
ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И АТОМНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.039.4

DOI 10.46960/1816-210X_2025_4_42
EDN JUGNJK

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КСЕНОНОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА АКТИВНУЮ ЗОНУ ПРИ МАНЕВРЕННЫХ РЕЖИМАХ АЭС

Г.В. АркадовORCID: 0009-0005-4464-9973 e-mail: arkgen47@gmail.comНекоммерческое партнерство содействию развитию системной инженерии «Райз»
Москва, Россия**Д.С. Колотушкин**ORCID: 0009-0004-2383-4056 e-mail: kolotushkins@nvnpp1.rosenergoatom.ruРоссийский государственный концерн по производству электрической
и тепловой энергии на атомных станциях (концерн «Роэнергоатом»)
Нововоронежская АЭС им. В.А. Сидоренко
Нововоронеж, Россия**М.Т. Слепов**ORCID: 0000-0001-5563-0526 e-mail: slepovmt@nvnpp1.rosenergoatom.ruРоссийский государственный концерн по производству электрической
и тепловой энергии на атомных станциях (концерн «Роэнергоатом»)
Нововоронежская АЭС им. В.А. Сидоренко
Нововоронеж, Россия

Предлагается новый метод управления мощностью ядерного реактора типа ВВЭР: изменение мощности ядерного реактора осуществляется путем управления нисходящей и восходящей фазами естественных ксеноновых колебаний с минимальным воздействием на реактивность путем, по меньшей мере, однократного перемещения органов регулирования системы управления и защиты и/или посредством минимального борного регулирования с достижением интегральных значений мощности реактора за ночной и дневной периоды регулирования. В результате повышаются безопасность эксплуатации реакторной установки и надежность оборудования, улучшаются ресурсные характеристики оборудования реакторной установки при циклических изменениях суточной нагрузки за счет минимизации термомеханических нагрузок, исчерпывающих ресурсы оборудования, участвующего в процессе регулирования. Помимо этого, уменьшается объем водообмена, а также исключаются ошибки оператора за счет упрощения алгоритма автоуправления реактором со стороны второго контура.

Ключевые слова: маневренные режимы; ксеноновые колебания; реактивность; управляемые воздействия; суточная нагрузка; активная зона; ресурсные характеристики; борное регулирование; оффсет.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Аркадов, Г.В. Использование ксеноновых колебаний для минимизации управляемых воздействий на активную зону при маневренных режимах АЭС / Г.В. Аркадов, Д.С. Колотушкин, М.Т. Слепов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2025. № 4. С. 42-56. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_4_42 EDN: JUGNJK

XENON OSCILLATIONS USAGE TO MINIMIZE CONTROL ACTIONS ON THE CORE IN LOAD-FOLLOWING MODES OF NUCLEAR POWER PLANTS

G.V. Arkadov

ORCID: 0009-0005-4464-9973 e-mail: arkgen47@gmail.com

Non-Profit Partnership for the Promotion of System Engineering «Rise»
Moscow, Russia

D.S. Kolotushkin

ORCID: 0009-0004-2383-4056 e-mail: kolotushkinds@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Rosenergoatom Joint-Stock Company

Novovoronezh Nuclear Power Plant n.a. V.A. Sidorenko
Novovoronezh, Russia

M.T. Slepov

ORCID: 0000-0001-5563-0526 e-mail: slepovmt@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Rosenergoatom Joint-Stock Company

Novovoronezh Nuclear Power Plant n.a. V.A. Sidorenko
Novovoronezh, Russia

Abstract. The article proposes a new method for controlling the power of a WWER-type nuclear reactor. The change in the power of the nuclear reactor is carried out by controlling the descending and ascending phases of natural xenon oscillations with a minimum impact on reactivity by at least one movement of the control elements of the control and protection system and/or by minimum boron regulation with the achievement of integral values of the reactor power for the night and day regulation periods. As a result, the operational safety of the reactor plant and the reliability of the equipment are increased, and the service life characteristics of the reactor plant equipment are improved during cyclic changes in the daily load by minimizing thermomechanical loads that exhaust the service life of the equipment involved in the regulation process. In addition, the volume of water exchange is reduced, and operator errors are eliminated by simplifying the automatic reactor control algorithm from the second circuit side.

Key words: load-following mode; xenon oscillations; reactivity; control actions; daily load; reactor core; resource characteristics; boron regulation; offset.

FOR CITATION: G.V. Arkadov, D.S. Kolotushkin, and M.T. Slepov. Xenon oscillations usage to minimize control actions on the core in load-following modes of nuclear power plants. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2025. № 4. Pp. 42-56. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_4_42 EDN: JUGNJK

Введение

Заложенные в проект ВВЭР-1200, ВВЭР-1000 алгоритмы авторегулирования турбины и реактора нацелены на базовый стационарный режим, при котором турбина определяет, как должна измениться мощность реактора, чтобы выходная электрическая мощность турбины оставалась постоянной [1]. При маневренных режимах алгоритм авторегулирования усложняется, что приводит к значительной интенсификации управляющих реактивностных воздействий (УРВ).

Известен способ управления ядерной энергетической установкой с реактором водяного типа при изменении мощности реактора или внешней нагрузки, предусматривающий поддержание аксиального оффсета в активной зоне реактора. При уменьшении мощности реактора одновременно осуществляют введение борной кислоты в теплоноситель первого контура и рабочей группы органов регулирования системы управления и защиты в активную зону реактора по пропорциональному закону регулирования, а также повышение

шают давление пара в главном паровом коллекторе и парогенераторах до величины, обеспечивающей постоянную температуру теплоносителя на входе в реактор, а при достижении заданного промежуточного уровня мощности реактора подачу борной кислоты прекращают и при достижении заданного уровня мощности подают в первый контур чистый дистиллят, а после прохождения максимума «йодной ямы» (максимальной концентрации короткоживущего изотопа ксенона ^{135}Xe , образующегося в результате радиоактивного распада изотопа иода ^{135}I) для стабилизации мощности реактора на заданном уровне вводят борную кислоту, а для увеличения мощности реактора до нового стационарного уровня осуществляют одновременно введение чистого дистиллята в теплоноситель первого контура, выведение рабочей группы органов регулирования системы управления и защиты из активной зоны реактора по пропорциональному закону регулирования, а также понижают давление пара в главном паровом коллекторе и парогенераторах до величины, обеспечивающей постоянную температуру теплоносителя на входе в реактор.

Указанные способы управления мощностью ядерного реактора связаны с подавлением возникающих ксеноновых колебаний [2-5]. Главным недостатком используемых в настоящее время методов маневренных режимов является увеличение объемов водообмена и/или интенсивные акты перемещения органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ), а также большая неравномерность поля энерговыделения активной зоны, что уменьшает глубину выгорания топлива при реализации маневренных режимов. Используемые алгоритмы управления мощностью ядерного реактора не исчерпывают всех проблем, связанных с работой энергоблока АЭС в суточном графике нагрузки. В частности, требуется обоснование работоспособности топлива, а также парогенераторов, турбины и другого оборудования [6].

В настоящее время при маневренных режимах осуществляют процесс перехода на ночной режим (с временным понижением мощности РУ и дальнейшим повышением до номинальных значений) очень высокоскоростным переходным процессом, который в дальнейшем определяет негативные стороны маневрирования мощности. Такое быстрое и значительное по амплитуде изменение мощности реакторной установки (РУ) вызывает также мощные аксиальные ксеноновые колебания в нисходящей фазе (то есть направленные на уменьшение мощности РУ). Таким образом, второй этап маневренного режима (удержание постоянной пониженной мощности в течение шестиочных часов) начинается и в дальнейшем сопровождается мощными ксеноновыми колебаниями (КК). Три группы ОР СУЗ, находящиеся на своих минимальных прогнозных положениях, вызывают большую неравномерность поля энерговыделения активной зоны, что уменьшает глубину выгорания топлива. Это подтверждается минимальным значением аксиального оффсета за пределами рекомендованной области, то есть минимальная мощность в ночной период вырабатывается главным образом нижней половиной активной зоны. Сразу после достижения минимальной мощности управляющая группа ОР СУЗ направляется в обратную сторону (вверх), совершая большое число шагов и внося положительную реактивность, компенсируя тем самым нисходящий тренд КК. Удержание мощности с высокой точностью – второй негативный фактор данного маневренного режима. Здесь возможен водообмен, дополнительный реактивностный фактор, если авторегулирование со стороны турбогенератора путем удержания давления пара в главном паровом коллекторе на постоянном уровне достигает своих допустимых границ. Увеличение объема водообмена по сравнению с базовым стационарным режимом функционирования реакторной установки – еще один негативный фактор при реализации данного маневренного режима [7].

Активная зона находится в непрерывном нестационарном состоянии, что ускоренно исчерпывает ресурс тепловыделяющих элементов, ОР СУЗ, системы группового и индивидуального управления и всех других органов управления реактивностью. В этот период авторегулирование производится относительно частыми актами. При нестационарном энерговыделении изменяются локальные тепло-гидравлические характеристики участков активной зоны, приводящие к изменению поканальных расходов теплоносителя и расходов поперечных пере-

течек теплоносителя. Соответственно, при реализации данного маневренного режима появляется неопределенность теплосъема или неопределенность энергонапряженности тепловыделяющих сборок. Таким образом, осуществляется довольно сложный маневренный режим, в котором задействованы все УРВ, а движения ОР СУЗ вверх и вниз направлены не только на изменение мощности, но и на ее удержание на постоянном уровне в результате подавления КК.

Природа ксеноновых колебаний

Ксеноновые колебания представляют собой низкочастотные колебания, которые вызваны, как известно, различными процессами (изменением положения регулирующей группы ОР СУЗ, изменением мощности реактора). Точное значение периода ксеноновых колебаний, а также их амплитуда зависят от многих факторов, но главным образом от параметров загрузки активной зоны ядерного реактора и отработанных эффективных суток, что с достаточной степенью точности вычисляется существующими и известными программными средствами (источники [2, 8, 9]).

В свою очередь, характеристики ксеноновых колебаний зависят от способа реактивностного воздействия на активную зону. Свободные ксеноновые колебания, возникающие после однократного изменения мощности реакторной установки, могут иметь устойчивый характер, если их амплитуда спадает во времени и, наоборот, могут иметь неустойчивый характер, если их амплитуда не совпадает во времени [10].

Изменение мощности ядерного реактора в результате возникновения ксеноновых колебаний удовлетворительно описывается формулой:

$$N(t) = N_1 e^{-\alpha t} \cos\left(\frac{2\pi}{T_{Xe}} t\right) + N_0, \quad (1)$$

где:

N – мощность реакторной установки, (N_0, N_1) – соответственно начальная мощность и конечная мощность при изменении режима работы;

α – индекс стабильности уменьшения амплитуды свободных ксеноновых колебаний (данний параметр определяет уменьшение амплитуды ксеноновых колебаний во времени);

t – время;

T_{Xe} – период ксеноновых колебаний;

$\alpha = \frac{1}{\tau_{Xe}}$, где τ_{Xe} – постоянная времени затухания (время, за которое, амплитуда ксеноновых колебаний уменьшится в «е» раз).

τ_{Xe} изменяется в довольно широких пределах: 20-60 часов. Частота колебаний $\omega = \frac{2\pi}{T_{Xe}}$, $T_{Xe} = (27-30)$ часов.

Новый способ реализации маневренных режимов

Жесткие требования к параметрам маневренного режима задаются потребителем сгенерированной АЭС мощности, т.е. Энергетической Системой (ЭС). Потребители электроэнергии не одномоментно прекращают ее потреблять, переходя от дневного к ночному режиму (рис. 1) [1111]. Это время – случайная величина, меняющаяся от одних суток к другим, от одного региона к другому. Поэтому быстрый, в течение 15 мин переход от мощности 95 % к мощности 55 % – требование завышенное. По этой же причине длительность ночного периода не равна в точности шести часам и может быть увеличена до 7-8 час (до четверти периода КК). Форма кривой суточного потребления не имеет резких перепадов и может быть аппроксимирована синусоидой с суточным периодом [11]. Поддержание с высокой точностью значения мощности РУ в ночном режиме (до 1 %) – также завышенное требование. Потребление имеет свой, куда больший естественный, разброс по мощности и значительно отличается в разных регионах. Следовательно, трудности исполнения функции ЭС по удержанию баланса между

многими генерирующими станциями (ТЭС, АЭС) и множеством потребителей сгенерированных мощностей перекладываются на АЭС.

Проблема суточного маневрирования состоит еще и в том, что цикличность достигается тем, что начало каждого цикла – одно и то же время суток, восемь часов – характеризуется одним и тем же состоянием всех органов регулирования реактивностью. При этом активная зона представляет собой весьма динамический объект с быстрыми и медленными за кампанию трендами, которые зависят от многих факторов, в частности, от того, сколько наработано эффективных суток, насколько выгорело топливо и выгорающие поглотители, с какой скоростью исчерпывается запас реактивности и т.д. [12, 13]. Быстрые во времени и с большой амплитудой изменения генерируемой мощности могут вызвать нежелательные переходные процессы в самой энергетической системе. Предложенный способ меняет основной принцип реализации маневренного режима и направлен на максимизацию работы реакторной установки с использованием ксеноновых колебаний путем управления нисходящей и восходящей фазами ксеноновых колебаний (исключая подавление или минимальное подавление ксеноновых колебаний).

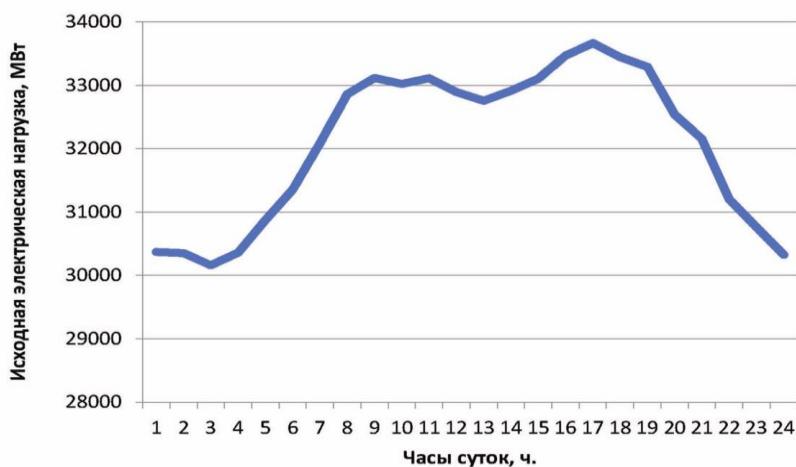


Рис. 1. Суточный график электрических нагрузок по ОЭС Урала (по состоянию на 01.02.2020)

Fig. 1. Daily load schedule in the Ural Unified Energy System (as of 01.02.2020)

При реализации предложенного способа управления мощностью ядерного реактора типа ВВЭР изменение мощности осуществляют путем управления нисходящей и восходящей фазами естественных ксеноновых колебаний. При этом управление осуществляют путем минимального (незначительного, однократного или немного более одного раза) перемещения органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ) или путем осуществления минимального (незначительного) борного регулирования (уменьшения или увеличения подачи концентрации борной кислоты), или одновременно путем минимального перемещения ОР СУЗ и путем осуществления минимального борного регулирования с достижением интегральных значений мощности реактора за ночной и дневной периоды регулирования. Т.н. первичные управляющие реактивностные воздействия (УРВ1 – соответствуют периоду перед переходом на ночной режим работы реакторной установки) осуществляют или однократно, или минимальное число раз для достижения требуемой нисходящей фазы ксеноновых колебаний. Введение отрицательной реактивности за счет увеличения концентрации ксенона происходит естественным образом, что позволяет минимизировать перемещение органов СУЗ, а также минимизировать осуществление борного регулирования (рис. 2). Далее, так называемые вторичные управляющие реактивностные воздействия (УРВ2 – соответствуют периоду перед переходом на дневной режим работы реакторной установки) осуществляют или однократно, или минимальное число раз для достижения требуемой восходящей фазы ксеноновых колебаний.

Введение положительной реактивности за счет уменьшения концентрации ксенона происходит естественным образом, что также позволяет минимизировать перемещение органов СУЗ, а также минимизировать осуществление борного регулирования. Далее, т.н. последующие управляющие реактивностные воздействия (УРВ3 – соответствуют периоду перед поддержанием дневного режима работы реакторной установки) осуществляют или однократно, или минимальное число раз для достижения требуемой восходящей фазы ксеноновых колебаний. Для этого на первом этапе осуществляют подготовку управляющих реактивностных воздействий (УРВ1) для реализации требуемой нисходящей фазы ксеноновых колебаний. Подготовку осуществляют путем первичной настройки положения ОР СУЗ и/или путем определения количества концентрации борной кислоты, которую необходимо повысить для подачи в первый контур, которые обеспечивают требуемую нисходящую фазу ксеноновых колебаний, обеспечивающую снижение мощности реакторной установки при работе в ночной период.

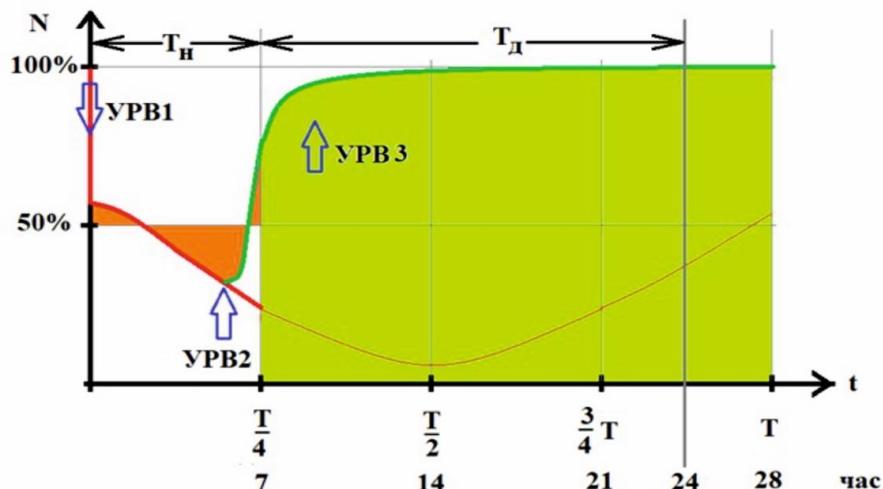


Рис. 2. Вариант изменения мощности РУ с использованием ксеноновых колебаний

Fig. 2. Variant of changing the reactor power using xenon oscillations

Далее реализуют требуемую фазу нисходящих ксеноновых колебаний путем управляющих реактивностных воздействий (УРВ1), т.е. осуществляют минимальное (незначительное) однократное, либо немного более одного раза перемещение ОР СУЗ, либо осуществляют минимальное (незначительное) повышение подачи концентрации борной кислоты, либо одновременно осуществляют и минимальное перемещение ОР СУЗ и минимальное повышение подачи концентрации борной кислоты. После реализации требуемой нисходящей фазы ксеноновых колебаний идет работа реакторной установки в ночной период на монотонной фазе ксеноновых колебаний без управляющих реактивностных воздействий.

Далее для последующей регулировки мощности реакторной установки (до начала дневного периода работы реакторной установки) осуществляют подготовку управляющих реактивностных воздействий (УРВ2) для реализации требуемой восходящей фазы ксеноновых колебаний путем настройки положения ОР СУЗ и/или путем определения количества концентрации борной кислоты, которую необходимо понизить для подачи в первый контур, которые обеспечивают требуемую восходящую фазу ксеноновых колебаний, обеспечивающую повышение мощности реакторной установки при работе в дневной период.

Далее реализуют требуемую фазу восходящих ксеноновых колебаний путем управляющих реактивностных воздействий (УРВ2), т.е. осуществляют минимальное (незначительное) однократное, либо немного более одного раза перемещение ОР СУЗ, либо осуществляют ми-

нимальное (незначительное) снижение подачи концентрации борной кислоты, либо одновременно осуществляют и минимальное перемещение ОР СУЗ и минимальное снижение подачи концентрации борной кислоты.

Далее для стабилизации восходящей фазы ксеноновых колебаний, обеспечивающей стабильную работу реакторной установки в дневной период с требуемой мощностью реакторной установки, осуществляют подготовку управляющих реактивностных воздействий (УРВ3) для реализации стабильности восходящей фазы ксеноновых колебаний путем настройки положения ОР СУЗ и/или путем определения количества концентрации борной кислоты, которую необходимо понизить для подачи в первый контур, которые обеспечат стабильность восходящей фазы ксеноновых колебаний, обеспечивающей стабильную мощность работы реакторной установки при работе до окончания дневного режима.

Далее реализуют стабильность восходящей фазы ксеноновых колебаний путем управляющих реактивностных воздействий (УРВ3), т.е. осуществляют минимальное (незначительное) однократное, либо немного более одного раза перемещение ОР СУЗ, либо осуществляют минимальное (незначительное) снижение подачи концентрации борной кислоты, либо одновременно осуществляют и минимальное перемещение ОР СУЗ и минимальное снижение подачи концентрации борной кислоты с достижением стабильности восходящей фазы ксеноновых колебаний.

По окончании дневного периода работы реакторной установки и перед началом ночных периодов работы реакторной установки возвращаются к реализации первого этапа. Нисходящая фаза ксеноновых колебаний, если ее отсчитывать сразу после окончания переходного процесса (95-55 %), составляет четверть периода свободных ксеноновых колебаний, то есть примерно семь часов, что близко к длительности ночных периодов на пониженнной мощности реакторной установки. Возбуждение нисходящей фазы ксеноновых колебаний реализует переход в ночной режим (95-55 %) работы реакторной установки [14]. При этом ночной режим работы реакторной установки реализуется исключительно на свободных ксеноновых колебаниях. По истечении четверти периода свободных ксеноновых колебаний минимальным воздействием ОР СУЗ и/или терморегулированием достигают необходимой фазы ксеноновых колебаний, которая увеличивает мощность реакторной установки, т.е. переходят в дневной режим работы реакторной установки. Таким образом добиваются естественного авторегулирования за счет ксеноновых колебаний и число актов управляющих реактивностных воздействий значительно снижают.

Если требования к кривой изменения мощности выразить не в мгновенных значениях, а в усредненных, то интенсивность управляющих реактивностных воздействий снизится:

$$\frac{1}{T_h} \int_0^{T_h} N(t) dt = 55\% \quad (2)$$

$$\frac{1}{T_d} \int_{T_h}^{T_d} N(t) dt = 95\% \quad (3)$$

где T_h – ночной период работы реакторной установки; T_d – дневной период работы реакторной установки.

Экономические расчеты за генерирование мощности проводятся в средних, а не мгновенных единицах. Средняя сгенерированная мощность за ночной период будет в точности такой же, как и в соответствии с требованиями по мгновенной мощности.

Итак, допускается, что ночной период длиною $T_h = \frac{T_{xe}}{4}$ совпадает с четвертью периода свободных ксеноновых колебаний. Они вызываются переходным процессом 95-45 % (УРВ1), в котором параметры ($N_0, N_1, \tau_{xe}, T_{xe}$) таковы, что выполняется условие (02) при том, что до

момента времени $\frac{T_{xe}}{4}$ будет произведено УРВ2, которое подготовит выполнение интегрального условия (03). Далее возможно УРВ3, которое стабилизирует восходящую фазу ксеноновых колебаний.

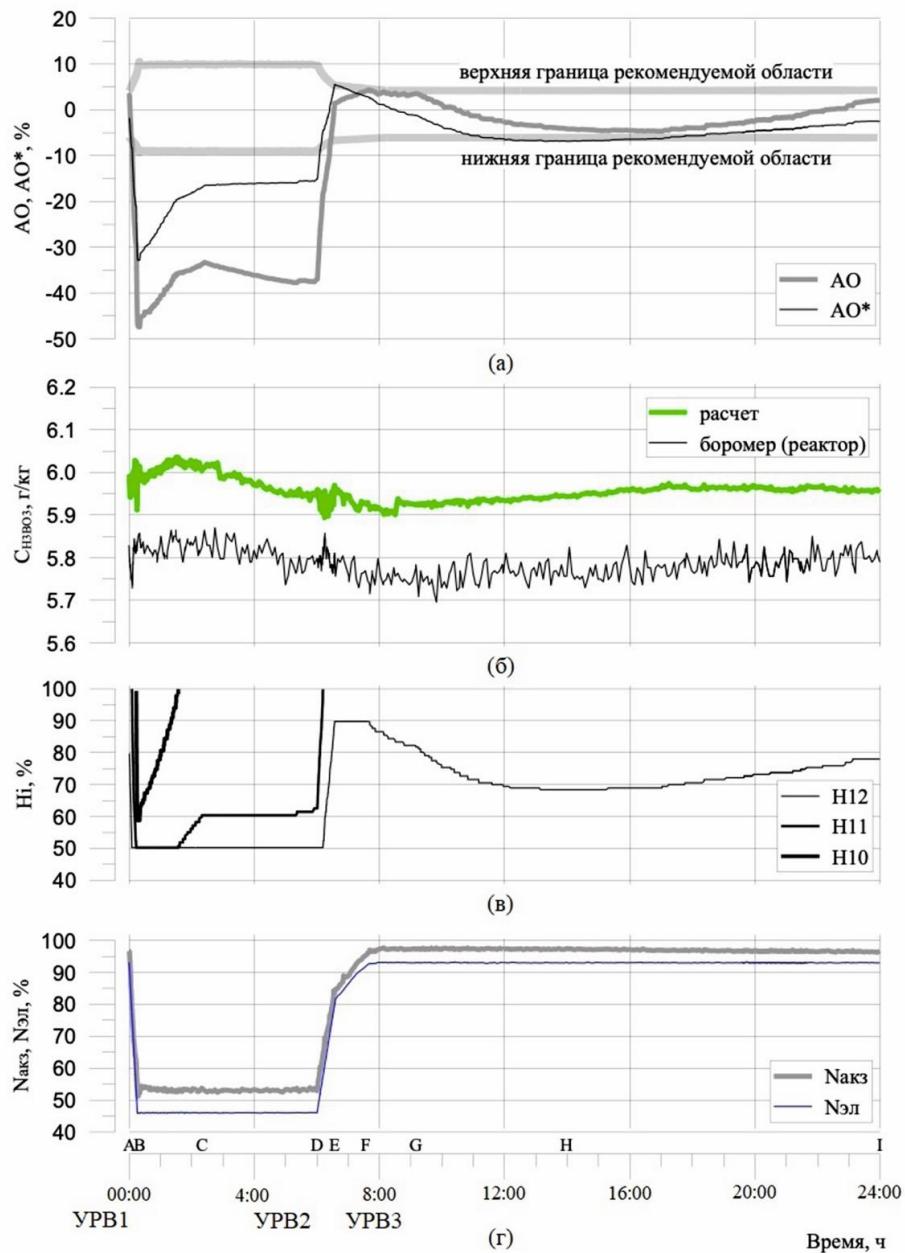


Рис. 3. Пример маневренного режима на блоке ВВЭР-1200 (Нововоронежская АЭС) на маневренные режимы, проведенного в 2022 г.

Fig. 3. An example of a load-following mode at a WWER-1200 (Novovoronezh NPP) carried out in 2022

Далее приведен пример испытания блока реакторной установки на маневренные режимы, проведенного в 2022 г. (Нововоронежская АЭС). Испытания проводились как путем воздействия на блоки стержней 10-й (H10), 11-й (H11) и 12-й (H12) групп стержней (рис. 3 (в)), а также путем управления подачи концентрации борной кислоты $C_{\text{НЗВОЗ}}$ (повышение концентрации или понижение концентрации борной кислоты, рис. 3 (б)). Причем испытания прово-

дились как при отдельном регулировании положения стержней, так и отдельным регулированием концентрации борной кислоты, так и одновременным воздействие на группы стержней и управлением концентрацией борной кислоты.

Из графика (а) рис. 3 видно изменений аксиального оффсета во времени (с начала ночных периода и до окончания дневного периода), а из графика (г) рис. 3 видно изменение мощности реактора (с начала ночных периода и до окончания дневного периода) при управлении ксеноновыми колебаниями воздействием на ОР СУЗ и борным регулированием.

На графиках а-г рис. 3 применяются следующие обозначения:

- АО – аксиальный оффсет распределения энерговыделения, %
- АО* – равновесный аксиальный оффсет распределения энерговыделения, %;
- Снвз – концентрация борной кислоты;
- H_i – положение группы ОР СУЗ с номером « i », % от высоты активной зоны;
- $N_{акз}$ – мощность энерговыделения активной зоны, % $N_{ном}(р)$
- $N_{эл}$ – электрическая мощность энергоблока, % $N_{ном}(э)$
- $(N_{ном}(р))$ – номинальная мощность реактора, 3200 МВт, $N_{ном}(э)$ – номинальная электрическая мощность реактора, 1200 МВт.

Подготовку перехода на ночной режим работы реакторной установки осуществляют, преимущественно, в 23:00 (однако могут начинать подготовку и в другое удобное и расчетное время). Переход на ночной режим работы осуществляют ближе к 00:00 (применяют УРВ1). Для этого сначала резко опустили блоки стержней 10-й группы (Н10), 11-й группы (Н11) и 12-й группы (Н12), а затем подняли до самого верха блок стержней 10-й группы (Н10). Концентрация ксенона возросла и мощность реакторной установки снизилась, при этом работа реакторной установки происходит на свободных ксеноновых колебаниях. В период, примерно, с 1:00 до 2:00 немногого приподняли блок стержней 11-й группы (Н11), сохранив необходимую концентрацию ксенона для работы реакторной установки в требуемой мощности, соответствующей ночному периоду работы. При необходимости повышали концентрацию борной кислоты, подаваемой в первый контур. По окончании ночного периода, примерно с 6:00 до 7:00 резко подняли до самого верха блок стержней 11-й группы (Н11) и приподняли блок стержней 12-й группы (Н12) (применяют УРВ2).

При этом при необходимости можно понижать концентрацию борной кислоты для подачи в первый контур. Таким образом, добившись снижения концентрации ксенона, осуществляют управление восходящей фазой ксеноновых колебаний, переходя на дневной режим работы реакторной установки. Далее, в оставшийся период (примерно с 7:00 до 24:00) осуществляют незначительное перемещение блока стержней 12-й группы (Н12) для стабилизации восходящей фазы ксеноновых колебаний и сохранения мощности работы реакторной установки в оставшийся дневной период до перехода на ночной режим работы (применяют УРВ3). При этом, при необходимости осуществляли незначительное повышение концентрации борной кислоты для подачи в первый контур.

Кроме того, при проведении испытаний осуществляли комбинации управления нисходящей и восходящей фазами ксеноновых колебаний, в частности, вместо перемещения соответствующих блоков стержней соответствующих групп стержней при переходе на ночной режим работы осуществляли сначала незначительное повышение концентрации борной кислоты для подачи в первый контур (с достижением требуемой нисходящей фазы ксеноновых колебаний), затем плавное понижение концентрации борной кислоты (с достижением сохранения требуемой нисходящей фазы ксеноновых колебаний), а после перехода на дневной режим работы (при распаде ксенона) осуществляли незначительное повышение концентрации борной кислоты для сохранения и стабилизации восходящей фазы ксеноновых колебаний. В данном случае при необходимости осуществляли также незначительное перемещение блоков стержней определенных групп стержней, добиваясь соответствующей нисходящей и восходящей фаз ксеноновых колебаний.

Таким образом, благодаря реализации предложенного способа с использованием нисходящей и восходящей фазы ксеноновых колебаний для управления мощностью ядерного реактора увеличивается эффективность и экономичность работы ядерной энергетической установки за счет эффективности использования топлива и увеличения ресурса органов СУЗ при циклических изменениях суточной нагрузки. Управление ксеноновыми колебаниями реализует совершенно новый принцип управления мощностью ядерного реактора, который позволяет саморегулирования мощностью реакторной установки, минимизировать управляющие реактивностные воздействия (термомеханические нагрузки), способные быстро исчерпать ресурс ОР СУЗ, тепловыделяющих элементов, тепловыделяющих сборок, а также другого оборудования, участвующего в процессе регулирования мощности реакторной установки. Регулирование мощности ядерного реактора путем управления ксеноновыми колебаниями позволяет снизить постоянные управляющие реактивностные воздействия, в частности, снизить перемещение органов регулирования системы управления и защиты, уменьшить объем водообмена борной кислотой и чистым дистиллятом, а также упростить алгоритм автоуправления реактором со стороны второго контура, что существенно уменьшает вероятность ошибки оператора. Кроме того, минимальное воздействие органами управления для регулирования мощности с использованием ксеноновых колебаний в требуемой фазе позволяет повысить безопасность эксплуатации реакторной установки, повысить надежность работы всего оборудования, а также увеличить ресурсные характеристики оборудования реакторной установки при циклических изменениях суточной нагрузки за счет того, что экономятся ресурсы, минимизируются термомеханические нагрузки и увеличивается срок службы оборудования, участвующего в процессе регулирования мощностью ядерного реактора.

Кроме того, регулирование мощности ядерного реактора путем использования ксеноновых колебаний позволяет реализовать достаточно «мягкий» характер переходных процессов ввиду использования естественных свойств саморегулирования, поскольку при регулировании достигаются не «мгновенные» значения мощности реактора, а его интегральные значения за ночной и дневной периоды регулирования [15].

Моделирование предложенного подхода

Расчетное моделирование для проверки предложенного способа реализации маневренных режимов выполнялось в отделе ядерной безопасности и надежности (ОЯБиН) Нововоронежской с помощью ПС «Имитатор реактора» (далее – ИР). ИР предназначен для проведения расчетов в проектных и исследовательских работах по усовершенствованию алгоритмов управления реактором, а также для работы в составе СВРК на действующих АЭС в качестве программного средства информационной поддержки оператора.

В качестве исходных данных, была использована 7-я топливная загрузка энергоблока №1 Нововоронежской АЭС-2. На энергоблоке эксплуатируются стационарные топливные циклы длительностью до 18 месяцев. Для расчетного моделирования использовались данные нейтронно-физических характеристик активной зоны на момент кампании ~16 эффективных суток. Энергоблок находился в стационарном состоянии на уровне мощности ~ 100.5 %, положение 12-ой группы (H12) – 94.6 %, концентрация борной кислоты $C_{бор}=7.26 \text{ г/дм}^3$. Для создания исходного состояния перед маневрированием мощностью, было смоделировано снижение тепловой мощности до 95 % $N_{ном}$ со скоростью 0.1 %/мин (рис. 4, график б, точка 1). Снижение мощности выполнялось увеличением концентрации борной кислоты в теплоноситель первого контура, после чего положение рабочей группы составило H12=94.6 %, а концентрация борной кислоты $C_{бор}=7.35 \text{ г/дм}^3$. Далее выполнялась выдержка времени ~12 часов для достижения стационарного состояния работы реактора, при этом поддержание мощности и компенсация ксеноновых эффектов выполнялись водообменом (рис. 4, график б, точка 2).

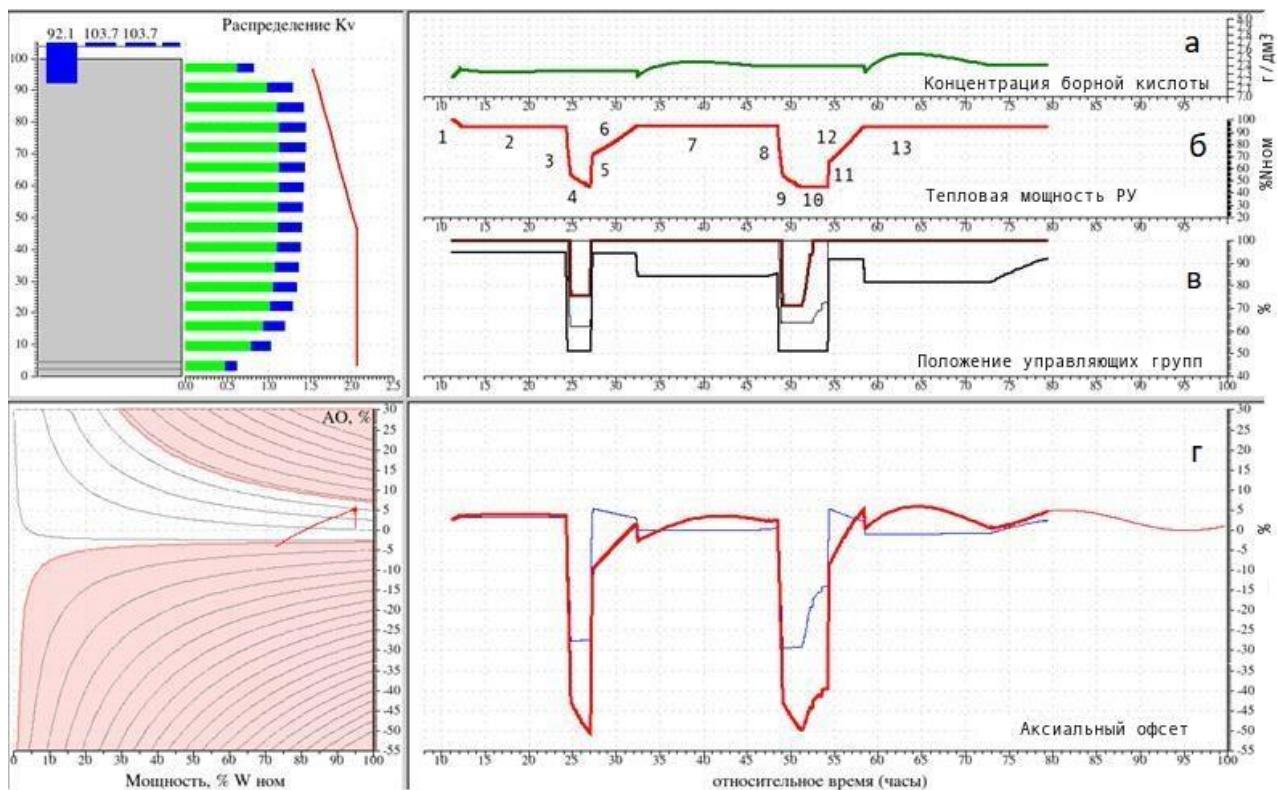


Рис. 4. Графики изменения состояния ВВЭР-1200 при моделировании маневренных режимов перехода с уровня мощности 95-45-95 %Nном
 а – концентрация борной кислоты; б – тепловая мощность;
 в – положение управляющих групп; г – аксиальный оффсет

Fig. 4. Changes in the state of WWER-1200 during simulation of load-following modes of transition from a power level of 95-45-95 %Nrated:

a) – boric acid concentration; б) – thermal power; в) – position of the control groups; г) – axial offset

В рамках минимизации управляемых воздействия, путем изменения положения управляемых групп до $H12=51.1\%$, $H11=62.2\%$, $H10=75.7\%$ была снижена тепловая мощность РУ до 55 % $N_{\text{ном}}$ со скоростью 2 %/мин. (рис. 4, график б, точка 3). В течение 140 мин тепловая мощность РУ снизилась до значения 45 % $N_{\text{ном}}$ на отравлении ксеноном (рис. 4, график б, точка 4). После достижения заданной мощности, поочередным извлечением управляемых групп с номерами № 10, 11 и 12 тепловая мощность РУ была увеличена до уровня 72.1 % $N_{\text{ном}}$ (рис. 4, график б, этап 5). Положения управляемых групп составили: $H12=94.1\%$, $H11$ -на верхних конечных выключателях (ВКВ), $H10$ на ВКВ. Далее, в течение 5 часов, за счет разотравления активной зоны, мощность РУ увеличивается до 95 % $N_{\text{ном}}$ (рис. 4, график б, этап 6). Для подавления ксеноновых колебаний и ограничения тепловой мощности, в период «дневной работы» энергоблока, рабочая группа была погружена до значения $H12=84.1\%$ (рис. 4, график б, точка 7) и выполнена коррекция концентрации борной кислоты в теплоносителе 1 контуре не величину $\sim 0.1-0.15 \text{ г}/\text{dm}^3$ (рис. 4, график а, точка 8).

Для определения возможности описанной выше работы в циклическом, ежедневном режиме был выполнен расчет второго суточного цикла маневрирования мощностью. При этом второй цикл выполнялся с более длинной выдержкой на «малых» уровнях мощности.

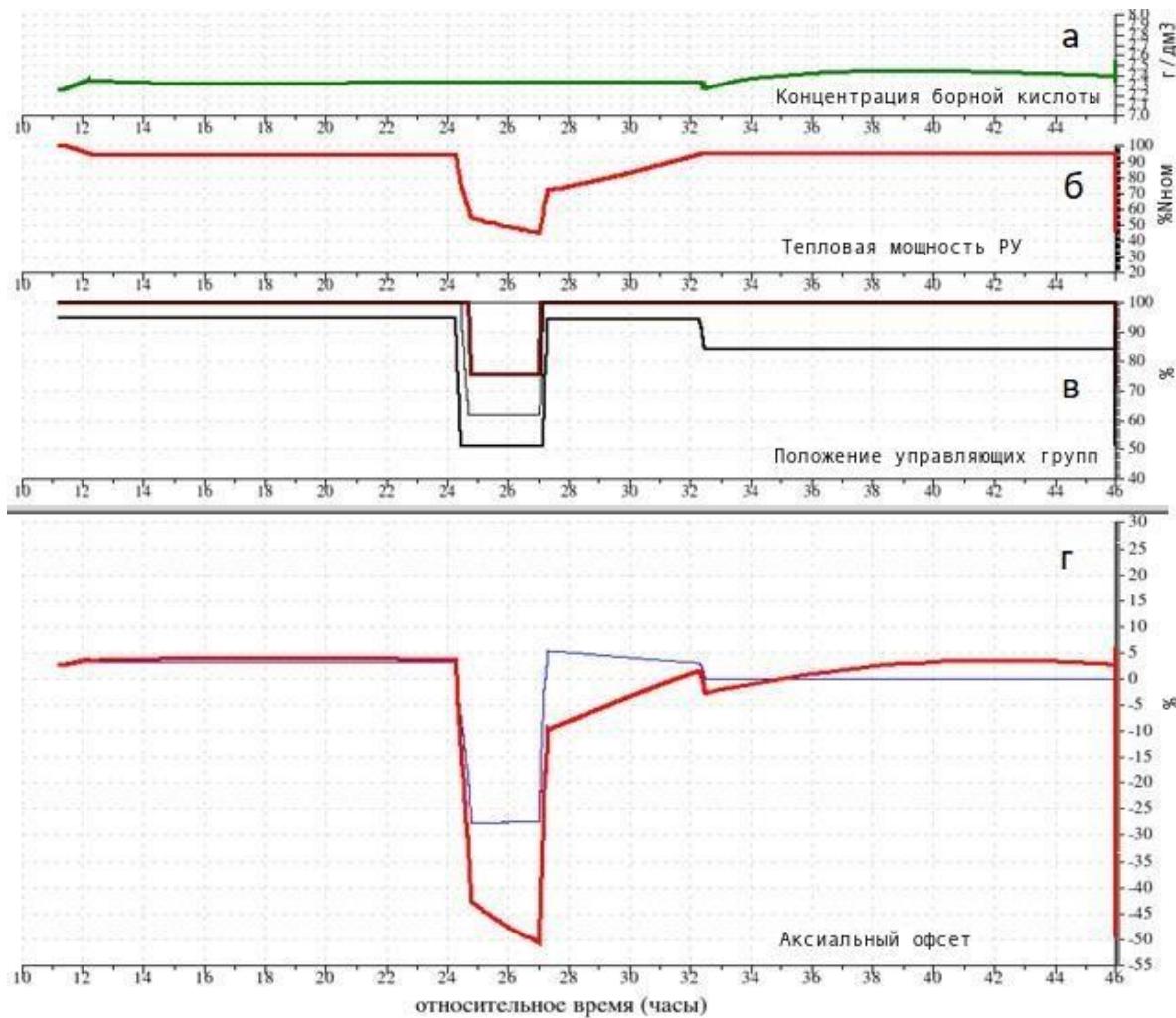


Рис. 5. Графики изменения состояния ВВЭР-1200 при моделировании первого суточного цикла (укрупненно этапы с 1 по 7 по рис. 4)
Fig. 5. Changes in the state of WWER-1200 during the simulation of the first daily cycle (enlarged stages 1-7 from fig. 4)

В рамках минимизации управляемых воздействия путем, изменение положения управляемых групп до $H12=51.1\%$, $H11=62.2\%$, $H10=75.7\%$ была снижена тепловая мощность РУ до $54.6\% N_{ном}$ со скоростью $2\%/\text{мин.}$ (рис. 4, график б, точка 8). В течение 120 мин тепловая мощность РУ снизилась до значения $45.1\% N_{ном}$ на отравлении ксеноном (рис. 4, график б, точка 9). Для поддержания тепловой мощности выполнялось извлечение управляемых групп с номерами № 10 и 11 в течение 100 мин до положения $H11=72.7\%$, $H10 - \text{BKB}$ (рис. 4, график б, точка 10). После достижения заданного времени работы на пониженном уровне мощности, поочередным извлечением управляемых групп с номерами № 11 и 12 тепловая мощность РУ была увеличена до уровня $65.1\% N_{ном}$ (рис. 4, график б, точка 11). Положения управляемых групп составили: $H12=91.6\%$, $H11-\text{BKB}$, $H10-\text{BKB}$. Далее, в течение 4 часов, за счет разотравления активной зоны, мощность РУ увеличивается до $95\% N_{ном}$ (рис. 4, график б, точка 12).

Для подавления ксеноновых колебаний и ограничения тепловой мощности, в период «дневной работы» энергоблока, рабочая группа была погружена до значения $H12=81.6\%$ (рис. 4, график б, точка 13), затем в течение 14 часов выполнялась коррекция концентрации борной кислоты в теплоносителе первого контура на величину $\sim 0.2\text{ г/дм}^3$ (рис. 6, график а), с последующим подавлением амплитуды ксеноновых колебаний путем подъема 12-ой группы на нисходящей фазе оффсета до $H12=92.1\%$.

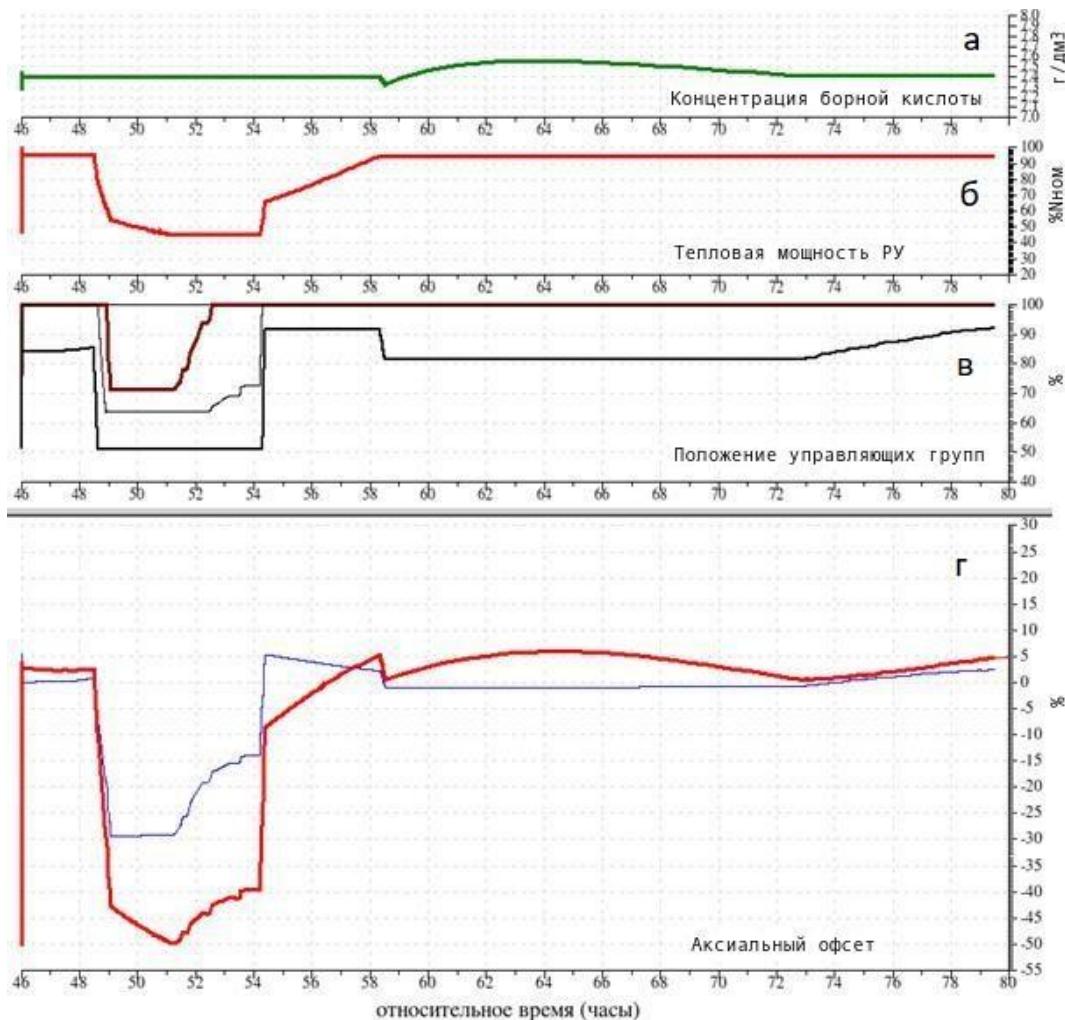


Рис. 6. Графики изменения состояния ВВЭР-1200 при моделировании второго суточного цикла (усложненно этапы с 8 по 13 по рис. 4)

Fig. 6. Changes in the state of WWER-1200 during the simulation of the second daily cycle (enlarged stages 8-13 from fig. 4)

Представленный подход к работе АЭС в маневренном режиме заметно упрощает процедуры управления полем энерговыделения, снижает нагрузку на оператора управляющего РУ и приводит к снижению объемов водообмена.

Заключение

- Предложен новый способ управления мощностью ядерного реактора типа ВВЭР, заключающийся в том, что изменение мощности осуществляют путем управления нисходящей и восходящей фазами естественных ксеноновых колебаний с минимальным воздействием на реактивность путем, по меньшей мере, однократного перемещения органов регулирования системы управления и защиты и/или путем минимального борного регулирования с достижением интегральных значений мощности реактора за ночной и дневной периоды регулирования.
- Главное преимущество нового способа управления мощностью состоит в повышении безопасности эксплуатации реакторной установки за счет использования ксеноновых колебаний в требуемой фазе, надежности оборудования и увеличении ресурсных характеристик оборудования реакторной установки при циклических изменениях суточной нагрузки за счет минимизации термомеханических нагрузок, исчерпывающих ресурс оборудования, участвующего в процессе регулирования, уменьшение объема водообмена, а также

исключение ошибок оператора за счет упрощения алгоритма автоуправления реактором со стороны второго контура.

3. Целесообразно включить в программу испытаний маневренных режимов ВВЭР-1200 предложенный авторами метод для практической оценки его эффективности.

Библиографический список

1. **Выговский, С.Б.** Исследование алгоритмов управления ЯЭУ с ВВЭР-1200 для реализации суточных маневренных режимов на АЭС / С.Б. Выговский, М.Р. Аль Малкави, А.Г. Хачатрян // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2019. – № 2. – С. 67-79.
2. **Аверьянова, С.П.** Исследование ксеноновых переходных процессов на Нововоронежской АЭС / С.П. Аверьянова, Н.С. Вохмянина, Д.А. Злобин [и др.] // Атомная Энергия. – 2018. – Т. 124. – № 4. – С. 183-188.
3. **Аверьянова, С.П.** Ксеноновая устойчивость ВВЭР1200 / С.П. Аверьянова, П.Е. Филимонов // Атомная энергия. 2009. – Т. 107. – № 6. – С. 348-351
4. **Аверьянова, С.П.** Температурное регулирование и маневренность ВВЭР1000 / С.П. Аверьянова, А.А. Дубов, К.Б. Косоуров [и др.] // Атомная энергия. – 2010. – Т. 109. – № 4. – С. 198-202.
5. **Аверьянова, С.П.** Работа ВВЭР 1200/1300 в суточном графике нагрузки / С.П. Аверьянова, А.А. Дубов, К.Б. Косоуров [и др.] // Атомная энергия. – 2012. – Т. 113. – № 5. – С. 247-252.
6. **Аверьянова, С.П.** Развитие способов управления ВВЭР1200/1300 в суточном графике нагрузки / С.П. Аверьянова, А.А. Дубов, К.Б. Косоуров [и др.] // Атомная энергия. – 2013. – Т. 114. – № 5. – С. 249-253.
7. **Выговский, С.Б.** Оптимизация алгоритмов управления ЯЭУ с ВВЭР1200 для минимизации водообмена в 1-ом контуре при реализации суточных маневренных режимов / С.Б. Выговский, Р.Т. Аль Малкави [и др.] // Глобальная ядерная безопасность. – 2018. – № 3 (28). – С. 49-63.
8. **Поваров, В.П.** Экспериментальные исследования нейтронно-физических процессов в активной зоне ВВЭР1200 / В.П. Поваров, В.Ф. Украинцев, Е.И. Голубев [и др.]. – Нововоронеж: ООО РПГ «Девятое облако», 2021. – 264 с.
9. **Филимонов, П.Е.** Испытания нестационарных режимов работы ВВЭР1200 на первом энергоблоке Белорусской АЭС / П.Е. Филимонов, А.А. Дубов, Ю.М. Семченков [и др.]. // Атомная энергия. – 2021. – Т. 131 – № 5. – С. 243-249.
10. **Аркадов, Г.В.** Шумовой мониторинг в приложениях к реакторной установке ВВЭР1200. / Г.В. Аркадов, В.И. Павелко, М.Т. Слепов. – М.: Наука, 2021 – 222 с.
11. **Петров, М.Б.** Модель выравнивания суточного графика нагрузки потребителями электроэнергии / М.Б. Петров, К.Б. Кожев // Вестник Гуманитарного университета. – 2023. – № 4(43). – С. 124-134.
12. **Филимонов, П.Е.** Испытания нестационарных режимов работы ВВЭР-1200 на первом энергоблоке Белорусской АЭС / П.Е. Филимонов, А.А. Дубов, Ю.М. Семченков [и др.]. // Атомная энергия. – Т. 131. – № 5. – С. 243-248.
13. **Филимонов, П.Е.** Испытания ВВЭР1200 при эксплуатации в режиме суточного графика нагрузки на 6 энергоблоке Нововоронежской АЭС / П.Е. Филимонов, Ю.М. Семченков, В.В. Малышев [и др.]. // Атомная энергия. – 2020. – Т. 129. – № 3. – С. 123-129.
14. **Крипак, В.Р.** Оперативная оценка сходимости аксиальных ксеноновых колебаний энерговыделения ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 / В.Р. Крипак, В.Р. Тиунов, Г.А. Филимонов // Атомная энергия. – Т. 137. – № 3-4. – С. 143-146.
15. **Увакин, М.А.** Развитие методики обоснования безопасности ВВЭР в маневренных режимах посредством использования нейронной сети / М.А. Увакин, А.Л. Николаев, М.В. Антипов [и др.]. // Атомная энергия. – 2024 – Т. 136. – № 3-4. – С. 102-106.

References

1. Vyigovskii S.B., Al'Malkavi M.R. and Khachatrian A.G. 2019. “Issledovanie algoritmov upravleniya IaEU s VVER-1200 dlja realizatsii ustoichivosti maneuvrennykh rezhimov na AES” [Research of VVER-1200 NPP Control Algorithms for Daily Load Maneuvering at Nuclear Power Plants]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Iadernaiia energetika* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Nuclear Power Engineering], no. 2: 67-79.

2. Aver'yanova S.P., Vokhmyanina N.S., Zlobin D.A. [et al.]. 2018. "Issledovanie ksenonovykh perekhodnykh protsessov na Novovoronezhskoi AES" [Xenon Transient Analysis at Novovoronezh NPP]. *Atomnaia Energiia* [Atomic Energy] 124 (4): 183-188.
3. Aver'yanova S.P. and Filimonov P.E. 2009. "Ksenonovaia ustoichivost' VVER1200" [Xenon Stability of VVER-1200]. *Atomnaia Energiia* [Atomic Energy] 107 (6): 348-351.
4. Aver'yanova S.P., Dubov A.A., Kosourov K.B. [et al.]. 2010. "Temperaturnoe regulirovanie i manevrennost' VVER1000" [Temperature Control and Maneuverability of VVER-1000]. *Atomnaia Energiia* [Atomic Energy] 109 (4): 198-202.
5. Aver'yanova S.P., Dubov A.A., Kosourov K.B. [et al.]. 2012. "Rabota VVER 1200/1300 v sutochnom grafike nagruzki" [Operation of VVER-1200/1300 in Daily Load Schedule]. *Atomnaia Energiia* [Atomic Energy] 113 (5): 247-252.
6. Aver'yanova S.P., Dubov A.A., Kosourov K.B. [et al.]. 2013. "Razvitie sposobov upravlenii VVER1200/1300 v sutochnom grafike nagruzki" [Development of VVER-1200/1300 Control Methods in Daily Load Schedule]. *Atomnaia Energiia* [Atomic Energy] 114 (5): 249-253.
7. Vyigovskii S.B. Al'Malkavi R.T. [et al.]. 2018. "Optimizatsiiia algoritmov upravleniiia IaEU s VVER1200 dlja minimizatsii vodoobmena v 1-om konture pri realizatsiiutochnykh manevrennykh rezhimov" [Optimization of VVER-1200 NPP Control Algorithms for Minimizing Coolant Exchange in the Primary Circuit During Daily Load Maneuvering]. *Global'naia iadernaia bezopasnost'* [Global Nuclear Safety], no. 3 (28): 49-63.
8. Povarov V.P., Ukrantsev V.F., Golubev E.I. [et al.]. 2021. "Eksperimental'nye issledovaniia neitronnofizicheskikh protsessov v aktivnoi zone VVER1200" [Experimental Studies of Neutron-Physical Processes in the VVER-1200 Core]. Novovoronezh: OOO RPG "Deviatoe oblako".
9. Filimonov P.E., Dubov A.A., Semchenkov Yu.M. [et al.]. 2021. "Ispytaniia nestatsionarnykh rezhimov raboty VVER1200 na pervom energobloke Belorusskoi AES" [Testing of Non-Stationary Operation Modes of VVER-1200 at the First Power Unit of the Belarusian NPP]. *Atomnaia Energiia* [Atomic Energy] 131 (5): 243-249.
10. Arkadov G.V., Pavelko V.I. and M.T. Slepov. 2021. *Shumovoi monitoring v prilozheniakh k reaktornoi ustanovke VVER1200* [Noise Monitoring in Applications to the VVER-1200 Reactor Plant]. Moscow: Nauka.
11. Petrov M.B. and Kozhov K.B. 2023. "Model' vyravnivaniia autochnogo grafika nagruzki potrebiteliami elektroenergii" [A Model for Leveling the Daily Load Schedule by Electricity Consumers]. *Vestnik Gumanitarnogo universiteta* [Bulletin of the Humanitarian University], no. 4 (43): 124-134.
12. Filimonov P.E., Dubov A.A., Semchenkov Yu.M. [et al.]. 2021. "Ispytaniia nestatsionarnykh rezhimov raboty VVER-1200 na pervom energobloke Belorusskoi AES" [Testing of Non-Stationary Operation Modes of VVER-1200 at the First Power Unit of the Belarusian NPP]. *Atomnaia Energiia* [Atomic Energy] 131 (5): 243-248.
13. Filimonov P.E., Semchenkov Yu.M., Malyshev V.V. [et al.]. 2020. "Ispytaniia VVER1200 pri ekspluatatsii v rezhime autochnogo grafika nagruzki na 6 energobloke Novovoronezhskoi AES" [VVER-1200 Testing During Operation in Daily Load Schedule Mode at Unit 6 of Novovoronezh NPP]. *Atomnaia Energiia* [Atomic Energy] 129 (3): 123-129.
14. Kripak V.R., Tiunov V.R. and Filimonov G.A. 2023. "Operativnaia otsenka skhodimosti aksial'nykh ksenonovykh kolebanii energovydeleniiia VVER-1000 i VVER-1200" [Operational Assessment of Convergence of Axial Xenon Oscillations of Power Distribution in VVER-1000 and VVER-1200]. *Atomnaia Energiia* [Atomic Energy] 137 (3-4): 143-146.
15. Uvakin M.A., Nikolaev A.L., Antipov M.V. [et al.]. 2024. "Razvitie metodiki obosnovaniia bezopasnosti VVER v manevrennykh rezhimakh posredstvom ispol'zovaniia neironnoi seti" [Development of a Methodology for VVER Safety Justification in Maneuvering Modes Using Neural Networks]. *Atomnaia Energiia* [Atomic Energy] 136 (3-4): 102-106.

**Дата поступления
в редакцию: 24.07.2025**

**Дата принятия
к публикации: 05.11.2025**