реактора ВВЭР-1000 [21]. Исходно данная модель была предложена Зайдабади и Ансарифаром [22,23] для адаптивного робастного управления в режиме следования за нагрузкой и моделирования робастного наблюдателя состояний для подавления возникающих ксеноновых колебаний. Используя четырехточечную модель реактора ВВЭР-1000 Афтаб [и др.] смоделировал адаптивный нечеткий регулятор и продемонстрировал его преимущество перед традиционным ПИД регулятором в режиме следования за нагрузкой [24]. Используя многоузловой подход, Зареи [25] смоделировал классические ПИ-регуляторы для МИМО-моделей.

Приведенные выше работы [17–25] рассматривали возможность оптимального управления только с использованием органов регулирования СУЗ, хотя Зареи [26] обосновал в частотной области, что использование борного поглотителя, способное воздействовать мгновенно на все аксиальные узлы, предпочтительнее для подавления ксеноновых колебаний, хотя им и не была использована явная модель борного поглотителя: ее воздействие было представлено только в виде коэффициентов матрицы возмущения, воздействующей сразу на верх и нижнюю активную зону модели реактора, представленной в форме пространства состояний.

Исходя из вышеперечисленного, в данной работе предложены и исследованы различные многоузловые модели реактора ВВЭР-1200, состоящие из различного числа аксиальных узлов – от двух до двадцати, комбинирующие многоточечную кинетику с расширенной теплогидравлической моделью Манна, а также охваченные обратной связью

по ксенону для исследования пространственных ксеноновых колебаний, учитывающие явную модель органов регулирования СУЗ, а также представлена многоузловая модель борной кислоты, использующая подход Р. Манна «two well-stirred tanks in series», и влияющая последовательно на реактивность в аксиальных узлах. Моделирование проводилось в MATLAB Simulink и все модели написаны на языке MATLAB как S-functions lv. 2.

Многоточечная модель кинетики Эйвери

В данной работе многоточечная модель кинетики реактора основывается на теории связанных реакторов, предложенной Эйвери [27] в 1958 г., которая затем была расширена Беллени-Моранте [28] в 1964 г. и уточнена Коматой [29] в 1969 г. Детальное сравнение многоточечного подхода Эйвери с моделью точечной кинетики, а также с многоточечным подходом Кобояши [30], который развил идеи Эйвери, было проведено Валлочи с соавторами [31]. Они внедрили данные подходы в код APPOLO3 и исследовали переходные процессы в типовом ядерном реакторе на тепловых нейтронах. Полученные результаты показывают, что в рассмотренных случаях имеются незначительные различия между формализмами Эйвери и Кобояши. Также Валлочи с соавторами обосновано, что детальное подразделение активных зон в рассмотренных случаях оказывает небольшое влияние на точность поведения системы. С этой точки зрения важно разделять области с различными свойствами [32], такими как реактор – подкритическая сборка.

Уравнение многоточечной кинетики может быть записано следующим образом (2) [8–10,16–26]:

$$\begin{cases} \frac{dn_j(t)}{dt} = \frac{\rho_j - \beta}{\Lambda} n_j(t) + \sum_{i=1}^3 \lambda_i C_{ji}(t) + \frac{Dv}{\Delta H d} (n_{j+1}(t) + n_{j-1}(t) - 2n_j(t)) \\ \frac{dC_{ji}(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} n_j(t) - \lambda_i C_{ji}(t) \end{cases} \quad (2)$$

где $n(t)$ – плотность тепловых нейтронов (см^{-3});

$C_i(t)$ – концентрация ядер-предшественников запаздывающих нейтронов (см^{-3});

Λ – время жизни нейтронов (сек);

ρ – внешняя реактивность;

β – суммарная доля запаздывающих нейтронов $\beta = \sum_i \beta_i$;

λ_i – постоянная распада i -ой группы ядер – предшественников запаздывающих нейтронов (сек^{-1});

D – коэффициент диффузии между узлами (~ 0.16 см);

v – скорость тепловых нейтронов ($\sim 2.2 \times 10^5 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$);

ΔH – высота узла (см);

d – расстояние между центрами двух соседних узлов (см).

Следует отметить, что в уравнении (2) только соседние узлы связаны между собой на основании диффузионного подхода. В данной работе также используется трегрупповая модель для ядер-предшественников запаздывающих нейтронов, предложенная Скиннером и Коэном [33], хорошо проявившая себя в сравнительном тесте с шести и восьмигрупповыми приближениями, значи-

тельно экономя время вычислений и практически не влияя на статистическую точность результатов [16]. Данный подход был использован и в других работах [17,21–23].

Расширенная модель теплогидравлических процессов Р. Манна

При описании теплогидравлических процессов в активной зоне ядерного реактора необходимо включать уравнения, описывающие сохранение энергии, импульса и массы теплоносителя. Однако общий подход может быть упрощен при допущении, что теплоноситель имеет постоянную плотность, и давление с массовым расходом не изменяются, что позволяет исключить из рассмотрения уравнения для сохранения массы и импульса. Также для дальнейшего упрощения будем считать, что изменение температуры теплоносителя, вызванное его нагревом из-за взаимодействия с тепловыделяющими элементами, происходит только в осевом направлении, а направление теплопередачи от узла топливных элементов к узлам теплоносителя – в радиальном. Для двух топливных узлов и четырех узлов теплоносителя модель Р. Манна может быть представлена в следующем виде (3) [11,12]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{m_T}{2} \gamma_T \frac{d\bar{T}_1(t)}{dt} = \alpha_1 \varepsilon P(t) - K_{\text{тепл}} \frac{S_{\text{пов}}}{2} (\bar{T}_1(t) - \bar{\theta}_1(t)) \\ \frac{m_{\text{TH}}}{4} \gamma_{\text{TH}} \frac{d\bar{\theta}_{11}(t)}{dt} = \alpha_1 \frac{1 - \varepsilon}{2} P(t) + \frac{K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}}}{4} (\bar{T}_1(t) - \bar{\theta}_{11}(t)) - G_{\text{TH}} \gamma_{\text{TH}} (\bar{\theta}_{11}(t) - \theta_{\text{вх}}) \\ \frac{m_{\text{TH}}}{4} \gamma_{\text{TH}} \frac{d\bar{\theta}_{12}(t)}{dt} = \alpha_1 \frac{1 - \varepsilon}{2} P(t) + \frac{K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}}}{4} (\bar{T}_1(t) - \bar{\theta}_{11}(t)) - G_{\text{TH}} \gamma_{\text{TH}} (\bar{\theta}_{12}(t) - \bar{\theta}_{11}(t)) \\ \frac{m_T}{2} \gamma_T \frac{d\bar{T}_2(t)}{dt} = \alpha_2 \varepsilon P(t) - K_{\text{тепл}} \frac{S_{\text{пов}}}{2} (\bar{T}_2(t) - \bar{\theta}_1(t)) \\ \frac{m_{\text{TH}}}{4} \gamma_{\text{TH}} \frac{d\bar{\theta}_{21}(t)}{dt} = \alpha_2 \frac{1 - \varepsilon}{2} P(t) + \frac{K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}}}{4} (\bar{T}_2(t) - \bar{\theta}_{21}(t)) - G_{\text{TH}} \gamma_{\text{TH}} (\bar{\theta}_{21}(t) - \bar{\theta}_{12}(t)) \\ \frac{m_{\text{TH}}}{4} \gamma_{\text{TH}} \frac{d\bar{\theta}_{22}(t)}{dt} = \alpha_2 \frac{1 - \varepsilon}{2} P(t) + \frac{K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}}}{4} (\bar{T}_2(t) - \bar{\theta}_{21}(t)) - G_{\text{TH}} \gamma_{\text{TH}} (\bar{\theta}_{22}(t) - \bar{\theta}_{21}(t)) \end{array} \right. \quad (3)$$

где P – тепловая мощность ядерного реактора (МВт);

$\bar{T}_i$ – среднее значение температуры топливных элементов в узле ($^{\circ}\text{C}$);

ε – доля энергии, выделяющаяся непосредственно в топливе ($\sim 97\%$);

$S_{\text{пов}}$ – площадь поверхности теплообмена (м^2),

$K_{\text{тепл}}$ – коэффициент теплопередачи от топлива к теплоносителю ($\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{ }^{\circ}\text{C}}$);

m_{T} – масса топливных элементов (кг);

γ_{T} – удельная теплоемкость топливных элементов ($\frac{\text{Дж}}{\text{кг } ^{\circ}\text{C}}$);

G_{TH} – массовый расход теплоносителя через реактор ($\frac{\text{кг}}{\text{с}}$);

m_{TH} – суммарная масса теплоносителя в активной зоне (кг);

γ_{TH} – удельная теплоемкость теплоносителя ($\frac{\text{Дж}}{\text{кг } ^{\circ}\text{C}}$);

$\bar{\theta}_{i1}(t), \bar{\theta}_{i2}(t)$ – усреднённые поперек канала теплоносителя температуры в первом и

втором узлах, примыкающие к i -му топливному узлу соответственно ($^{\circ}\text{C}$);

α_i – коэффициент, учитывающий энерговыделение в узле из-за перемещения органов регулирования.

В работах [11,12] приведены расчетные обоснования для определения коэффициента α_i при изменении положения органов регулирования. Однако, использование лишь одноточечной модели кинетики в данных работах не позволяет вычислить аксиальный офсет в явном виде, который определяется как уравнение (4):

$$AO = \frac{P_{\text{верх}} - P_{\text{низ}}}{P_{\text{верх}} + P_{\text{низ}}} \quad (4)$$

где $P_{\text{верх}}, P_{\text{низ}}$ – мощность в верхней и нижней половине активной зоны, соответственно.

Поэтому в данной работе предлагается следующая вариация расширенной модели Р. Манна (5):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{m_{\text{T}}}{2} \gamma_{\text{T}} \frac{d\bar{T}_1(t)}{dt} = \varepsilon P_1(t) - K_{\text{тепл}} \frac{S_{\text{пов}}}{2} (\bar{T}_1(t) - \bar{\theta}_1(t)) \\ \frac{m_{\text{TH}}}{4} \gamma_{\text{TH}} \frac{d\bar{\theta}_{11}(t)}{dt} = \frac{1-\varepsilon}{2} P_1(t) + \frac{K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}}}{4} (\bar{T}_1(t) - \bar{\theta}_{11}(t)) - G_{\text{TH}} \gamma_{\text{TH}} (\bar{\theta}_{11}(t) - \theta_{\text{вх}}) \\ \frac{m_{\text{TH}}}{4} \gamma_{\text{TH}} \frac{d\bar{\theta}_{12}(t)}{dt} = \frac{1-\varepsilon}{2} P_1(t) + \frac{K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}}}{4} (\bar{T}_1(t) - \bar{\theta}_{11}(t)) - G_{\text{TH}} \gamma_{\text{TH}} (\bar{\theta}_{12}(t) - \bar{\theta}_{11}(t)) \\ \frac{m_{\text{T}}}{2} \gamma_{\text{T}} \frac{d\bar{T}_2(t)}{dt} = \varepsilon P_2(t) - K_{\text{тепл}} \frac{S_{\text{пов}}}{2} (\bar{T}_2(t) - \bar{\theta}_2(t)) \\ \frac{m_{\text{TH}}}{4} \gamma_{\text{TH}} \frac{d\bar{\theta}_{21}(t)}{dt} = \frac{1-\varepsilon}{2} P_2(t) + \frac{K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}}}{4} (\bar{T}_2(t) - \bar{\theta}_{21}(t)) - G_{\text{TH}} \gamma_{\text{TH}} (\bar{\theta}_{21}(t) - \bar{\theta}_{12}(t)) \\ \frac{m_{\text{TH}}}{4} \gamma_{\text{TH}} \frac{d\bar{\theta}_{22}(t)}{dt} = \frac{1-\varepsilon}{2} P_2(t) + \frac{K_{\text{тепл}} S_{\text{пов}}}{4} (\bar{T}_2(t) - \bar{\theta}_{21}(t)) - G_{\text{TH}} \gamma_{\text{TH}} (\bar{\theta}_{22}(t) - \bar{\theta}_{21}(t)) \end{array} \right. \quad (5)$$

где P_1, P_2 – мощности, выделяемые в соответствующих узлах на основании многоточечного подхода.

Наглядно разница двух подходов может быть представлена на рисунке (1).

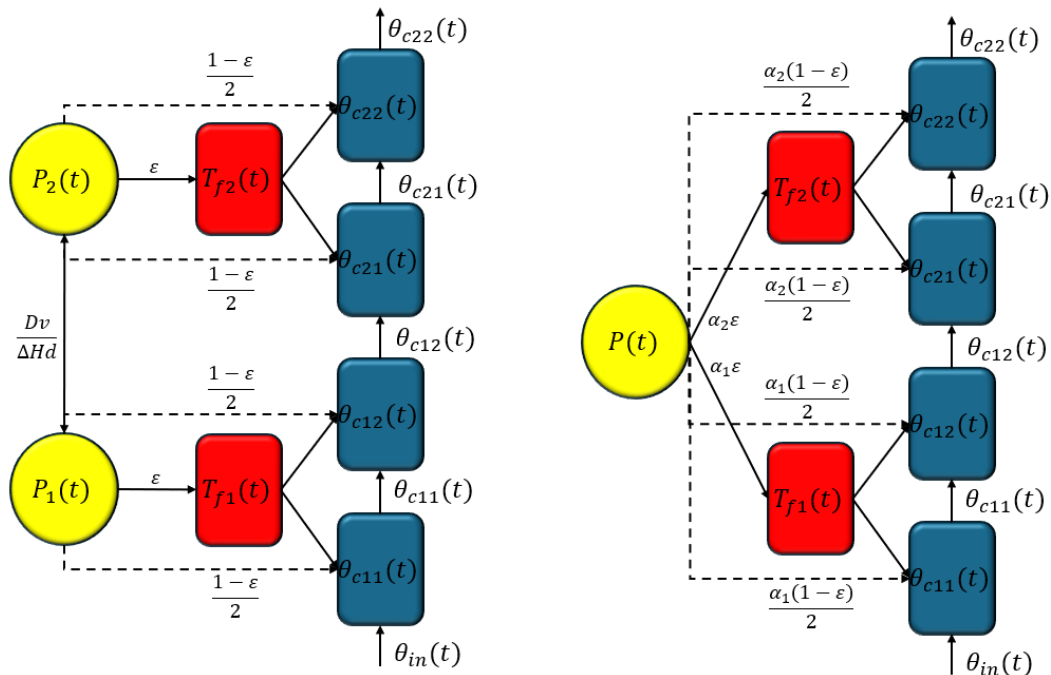


Рисунок 1. Предложенная модель (слева) и подход Пучальски [и др.] (справа)
Figure 1. Suggested approach (left) and approach of B. Puchalski [et. al] (right)

Известно, что температурные эффекты реактивности имеют важный вклад в возможности саморегулирования реактора типа ВВЭР/PWR. При этом коэффициент реактивности по температурам топлива и тепло-

носителя не является постоянной величиной, а зависит, в том числе, от мощности реакторной установки [9]. Эффект реактивности в i -ом узле при изменении температур в нем определим как выражение (6) [18,21–24]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_{Ti}(t) = \left(\frac{P_i}{P_{\text{общ}}} - \frac{4.24}{i} \right) (\bar{T}_i(t) - \bar{T}_{i0}) 10^{-5} \\ \rho_{THi}(t) = \left(\frac{-4P_i}{P_{\text{общ}}} - \frac{17.3}{i} \right) (\bar{\theta}_{i1}(t) - \bar{\theta}_{i10} + \bar{\theta}_{i2}(t) - \bar{\theta}_{i20}) 10^{-5} \end{array} \right. \quad (6)$$

В выражениях (5) введена поправка на использование числа узлов i в соответствии с ранее представленной работой автора [16].

Для определения мощности, выделяющейся в соответствующих узлах $P_1 \dots P_i$ где i – число аксиальных узлов, были использованы данные о линейном энерговыделении по наиболее энергонагруженной ТВС (10-29) с многофункционального тренажера реактора ВВЭР-1200 (АНО ДПО Техническая академия Росатома) производства ИТЦ «ДЖЭТ» Росатома.

В основе математической модели тренажера лежит аттестованный расчетный код

для энергоблоков АЭС с ВВЭР CMS (Compressible Media Solver). Моделирование осуществлялось при перемещении рабочей 12 группы ОР СУЗ и изменении концентрации борного поглотителя в теплоносителе первого контура. При этом мощность реакторной установки варьировалась в пределах 100-80% от номинальной. Полученные данные представлены в таблицах 1 и 2, а также приведены на рисунках 2 и 3 вместе с аппроксимирующими полиномами пятой степени (коэффициент детерминации $R^2 > 0.99$).

При определении мощности в i -ом узле использовался следующий подход: на основании аппроксимирующего полинома для 100% уровня мощности (начало моделирования) на соответствующих высотах были определены значения линейного энерговыделения. Затем эти значения делились на сумму всех значений и таким образом определялась относительное

энерговыделения в процентах % от общей. Полученное число умножалось на общую мощность реакторной установки, что позволяло определить значение мощности в i -ом узле. На рисунке 3 приведены результаты расчета аксиального офсета на основе аппроксимирующих полиномов для всех уровней мощности.

Таблица 1. Экспериментальные параметры при изменении положения 12 группы ОР СУЗ

Table 1. Experimental data while inserting the group 12 of the CPS CR

№ ДПЗ	Линейное энерговыделение по наиболее энергонагруженной ТВС (10–29) $Q_L, \frac{\text{Вт}}{\text{см}}$				
	100%	95%	90%	85%	80%
7	122.9	94.3	81.5	72.4	67.2
6	214.1	181.0	153.9	133.6	133.6
5	275.5	257.7	233.7	201.8	201.8
4	309.8	302.5	289.4	266.9	266.9
3	309.8	307.2	300.3	286.5	286.5
2	266.1	265.4	261.7	253.2	253.2
1	163.1	163.0	161.2	156.7	156.7
Положение 12 группы ОР СУЗ, %	90	77.9	69.2	62.3	57.5
Аксиальный офсет, %	-9.31	-14.20	-18.25	-21.91	-24.02

Таблица 2. Экспериментальные параметры при изменении концентрации борного поглотителя в реакторе

Table 2. Experimental data while changing boron acid concentration

№ ДПЗ	Линейное энерговыделение по наиболее энергонагруженной ТВС (10–29) $Q_L, \frac{\text{Вт}}{\text{см}}$				
	100%	95%	90%	85%	80%
7	124.1	117.7	113.7	108.8	103.5
6	215.8	203.8	196.0	187.0	177.1
5	277.9	261.9	250.2	237.4	224.0
4	311.9	293.1	277.9	262.3	246.0
3	311.6	290.3	272.6	255.5	237.9
2	267.5	246.8	229.4	213.3	197.0
1	163.9	149.6	137.7	127.1	116.3
Концентрация БК в реакторе, г/кг	5.39	5.41	5.48	5.51	5.55
Аксиальный офсет, %	-9.18	-8.11	-6.97	-6.12	-5.23

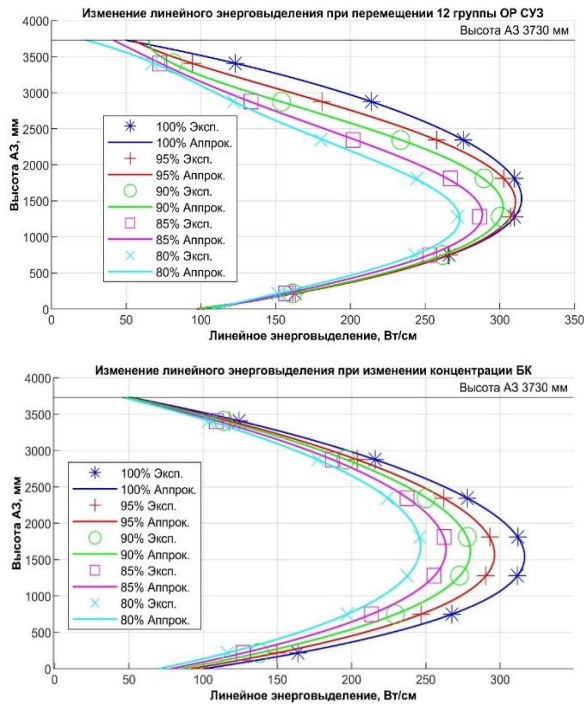


Рисунок 2. Линейное энерговыделение по наиболее энергонагруженной ТВС при варьировании мощности реактора

Figure 2. Linear power density distribution on the most energy loaded fuel assembly while varying reactor power

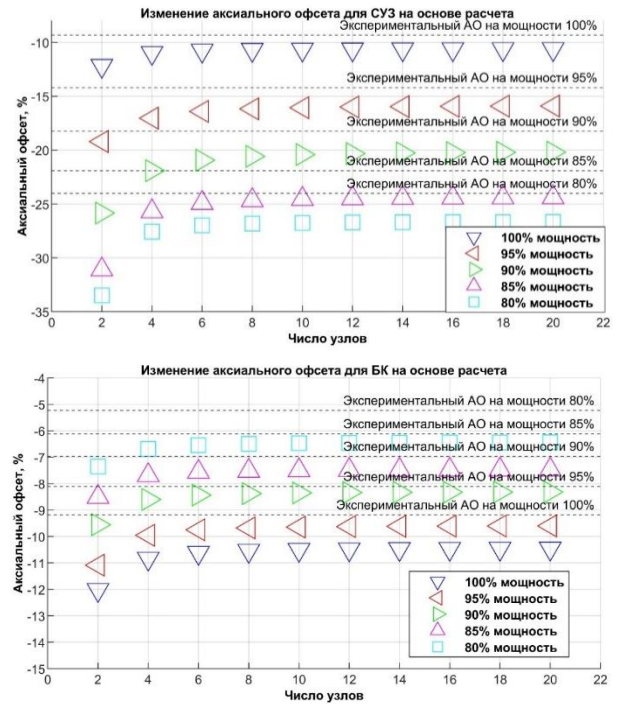


Рисунок 3. Определение расчетного аксиального оффсета на основе аппроксимации для равновесных состояний

Figure 3. Determination of the calculated axial offset based on approximation of steady states

Затем полагая равными нулю левые части системы (3) (равновесное состояние) определялись начальные температуры топлива и теплоносителя в i -ых узлах. Их

визуализация при разном значении аксиальных узлов для 100% уровня мощности приведена на рисунке 4.

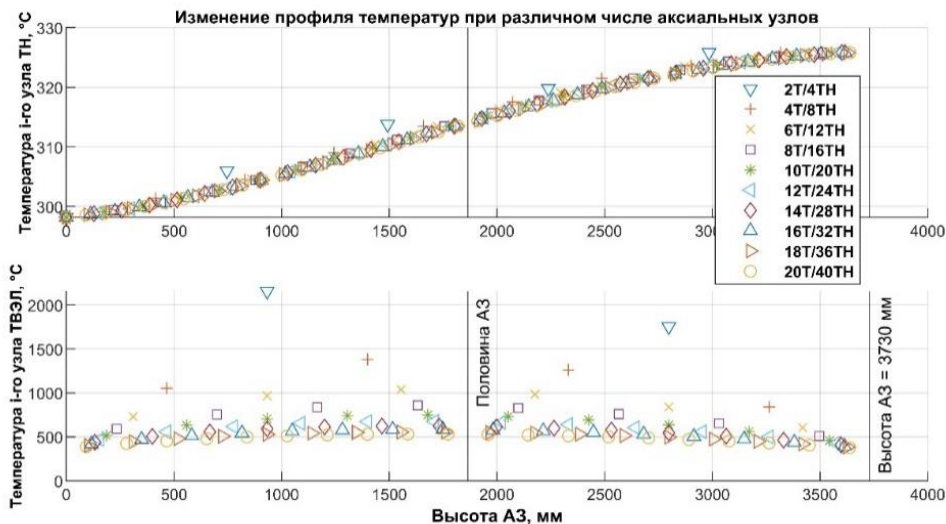


Рисунок 4. Определение профиля температур в активной зоне при различном числе использованных аксиальных узлов на уровне мощности 100%

Figure 4. Determination of temperature profiles in the reactor core with different numbers of axial nodes on 100% power

Из рисунков 3 и 4 вытекает важное следствие: увеличение числа аксиальных узлов должно приводить к улучшению моделирования аксиального офсета и значительно улучшать точность расчета температур узлов ТВЭЛ, при этом, практически не оказывая влияние на расчет температур в узлах теплоносителя. На рисунке 5 на примере модели,

состоящей из 10 узлов, продемонстрирована адекватность предложенного расширенного подхода многоточечной модели. Изменение температур соответствующих узлов в равновесных состояниях при различных уровнях мощности при условии неизменной температуры теплоносителя на входе в АЗ приведена на рисунке 5.

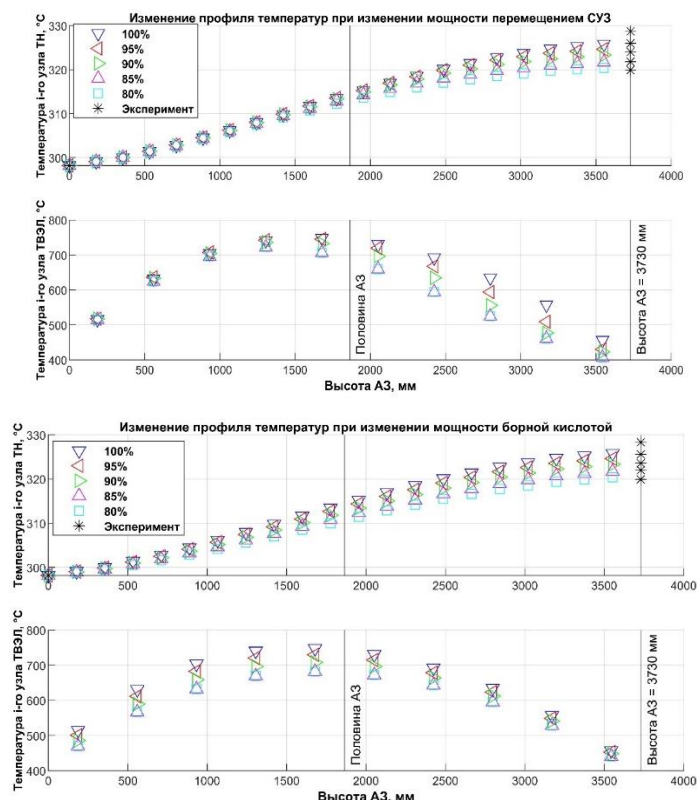


Рисунок 5. Определение профиля температур при варьировании мощности реактора на примере десятиточечной модели на основе расчета при равновесных состояниях

Figure 5. Determination of the temperature profiles while varying reactor power on the example of ten axial nodes model in steady states

Модель пространственных ксеноновых колебаний

Реакция деления в активной зоне реактора ВВЭР приводит к накоплению осколков, обладающих сравнительно большим микроскопическим сечением поглощения в области тепловых нейтронов. Одним из таких элементов является ксенон-135, влияющий на реактивность реактора через процесс, известный как отравление. В рамках подхода сосредоточенными параметрами модель изменения концентрации ксенона-135 может быть записана в виде уравнения (7) [18,19, 21,23,24]:

$$\begin{cases} \frac{dX_i(t)}{dt} = \frac{\gamma_x P_i(t)}{GV_i} + \lambda_I I_i(t) - \left(\lambda_x + \frac{\sigma_a^X P_i(t)}{GV_i \Sigma_f} \right) X_i \\ \frac{dI_i(t)}{dt} = \frac{\gamma_I P_i(t)}{GV_i} - \lambda_I I_i(t) \\ \rho_X(t) = - \frac{\sigma_a^X (X_i(t) - X_{io})}{v \Sigma_f} \end{cases} \quad (7)$$

где X_i – концентрация ксенона в i -ом узле;

P_i – мощность в i -ом узле;

γ_x – удельный выход ксенона на один акт деления;

γ_I – удельный выход йода на один акт деления;

λ_X – постоянная распада ксенона;
 λ_I – постоянная распада йода;
 G – энергия, выделяемая при одном акте деления;
 V_i – объем i -го узла;
 Σ_f – макроскопическое сечение деления урана-235;
 σ_a^X – микроскопическое сечение поглощения ксенона тепловых нейтронов.

Для того, чтобы продемонстрировать аксиальные ксеноновые колебания в рамках точечного подхода, определим относительную величину AXOI (Axial Xenon Oscillation Index), заданную выражением (8), предложенную Элиаси [и др.] [19], а также используемую специалистами в качестве критерия качества работы смоделированных систем управления [18,23,24]:

$$AXOI = \frac{X_{\text{верх}}(t) - X_{\text{низ}}(t)}{X_{\text{верх}0} + X_{\text{низ}0}} \quad (8)$$

На рисунке 6 представлены данные AXOI при различном числе использованных аксиальных узлов для различных уровней мощности, полученных на основании аппроксимирующих полиномов. Равновесная концентрация ксенона в i -ом узле определялась, полагая равной нулю левую часть уравнений в системе (4) с учетом мощности, выделяющейся в i -ом узле.

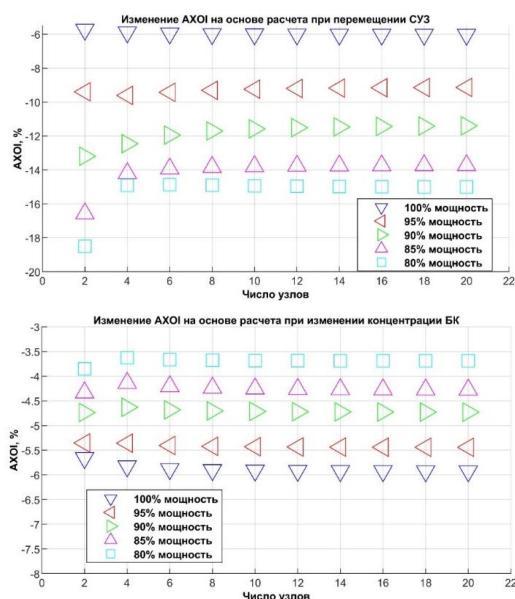


Рисунок 6. Определение расчетных значений AXOI на основе аппроксимации

Figure 6. Determination of the AXOI calculated values based on approximations

Исходя из рисунков 3, 4 и 6 можно установить, что модель, состоящая из двух аксиальных узлов, имеет сравнительно большое отличие аксиального офсета от экспериментального, а также большие ошибки при моделировании профиля температур, что позволяет не учитывать двухточечный подход в дальнейшем моделировании.

При маневрах мощности реакторов ВВЭР-1000/1200 аксиальный офсет должен поддерживаться в определенных значениях [34], определенными формулами (9):

$$\begin{cases} AO_{\text{центр}} = -2.6 + (AO_{\text{стаб}} + 2.6) \frac{P_{\text{стаб}}}{100} \\ AO_{\text{верх}} = -2.6 + (AO_{\text{центр}} + 7.6) \frac{100}{P} \\ AO_{\text{низ}} = -2.6 + (AO_{\text{центр}} - 2.4) \frac{100}{P} \end{cases} \quad (9)$$

Расширенная многоузловая модель борной кислоты

Как отмечалось выше, в работе [26] полученные М. Зареи данные показывают, что схема подавления колебаний с использованием борного поглотителя обладает более устойчивой структурой, чем с использованием ОР СУЗ. Поэтому в рамках разработки нелинейной модели для синтеза системы управления ее необходимо дополнить моделью борной кислоты, но при этом сохраняя саму структуру точечной модели.

В соответствии с работой Хао Ю [и др.] [35], изменения концентрации борной кислоты в геометрии канала может быть записано в виде уравнения (10.1):

$$\frac{\partial C_{\text{БК}}}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial (Av_{\text{ТН}} C_{\text{БК}})}{\partial x} = 0 \quad (10.1)$$

где $C_{\text{БК}}$ – концентрация БК, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

A – суммарная площадь в активной зоне, занятая теплоносителем;

m^2 , $v_{\text{ТН}}$ – скорость движения теплоносителя, $\frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Площадь, занятую теплоносителем в активной зоне, определим как (10.2):

$$A = S_{\text{АЗ}} - S_{\text{Топ}} - S_{\text{Тех}} \quad (10.2)$$

где $S_{\text{АЗ}}$ – площадь активной зоны;

m^2 , $S_{\text{Топ}}$ – площадь, занятая топливными элементами;

m^2 , $S_{\text{Тех}}$ – площадь, занятая технологическими каналами, m^2 .

Скорость движения теплоносителя определяется через массовый расход теплоносителя $G_{\text{ТН}}$ как (10.3):

$$v_{\text{ТН}} = \frac{G_{\text{ТН}}}{A\gamma_{\text{ТН}}} \quad (10.3)$$

Интегрируя обе части уравнения (10.1) по длине канала L (L равно высоте активной зоны), получаем (10.4):

$$\int_0^L \frac{\partial C_{\text{БК}}}{\partial t} dx + \int_0^L \left(\frac{1}{A} \frac{\partial (Av_{\text{ТН}} C_{\text{БК}})}{\partial x} \right) dx = 0 \quad (10.4)$$

Перепишем (10.4), принимая, что концентрация борной кислоты распределена равномерно:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_0^L C_{\text{БК}} dx + \frac{1}{A} \int_0^L \left(\frac{\partial (Av_{\text{ТН}} C_{\text{БК}})}{\partial x} \right) dx = 0 \quad (10.5)$$

Откуда беря граничными условиями $C_{\text{БК}}(x=0) = C_{\text{БК}}^{\text{Вх}}$ и $C_{\text{БК}}(x=L) = C_{\text{БК}}^{\text{Вых}}$, получаем следующее дифференциальное уравнение (11.1):

$$\frac{dC_{\text{БК}}(t)}{dt} = -\frac{G_{\text{ТН}}}{LA\gamma_{\text{ТН}}} (C_{\text{БК}}^{\text{Вх}} - C_{\text{БК}}^{\text{Вых}}) \quad (11.1)$$

Также используя идею о том, что концентрация борной кислоты распределяется равномерно, можно положить, что $C_{\text{БК}}$ в самом узле может быть определена через входное и выходное значения борной кислоты из этого узла как (11.2):

$$C_{\text{БК}} = \frac{C_{\text{БК}}^{\text{Вх}} + C_{\text{БК}}^{\text{Вых}}}{2} \rightarrow C_{\text{БК}}^{\text{Вых}} = 2C_{\text{БК}} - C_{\text{БК}}^{\text{Вх}} \quad (11.2)$$

Тогда итоговое уравнение можно переписать (11.3):

$$\frac{dC_{\text{БК}}(t)}{dt} = -\frac{2G_{\text{ТН}}}{LA\gamma_{\text{ТН}}} (C_{\text{БК}} - C_{\text{БК}}^{\text{Вх}}) \quad (11.3)$$

Однако, такое допущение будет приводить к нефизическому поведению: резкое изменение $C_{\text{БК}}^{\text{Вх}}$ вызовет столь же резкое изменение $C_{\text{БК}}^{\text{Вых}}$, но с противоположным знаком, поэтому в данной работе предлагается подход «two well-stirred tanks in series», используе-

мый в теплогидравлической модели Р. Манна [13, 14]: выходная концентрация из первого узла борной кислоты равна средней концентрации борной кислоты в самом узле $C_{\text{БК}}^{\text{Вых}} = C_{\text{БК}}$, а также выступает в роли входной концентрации в следующей узел. Для двух последовательных узлов модель может быть записана в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений (12):

$$\begin{cases} \frac{dC_{\text{БК1}}(t)}{dt} = -\frac{G_{\text{ТН}}}{\frac{L}{2}A\gamma_{\text{ТН}}} (C_{\text{БК1}} - C_{\text{БК}}^{\text{Вх}}) \\ \frac{dC_{\text{БК2}}(t)}{dt} = -\frac{G_{\text{ТН}}}{\frac{L}{2}A\gamma_{\text{ТН}}} (C_{\text{БК2}} - C_{\text{БК1}}) \end{cases} \quad (12)$$

Реакция моделей (11.3) и (12) на изменение концентрации борной кислоты в реакторе с 5.39 до 5.55 г/кг представлена на рисунке (7).

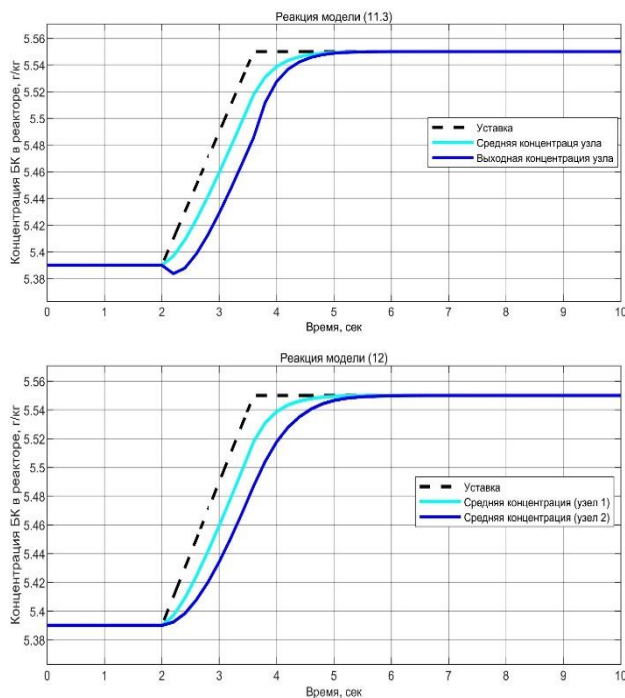


Рисунок 7. Сравнение подходов (11.3) и (12)
Figure 7. Comparison of the approaches (11.3) and (12)

Очевидно, что i -ый узел борной кислоты примыкает к i -ому узлу теплоносителя, и связан с ним через массовый расход. Соответствующий эффект реактивности в случае подхода «two well-stirred tanks in series» для двух узлов может быть записан в виде выражения (13):

$$\rho_{\text{БК}}(t) = \frac{\alpha_{\text{БК}}}{2} (C_{\text{БК1}}(t) - C_{\text{БК1}_0}) + \frac{\alpha_{\text{БК}}}{2} (C_{\text{БК2}}(t) - C_{\text{БК2}_0}) \quad (13)$$

Хафез Н. и соавторы в своей работе [36] показали, что эффективный коэффициент размножения нейтронов $K_{\text{эф}}$ в случае изменения концентрации борной кислоты в теплоносителе первого контура реактора ВВЭР-1200 аппроксимируется следующей зависимостью (14):

$$K_{\text{эф}} = -0.1741C_{\text{БК}}(t) + 0.136 \quad (14)$$

Это позволяет численно оценить коэффициент реактивности по борной кислоте на основании расчетов по формуле (15) [36]:

$$\alpha_{\text{БК}} \approx -\frac{1741}{i} \times 10^{-5} \frac{\text{кг}}{\text{г}} \quad (15)$$

В формуле (15) введена поправка на число использованных узлов i .

Результаты моделирования, обработка результатов и выводы

Нелинейная верифицированная модель 12 группы ОР СУЗ, которая воздействует на аксиальные узлы последовательно при вводе, получена в ранее опубликованной работе автора [16] и в общем случае может быть представлена в виде выражений (16):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dh(t)}{dt} = G_r h_0 (1 + \text{sign}(h)) \\ \frac{d\rho_1^{av}(t)}{dt} = G_r \rho_1^{tot} \left(1 + \text{sign} \left(h - \frac{(i-1)h_0}{i} \right) \right) \\ \frac{d\rho_2^{av}(t)}{dt} = G_r (\rho_2^{tot} - \rho_1^{tot}) \left(1 - \text{sign} \left(h - \frac{(i-1)h_0}{i} \right) \right) \left(1 + \text{sign} \left(h - \frac{(i-2)h_0}{i} \right) \right) \\ \vdots \\ \frac{d\rho_i^{av}(t)}{dt} = G_r (\rho_i^{tot} - \rho_{i-1}^{tot}) \left(1 - \text{sign} \left(h - \frac{h_0}{i} \right) \right) (1 + \text{sign}(h)) \end{array} \right. \quad (16)$$

где h – текущее положение 12 группы ОР СУЗ (мм);

h_0 – высота активной зоны реактора ВВЭР-1200;

G_r – скорость перемещения ОР СУЗ (в долях высоты активной зоны в сек);

$\rho_1^{av}, \rho_2^{av} \dots \rho_j^{av}$ – средняя вносимая реактивность 12 группой ОР СУЗ в 1, 2, ... j узлы, соответственно.

Значения реактивностей, внесенных в систему путем перемещения ОР СУЗ ρ_i^{tot} , полученные на основе экспериментальных данных взяты также из работы [16]. Для удобства моделирования и выводов графика в одном окне все моделируемые величины (мощность, аксиальный офсет, АХОИ, выходная температура теплоносителя, оптимальный офсет и допустимые границы оф-

сета) приведены в относительном виде формулы (17):

$$\overline{X(t)} = \frac{X(t) - X_0}{X_0} \quad (17)$$

где $X(t)$ – текущее значение моделируемого параметра;

X_0 – начальное значение моделируемого параметра.

Моделирование проводилось в два этапа: в эксперименте №1 изменялось положение 12 группы ОР СУЗ (рис. 8.1), но при этом концентрация борной кислоты не изменялась. В эксперименте №2 (рис. 8.2) изменялась концентрация борной кислоты через реактор, положение 12 группы ОР СУЗ оставалось неизменным. Важно учесть, что полученные модели являются нелинейными и относятся к классу «жестких» систем, по-

этому схема численного дифференцирования должна быть адаптирована к такому классу задач. В данной работе используется схема

численного дифференцирования вариативно-го шага и вариативного порядка (Variable Step Variable Order, VSVO) ode15s.

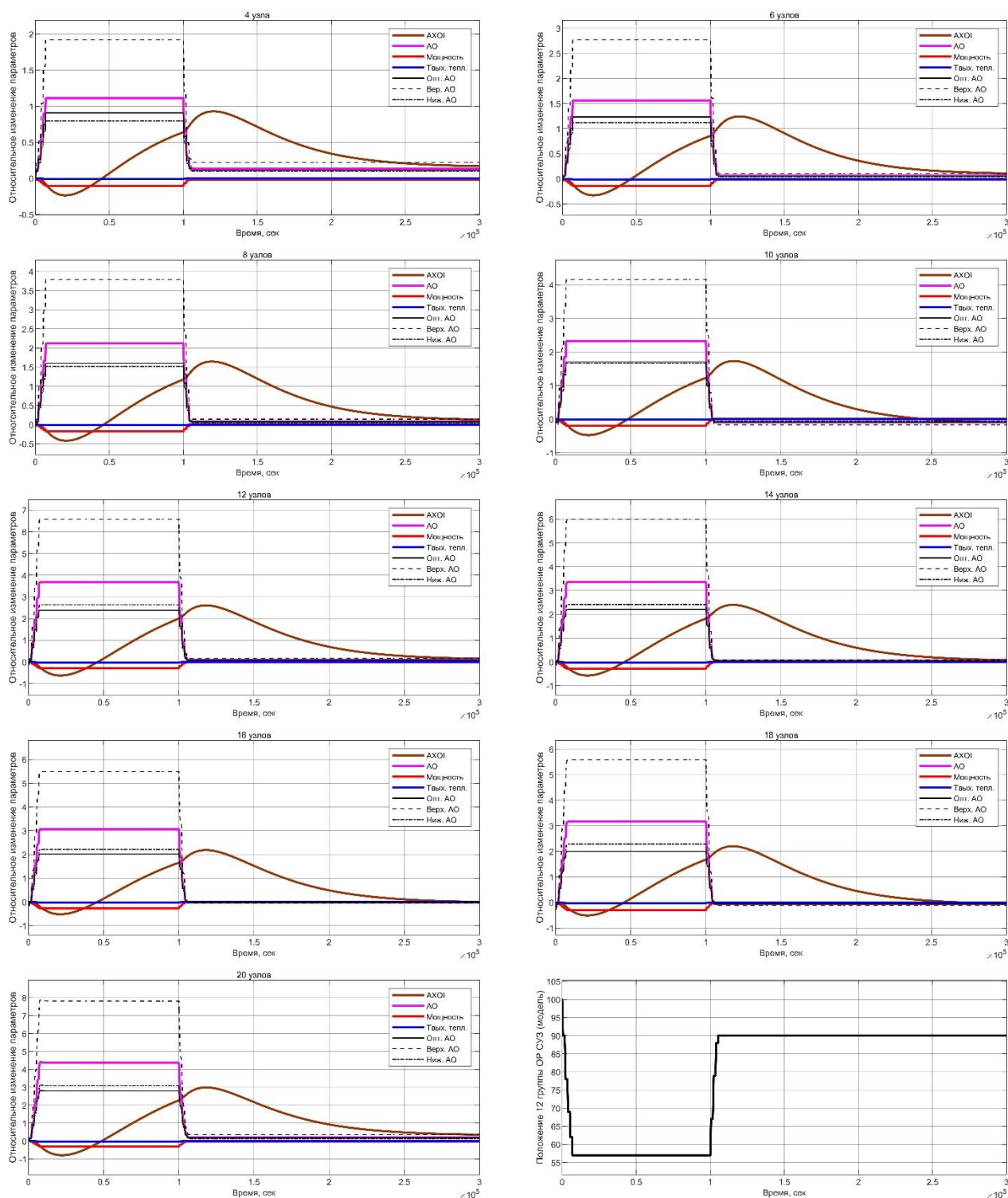


Рисунок 8.1. Переходные процессы при изменении положения модели (16) 12 группы ОР СУЗ
Figure 8.1. Transient processes while inserting and withdrawal of the model (16) of the group 12 of the CPS CR

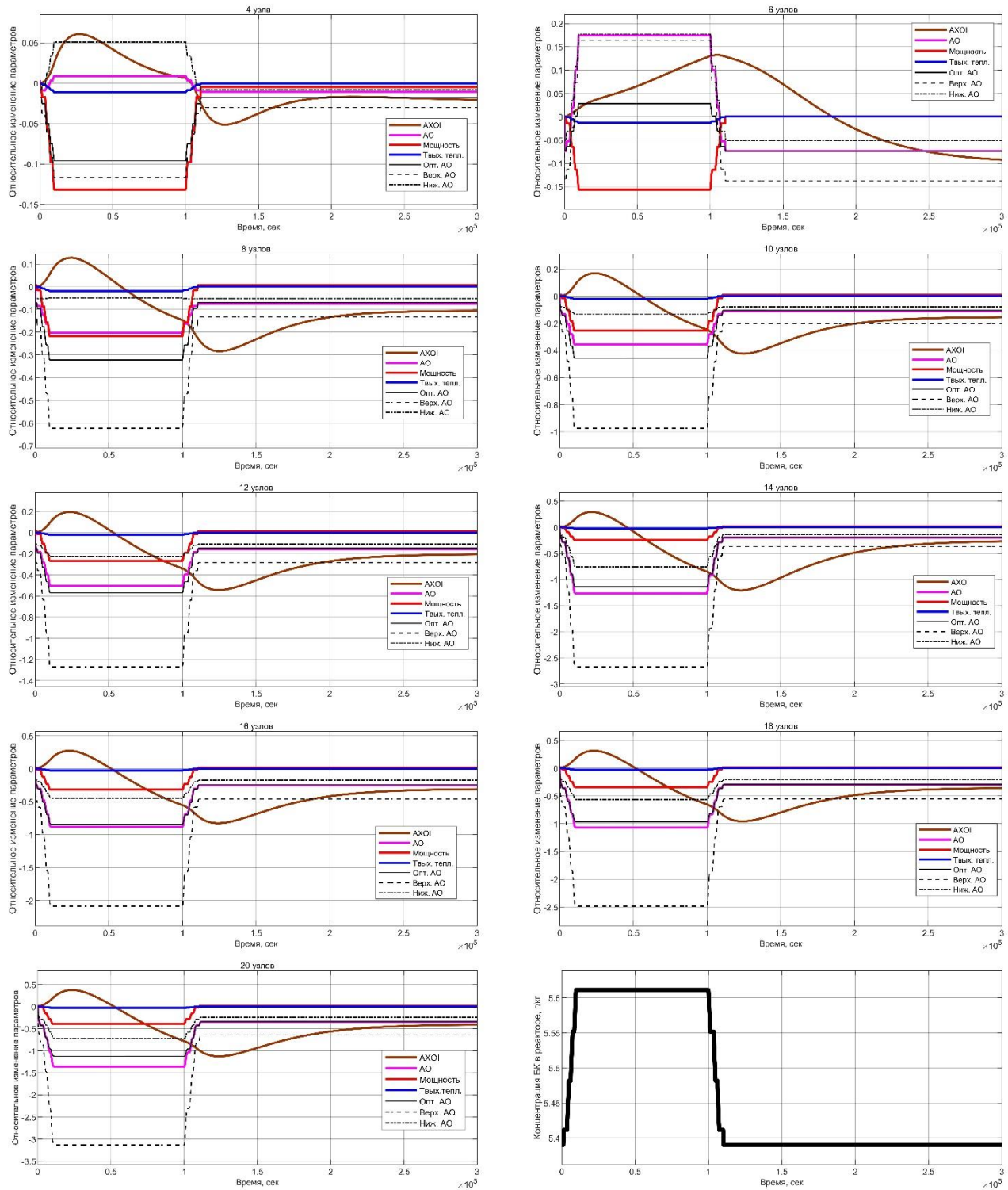


Рисунок 8.2. Переходные процессы при изменении концентрации модели (12) борной кислоты в реакторе
Figure 8.2. Transient processes while changing concentration of the model (12) of the boric acid in reactor

Адекватность предложенных моделей оценивалась по метрикам MAE (Mean Absolute Error) и RMSE (Root Mean Squared Error) для значений мощности, аксиального офсета и выходной температуры теплоносителя, которые определяются по формулам (18.1) и (18.2), соответственно:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_{\text{мод}} - y_{\text{экс}}| \quad (18.1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{\text{мод}} - y_{\text{экс}})^2} \quad (18.2)$$

где $n = 5$ – число точек измерений;

$U_{\text{мод}}$ – результаты модели;

$U_{\text{эксп}}$ – результаты эксперимента с многофункционального тренажера.

Использование двух метрик обосновывается следующим: MAE менее чувствительна к выбросам, что делает её предпочтительной, когда данные содержат аномальные значения, которые не должны сильно влиять на общую оценку модели, в то время как RMSE штрафует за большие ошибки сильнее, чем MAE, поскольку ошибки возводятся в квадрат. Это делает RMSE предпочтительной метрикой, когда большие отклонения от предсказанных значений недопустимы и должны иметь значительное влияние на оценку модели. Полученные результаты приведены на рисунке 9.

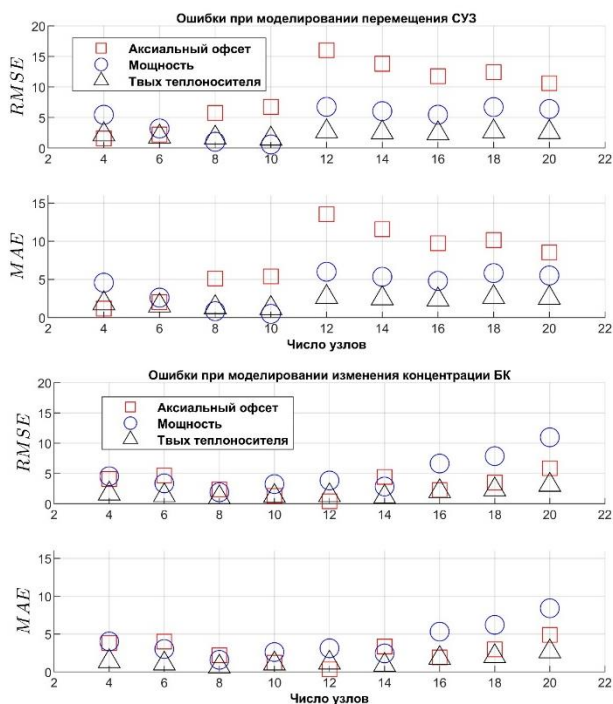


Рисунок 9. Статистическая обработка результатов моделирования

Figure 9. Statistical processing of the simulation results

Исходя из рисунков 8.1, 8.2 и 9 важно обратить внимание на следующие моменты:

1. При моделировании изменения положения 12 группы ОР СУЗ в целом все модели ведут себя удовлетворительно. Однако, при увеличении числа аксиальных узлов (более 10) все сильнее проявляют себя коэффициенты связи, определенные в рамках диффузионного подхода Эйвери при одновременном уменьшении влияния механизма

обратной связи. Возможно, что более точные переходные процессы могли бы быть достигнуты при использовании формализма Кобаяши;

2. При моделировании изменения концентрации борного поглотителя в реакторе 4 и 6 узловые модели показали неудовлетворительные результаты, хотя и с небольшими значениями MAE и RMSE: вместо наблюдения увеличения аксиального офсета наблюдается его уменьшение, что не согласуется с экспериментальными данными;

3. Значения офсета близкие к оптимальным (9) были получены при изменении концентрации борной кислоты, что в целом согласуется с экспериментальными данными;

4. Для MAE и RMSE были установлены пределы в 5% для минимизации расхождений между результатами моделирования и экспериментом. Исходя из графиков (8.1), (8.2) и (9), компромиссным подходом при наличии двух управляющих воздействий является 6 или 8-узловая модели, что значительно расширяет результаты при использовании двух- и четырехточечного подходов, использованных в работах [17–25].

Несмотря на принятый в рамках теории связанных реакторных систем упрощенный точечный подход, модель показывает удовлетворительный результат в рамках представленных возмущений. Благодаря простоте и низкой размерности эта модель полезна для моделирования переходных процессов, связанных с задачей управления технологическими параметрами, а также может быть положена в основу для проектирования современных регуляторов управления не только интегральной мощности РУ, но и формы распределения этой мощности (АО, АХОИ) по объему активной зоны. Таким регуляторам, например, может быть выбран нечеткий пропорционально – интегральный регулятор (Fuzzy-PI), хорошо проявивший себя в режиме следования за нагрузкой, а также в режиме астатического поддержания мощности при моделировании нуль-мерной модели динамики реактора ВВЭР-1200 [37]. В качестве ограничений данной модели следует отметить, что практически все параметры, входящие в конечную систему, являются константами, что позволяет произвести

дальнейшую линеаризацию около равновесных состояний (LTI, Linear Time Invariant) и получить передаточные функции по заданным каналам. Однако для более сложных случаев, таких как линейные модели с переменными параметрами (LPV, Linear Parameter Varying) необходимо предусмотреть функциональные зависимости от мощности таких параметров как $K_{\text{тепл}}$, $G_{\text{ТН}}$ и $m_{\text{ТН}}$, что было выполнено для типовой РУ PWR в работе [38]. Также не был рассмотрен случай

моделирования поведения данной модели на конец топливной кампании.

Все экспериментальные данные, а также скрипты MATLAB могут быть переданы по запросу.

Автор выражает благодарность начальнику отдела тренажерного обучения АНО ДПО «Техническая академия Росатома» В.В. Ледяеву за помощь в проведении работ на тренажере, а также ценным комментариям рецензентов, позволившим улучшить данную работу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Gritsevskiy A. Outlook for global nuclear power: energy, electricity and nuclear power estimates for the period up to 2050. 11 International Conference of the Croatian Nuclear Society, 5-8 Jun 2016, Zadar (Croatia), p. 20. Available at: <https://inis.iaea.org/records/bp7ha-ykh69> (accessed: 01.09.2024).
2. Zhou G., Tan D. Review of nuclear power plant control research: neural network-based methods. *Annals of nuclear energy*. 2023;181:109513 <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2022.109513>
3. Соловьев Д.А., Хачатрян А.Г., Чернов Е.В., Аль Малкави Р.Т. Исследование алгоритмов подавления ксеноновых колебаний в реакторе ВВЭР-1200. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2022;2:37–48. <https://doi.org/10.26583/npe.2022.2.04>
4. Soloviev D.A., Khachatryan A.G., Chernov E.V., Al Malkawi R.T. Investigation of algorithms for suppressing xenon oscillations in a VVER-1200 reactor. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2022;2:37–48. (in Russ.). <https://doi.org/10.26583/npe.2022.2.04>
5. Динг З., Ченг З., Zhu Y., Huang X., Dong Y., Zhang Z. Review on the recent progress in nuclear plant dynamical modeling and control. *Energies*. 2023;16(3):1443. <https://doi.org/10.3390/en16031443>
6. Пикина Г.А., Ле В.Д., Пашченко Ф.Ф. Модели динамики реактора ВВЭР с мощностным коэффициентом реактивности. *Вестник МЭИ*. 2016;2:75–83. EDN: TRYICK. Режим доступа: <https://vestnik.mpei.ru/index.php/vestnik/article/view/65> (дата обращения 15.07.2024).
7. Pikina G.A. Le V.D., Pashchenko F. F. Modeli dinamiki reaktora VVER s moshchnostnym koeffitsiyentom reaktivnosti. *Vestnik MEI*. 2016;2:75–83. (in Russ.). EDN: TRYICK. Available at: <https://vestnik.mpei.ru/index.php/vestnik/article/view/65> (accessed: 15.07.2024).
8. Curtain R., Morris K. Transfer functions of distributed parameter systems: a tutorial. *Automatica*. 2009;45(5):1101–1116. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2009.01.008>
9. Bridges D.N., Clement J.D. An investigation of space-dependent reactor transfer functions with temperature feedback. *Nuclear science and engineering*. 1972;47(4):421–434. <https://doi.org/10.13182/NSE72-A22434>
10. Shimjith S.R., Tiwari A.P., Naskar M., Bandyopadhyay B. Space-time kinetics modeling of Advanced Heavy Water Reactor for control studies. *Annals of nuclear energy*. 2010;37:310–324 <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2009.12.011>
11. Wang P.F., Liu Y., Jiang B.T., Wan J.S., Zhao F.Y. Nodal dynamics modeling of AP1000 reactor for control system design and simulation. *Annals of nuclear energy*. 2013;62:208–223. <http://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2013.05.036>
12. Dong Z., Huang X., Zhang L. A nodal dynamic model for control system design and simulation of an MHTGR core. *Nuclear engineering and design*. 2010;240(5):1251–261. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2009.12.032>
13. Puchalski B., Rutkowski T.A., Duzinkiewicz K. Multi-nodal PWR reactor model – methodology proposition for power distribution coefficients calculation. 21st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR) 29.08.2016–01.09.2016. Miedzyzdroje, Poland. 2016:385–390. <https://doi.org/10.1109/MMAR.2016.7575166>
14. Puchalski B., Rutkowski T.A., Duzinkiewicz K. Nodal models of pressurized water reactor core for control purposes – a comparison study. *Nuclear engineering and design*. 2017;322:444–463. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.07.005>
15. Ball S J. Aproximate model for distributed-parameter heat-transfer systems. Jan. 1963. Available at: <https://www.osti.gov/biblio/4651013> (accessed: 01.11.2024).
16. Правосуд С.С., Маслаков Д. С., Якубов Я.О., Овчеренко А.А. Верификация модели динамики ядерного реактора ВВЭР-1200, состоящей из одного топливного узла, примыкающего к двум узлам теплоносителя. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;48(3):82–95. EDN: YBZMTK. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-03-08>

Pravosud S.S., Maslakov D.S., Yakubov Ya.O., Ovcherenko A.A. Verification of the WWER-1200 reactor dynamic model consisting of one-fuel unit adjacent to two coolant units. *Global nuclear safety*. 2023;48(3):82–95. (In Russ.). EDN: YBZMTK. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-03-08>.

15. Juslin K., Paljakka M. Apros – a multifunctional modelling environment. 1999. Available at: <https://www.osti.gov/etdweb/biblio/20122527> (accessed: 17.09.2024).

16. Правосуд С.С., Якубов Я.О., Сусакин В.А. Многоточечная модель кинетики с мощностным эффектом реактивности для контроля аксиального оффсета реактора ВВЭР-1200 в режиме следования за нагрузкой. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(2):73–90. EDN: LQRKEU <https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-07>

Pravosud S.S., Yakubov Ya.O., Susakin V.A. Multipoint kinetics model with power reactivity defect for the axial offset control in the VVER-1200 nuclear reactor during the load following mode of operation. *Global nuclear safety*. 2024;(2):73–90. (In Russ.). EDN: LQRKEU. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-07>

17. Mousakazemi S.M.H. Control of a pressurized light-water nuclear reactor two-point kinetics model with the performance index-oriented PSO. *Nuclear engineering and technology*. 2021;53(8):2556–2563. <https://doi.org/10.1016/j.net.2021.02.018>

18. Aftab A., Luan X. A Takagi Sugeno based reactor power control of VVER-1000 using linear parameter varying identification of two-point kinetic model. *Progress in nuclear energy*. 2021;140:103905. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103905>

19. Eliasi H., Menhaj M.B., Davilu H. Robust nonlinear model predictive control for nuclear power plants in load following operations with bounded xenon oscillations. *Nuclear engineering and design*. 2011;241(2):533–543. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2010.12.004>

20. Rafiei M., Ansarifar G.R., Hadad K., Mohammadi M. Load-following control of a nuclear reactor using optimized FOPID controller based on the two-point fractional neutron kinetics model considering reactivity feedback effects. *Progress in nuclear energy*. 2021;141:103936. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103936>

21. Abdulraheem K. et al. Adaptive second order sliding mode control for a pressurized water nuclear reactor in load following operation with Xenon oscillation suppression. *Nuclear engineering and design*. 2022;391:111742. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2022.111742>

22. Zaidabadi nejad M., Ansarifar G.R. Adaptive robust control for axial offset in the P.W.R nuclear reactors based on the multipoint reactor model during load-following operation. *Annals of nuclear energy*. 2017;103:251–264. <http://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2017.01.025>

23. Zaidabadi nejad M., Ansarifar G.R. Estimation of axial xenon oscillations with online parameter adaptation in the P.W.R nuclear reactors using Lyapunov approach based on the multipoint kinetics reactor model. *Annals of nuclear energy*. 2017;108:277–300. <http://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2017.04.028>

24. Aftab A., Luan X., Anjum M.S. Design of multi-module adaptive fuzzy power tracking control for nonlinear four-point reactor core model under multiple transient conditions. *Progress in nuclear energy*. 2022;149:104248. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2022.104248>

25. Zarei M. A multi-point kinetics-based MIMO-PI control of power in PWR reactors. *Nuclear Engineering and Design*. 2018;328:283–291. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2018.01.011>

26. Zarei M. Closed loop configuration in the axial flux tilt control of a PWR. *Annals of nuclear energy*. 2019;134:47–53. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2019.05.059>

27. Avery R. Theory of coupled reactors. In: Proc. 2nd UN Int. Conf. Peaceful Uses of Atomic Energy, United Nations, 1958;. Vol. 2. P. 182. <https://doi.org/10.2172/4315469>

28. Belleni-Morante A. The kinetic behaviour of a reactor composed of G loosely coupled cores: Integral formulation. *Journal of nuclear energy. Parts A/B. Reactor science and technology*. 1964;18(10):547–559. [https://doi.org/10.1016/0368-3230\(64\)90139-9](https://doi.org/10.1016/0368-3230(64)90139-9)

29. Komata M. On the derivation of Avery's coupled reactor kinetics equations. *Nuclear science and engineering*. 1969;38(3):193–204. <https://doi.org/10.13182/nse69-a21154>

30. Kobayashi K. Rigorous derivation of multi-point reactor kinetics equations with explicit dependence on perturbation. *Journal of nuclear science and technology*. 1992;29(2):110–120. <https://doi.org/10.1080/18811248.1992.9731503>

31. Valocchi G., Tommasi J., Ravetto P. Reduced order models in reactor kinetics: A comparison between point kinetics and multipoint kinetics. *Annals of nuclear energy*. 2020;147:107702. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107702>

32. Гулевич А.В., Кухарчук О.Ф. Методы расчета связанных реакторных систем. *Атомная энергия*. 2004;97(6):403–414. EDN PEUFJB. Available at: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/3399> (дата обращения: 22.09.2024).

Gulevich A.V., Kuharchuk O.F. Metody rascheta svyazannyh reaktornyh system. *Atomnaya energiya*. 2004;97(6):403–414. (in Russ.). EDN: PEUFJB. Available at: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/3399> (accessed: 22.09.2024).

33. Skinner R.E., Cohen E.R. Reduced delayed neutron group representations. *Nuclear science and engineering*. 1959(2017);5(5):291–298. <https://doi.org/10.13182/NSE59-A25601>

34. Джарум Б., Соловьёв Д.А., Семенов А.А., Щукин Н.В., Выговский С.Б., Аль-Шамайлех А.И., Танаш Х.А. Влияние температурного регулирования при работе ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 в режиме следования за нагрузкой. *Вестник НИЯУ МИФИ*. 2020;9(3):201–209. Режим доступа: <https://vestnikmephi.elpub.ru/jour/article/view/84> (дата обращения: 01.11.2024).

Djaroum B., Solovyev D.A., Semenov A.A., Schukin N.V., Vygovsky S.B., Al-Shamayleh A.I., Tanash H.A. Temperature regulation contribution during the power control of the VVER-1000 and VVER-1200 reactors in a load-following mode. *Vestnik natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta «MIFI»*. 2020;9(3):201–209. (In Russ.). Available at: <https://vestnikmephi.elpub.ru/jour/article/view/84> (accessed: 01.11.2024).

35. Yu H., Wang M., Cai R., Zhang D., Tian W., Qiu S., Su G.H. Development and validation of boron diffusion model in nuclear reactor core subchannel analysis. *Annals of nuclear energy*. 2019;130:208–217. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2019.02.046>

36. Hafez N., Shahbunder H., Amin E., Elfiki S.A., Abdel-Latif A. Study on criticality and reactivity coefficients of VVER-1200 reactor. *Progress in nuclear energy*. 2021;131:103594 <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103594>

37. Правосуд С.С., Маслаков Д.С., Якубов Я.О. Применение нечетких регуляторов для управления мощностью ядерного реактора ВВЭР-1200. *Вестник НИЯУ МИФИ*. 2024;13(2):97–109. EDN: QBFVFE. <https://doi.org/10.26583/vestnik.2024.320>

Pravosud S., Maslakov D., Yakubov Ya. An application of fuzzy logic controllers for power control of the VVER-1200 nuclear reactor. *Vestnik natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta «MIFI»*. 2024;13(2):97–109. (In Russ.). EDN: QBFVFE. <https://doi.org/10.26583/vestnik.2024.320>

38. Ramaswamy P., Edwards R.M., Lee K.Y. An automatic tuning method of a fuzzy logic controller for nuclear reactors. *IEEE Transactions on nuclear science*. 1993;40(4):1253–1262. <https://doi.org/10.1109/TNS.1993.8526778>

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без дополнительных источников финансирования.

FUNDING:

No additional funding.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликта интересов нет.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ:

Сергей Сергеевич Правосуд, ведущий инженер по подготовке персонала учебно-методического центра «Ядерная и радиационная безопасность» АНО ДПО «Техническая академия Росатома», г. Обнинск, Калужская обл.; старший преподаватель кафедры «Электроника и автоматика физических установок» СТИ НИЯУ «МИФИ», г. Северск, Томская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-3225-4748>

e-mail: SSePravosud@rosatom.ru,

SSPravosud@mephi.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR:

Sergei S. Pravosud, Leading engineer for personnel training of the Educational and Methodological Centre of Nuclear and Radiation Safety at Rosatom Technical Academy, Obninsk, Kaluga region, Russian Federation; Senior lecturer of the Department of Electronics and Automatics of Physical Facilities, Seversk Technological Institute the branch of the National Research Nuclear University «MEPhI», Seversk, Tomsk region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-3225-4748>

e-mail: SSePravosud@rosatom.ru,

SSPravosud@mephi.ru

Поступила в редакцию / Received 09.01.2025

После доработки / Revision 10.03.2025

Принята к публикации / Accepted 13.03.2025