

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ ИМЕНИ И. М. ФРАНКА

13-2019-51
На правах рукописи

ЦОЛМОН ЦОГТСАЙХАН

ИССЛЕДОВАНИЕ СЛУЧАЙНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ
РЕАКТИВНОСТИ РЕАКТОРА ИБР-2М

Специальность: 01.04.01 — приборы и методы
экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Отпечатано методом прямого репродуцирования
с оригинала, предоставленного автором.

Подписано в печать 25.10.2019.
Формат 60×90/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1,75. Уч.-изд. л. 1,29. Тираж 100 экз. Заказ № 59788.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.
E-mail: publish@jinr.ru
www.jinr.ru/publish/

Дубна 2019

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель: **ПЕПЕЛЬШЕВ Юрий Николаевич**, кандидат физико-математических наук, начальник группы №1 ядерной безопасности, Лаборатория нейтронной физики имени И.М. Франка Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты: **МАЛКОВ Андрей Павлович**, доктор технических наук, начальник управления ядерной безопасности, Госкорпорация «Росатом», АО «ГНЦ - Научно-исследовательский институт атомных реакторов»

АРТЕМЬЕВ Валерий Анатольевич, кандидат физико-математических наук, Автономная некоммерческая организация Научно-исследовательский институт технологии материалов, Москва

С электронной версией диссертации можно ознакомиться на официальном сайте Объединенного института ядерных исследований в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» по адресу: <http://dissertations.jinr.ru>.

С печатной версией диссертации можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ОИЯИ (г. Дубна, Московская область, ул. Жолио-Кюри, д. 6).

Ученый секретарь
диссертационного совета ОИЯИ

по физике конденсированных сред — ОИЯИ.04.01.2019.П,

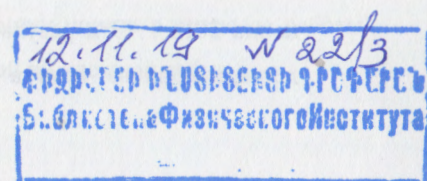
кандидат физико-математических наук

Т. И. Иванкина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Импульсный реактор ИБР-2М, сданный в эксплуатацию в 2012 г., есть модернизированная версия реактора ИБР-2, остановленного в 2006 г. в связи с выработкой ресурса. Потребовался принципиально новый подход к исследованию характеристик реактора ИБР-2М. По сравнению с реакторами стационарного типа чувствительность реактора ИБР-2М к шумам реактивности более чем на порядок выше. Это связано с тем, что кинетика реакторов типа ИБР-2 определяется импульсной долей запаздывающих нейтронов β_n , величина которой существенно меньше эффективной доли $\beta_{эф}$. Поэтому при переходе реактора из режима непрерывной мощности в импульсный режим флуктуации мощности, а именно энергии импульсов, автоматически возрастают в $\beta_{эф}/\beta_n$ раз, т. е. для реакторов на Pu-топливе в 14 раз, а на U^{235} – в 40 раз.

Случайные колебания реактивности ИБР-2М вызваны работой различных технологических систем реактора, определяющих нормальное его функционирование, таких как охлаждение активной зоны, подвижные отражатели и т.д. Возмущения реактивности, вызванные работой этих систем, влияют на управление реактора, процесс стабилизации мощности, работу аппаратуры контроля и т.д., т.е. непосредственно на безопасность и надежность эксплуатации реактора. Полные шумы мощности реактора достигают $\pm 20\%$ в режиме стабилизации. Анализ шумов мощности ИБР-2М позволяет определять различные изменения и нарушения в работе реактора и диагностировать измененное (нетипичное) состояние реактора на ранней стадии развития дефекта. Поэтому исследование нейтронных шумов на протяжении всей работы реактора имеет большое значение для определения условий его безопасной и надежной работы.



Цель работы. Основной целью диссертационной работы является исследование различных случайных возмущений реактивности для повышения безопасности эксплуатации реактора ИБР-2М.

Этим целям были подчинены следующие направления работы автора:

1. Разработка методик и создание программного обеспечения для статистического анализа колебаний реакторных параметров и диагностики шумового состояния ИБР-2М.
2. Исследование шумов энергии импульсов и их динамики в зависимости от времени работы ИБР-2М и выгорания топлива.
3. Оценка влияния шумов натриевой системы охлаждения активной зоны ИБР-2М на колебания реактивности и их взаимосвязи.
4. Разработка алгоритма прогнозирования шумов мощности и колебаний основных термодинамических параметров первого контура системы охлаждения активной зоны ИБР-2М.

Научная новизна исследования

1. Разработаны методики, и создано программное обеспечение для исследования случайных возмущений реактивности модернизированного реактора ИБР-2М. Использовались различные методы анализа статистических данных, в том числе метод прогнозирования. Выбранные методы позволили детально исследовать структуру различий между объектами в шумах основных реакторных параметров и оценить изменения в этих структурах, а также оптимизировать параметры работы системы автоматического регулирования мощности.
2. Проведено исследование динамики шумового состояния реактора в зависимости от выгорания топлива за значительный период работы реактора – с момента ввода ИБР-2М в эксплуатацию в 2011 г. и до конца 2016 г. Эти результаты позволили диагностировать изменения деградационного типа в шумовом состоянии реактора, определить

диапазоны частот, уровень колебаний и возможные причины появления этих изменений.

3. Проведены исследования по влиянию колебаний термодинамических параметров первого контура натриевой системы охлаждения активной зоны реактора ИБР-2М на мощность. Получены данные о статистике колебаний параметров контура, их взаимосвязи, и даны оценки по влиянию шумов первого контура системы охлаждения активной зоны на шумы реактивности и мощности, а также на работу системы автоматического регулирования мощности (АР).
4. Проведены исследования динамики “тонкой” структуры спектральной плотности колебаний энергии импульсов. Для этого были использованы методы кластерного анализа как алгоритма организации больших массивов данных в значимые структуры, что позволило применить их в диагностике реактора. С помощью этих методов были изучены очень слабые возмущения реактивности и их изменение в процессе работы реактора.
5. С помощью нейронных сетей была предложена возможность прогнозирования медленных колебаний реактивности, связанных со случайными изменениями термодинамических параметров натриевой системы охлаждения реактора. Показано, что прогнозирование колебаний расхода, температуры и подогрева натрия в активной зоне позволяет в три раза уменьшить влияние нестабильности параметров первого контура на реактивность и, соответственно, мощность. Таким образом можно снизить требования к работе системы АР.

Практическая значимость работы заключается в том, что полученные результаты позволили детально оценить шумовое состояние реактора, выбрать оптимальные параметры работы системы автоматического регулирования мощности, исследовать динамику шумов в процессе работы реактора и определить условия его безопасной и надежной работы.

Показана возможность с помощью прогнозирования колебаний некоторых параметров натриевой системы охлаждения активной зоны уменьшить колебания реактивности и, соответственно, тепловой мощности.

Основные результаты диссертации, выносимые на защиту:

1. Разработаны методики, и создано программное обеспечение для статистического анализа колебаний реакторных параметров и диагностики шумового состояния ИБР-2М.
2. Проведено исследование шумов энергии импульсов и их динамики в зависимости от времени работы ИБР-2М (выгорания топлива), что позволило выбрать оптимальные параметры работы системы автоматического регулирования мощности.
3. Определены статистические характеристики колебаний основных термодинамических параметров первого контура системы охлаждения активной зоны. Изучены их взаимосвязи, а также даны оценки влияния шумов натриевой системы охлаждения активной зоны на шум реактивности и мощности реактора.
4. Разработан алгоритм прогнозирования колебаний мощности и колебаний основных параметров первого контура системы охлаждения активной зоны ИБР-2М. Показана возможность с помощью прогноза на основе нейронных сетей в три раза уменьшить медленные колебания реактивности и, соответственно, тепловой мощности.
5. Показано, что за весь анализируемый период работы реактора при энерговыработке до ~1100 МВт·сут шумы энергии импульсов в процессе работы ИБР-2М существенно меняются как по спектральному составу, так и по уровню колебаний. Уровень шумов при указанной энерговыработке существенно меньше допустимого. Кроме того, малый уровень низкочастотных шумов свидетельствует об отсутствии достаточных признаков колебательной

неустойчивости ИБР-2М и, соответственно, значительном запасе по энерговыработке до появления неустойчивости.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы доложены на следующих конференциях: International Conference on Mathematical Modeling and Computational Physics (13-17 July, 2015, Stará Lesná, High Tatra Mountains, Slovakia); XXV International Symposium on Nuclear Electronics and Computing (28 September – 02 October, 2015, Montenegro, Budva); XX Научной конференции молодых ученых и специалистов (14-18 марта 2016 г., ОИЯИ, Дубна); VI International Conference on Contemporary Physics (7-10 June, 2016, Ulaanbaatar, Mongolia); International Conference on Mathematical Modeling and Computational Physics (3-7 July, 2017, JINR, Dubna, Russia); International Conference on Developments and Application of Nuclear Technologies (10-13 September, 2017, Krakow, Poland).

Основные результаты по теме диссертации изложены в 7 печатных изданиях, 4 из которых изданы в рецензируемых журналах.

Личный вклад автора в проведение исследований и получение приведенных в работе результатов является определяющим. Все представленные результаты получены либо самим автором, либо при его непосредственном участии.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения. Полный объем диссертации составляет 109 страниц с 41 рисунками и 17 таблицами. Список литературы содержит 78 наименований.

Основное содержание работы

Во **введении** кратко рассмотрена актуальность работы и сформулирована цель настоящего исследования.

В первой главе приведены подробное описание реактора ИБР-2М и его основные характеристики.

Импульсный исследовательский реактор периодического действия ИБР-2М эксплуатируется в Дубне (Россия) с проектной средней мощностью 2 МВт и 1830 МВт в импульсе. С помощью модулятора реактивности создается импульс реактивности. В штатном режиме положение блоков регулирования и управления таково, что реактор в течение ~ 400 мкс находится в надкритическом состоянии на мгновенных нейтронах. Один раз за цикл длительностью 0,2 с реактор ИБР-2М на короткое время, менее 1 мс, переводится из глубоко подкритического состояния ($k_{эф} \approx 0,97$) в надкритическое на мгновенных нейтронах. В течение этого времени происходит стремительный рост мощности. Особенностью реактора типа ИБР-2 является высокая чувствительность к флуктуациям реактивности, которая в 40 раз выше, чем, например, у реактора стационарного типа с урановым топливом.

Во второй главе описана методика измерения и анализа шумов основных реакторных параметров. Рассмотрены методы анализа случайных процессов и результаты обработки. Представлены данные о динамике шумового состояния реактора в зависимости от выгорания топлива за значительный период работы реактора – с момента ввода ИБР-2М в эксплуатацию в 2011 г. и до конца 2016 г. Определены диапазоны частот, уровень колебаний, и указаны возможные причины появления колебаний в шумах энергии импульсов. Исследованы характеристики шумов энергии импульсов при штатном снижении и подъеме мощности в отдельных реакторных циклах с 2011–2016 гг. от 40 до 2000 кВт. Отмечен несимметричный характер распределения энергии импульсов при линейном поведении быстрой мощностной обратной связи. Показано, что основными источниками колебаний энергии импульсов являются вибрации лопастей

подвижных отражателей (ПО) и низкочастотные колебания температуры и расхода натриевого теплоносителя при его протекании через активную зону.

На рис.1 показано изменение спектральной плотности колебаний энергии импульсов в начале (2011 г.), в середине (2013, 2014 гг.) и в конце (2016 г.) исследуемого периода работы реактора. Как видно из рис. 1, в спектре колебаний энергии импульсов имеются несколько пиков большой интенсивности, особенно на частотах 0,82 и 1,77 Гц. Эти пики, как и другие пики меньшей амплитуды, обусловлены осевыми вибрациями лопастей ПО [1-3]. Они наглядно видны в диапазонах частот, 0,78-0,85 и 1,36-1,80 Гц (заштрихованные области на рис.2), и это позволяет оценить мощность колебаний энергии импульсов, обусловленных вибрациями ПО. Колебания в области низких частот ($\sim 0-0,26$ Гц) при нормальной работе реактора вызваны работой системы АР [4, 5], компенсирующей влияние низкочастотной неустойчивости мощности. С появлением любой низкочастотной неустойчивости (автоколебаний или внешних возмущений) низкочастотные колебания мощности усиливаются, соответственно, растет и реакция системы АР. Из рис.2 наглядно видно, что в процессе работы реактора нейтронный шум усложняется и мощность колебаний переходит в область низких частот ($\sim 0-0,26$ Гц), связанную с работой системы АР.

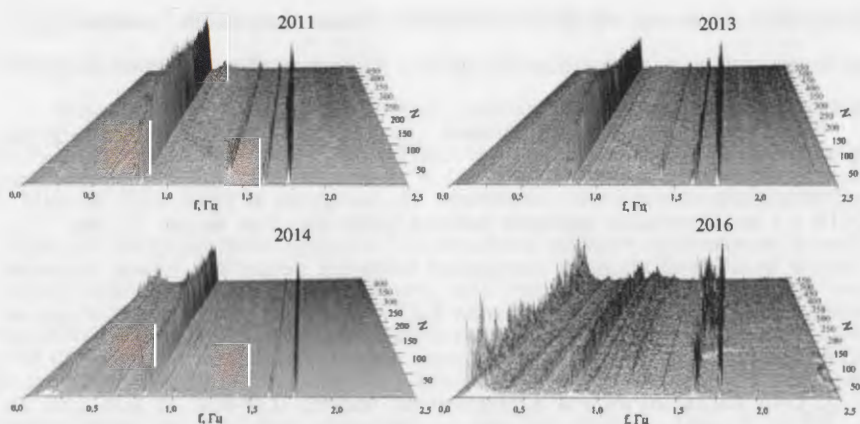


Рис.1. Характерное изменение спектральной плотности колебаний энергии импульсов ИБР-2М в отдельных циклах (по годам) при мощности 2 МВт

Изменение среднеквадратических колебаний энергии импульсов в процессе работы ИБР-2М приведено на рис.3. На рис. 4 показано изменение относительного среднеквадратического отклонения и размаха колебаний энергии импульсов за отдельный реакторный цикл.

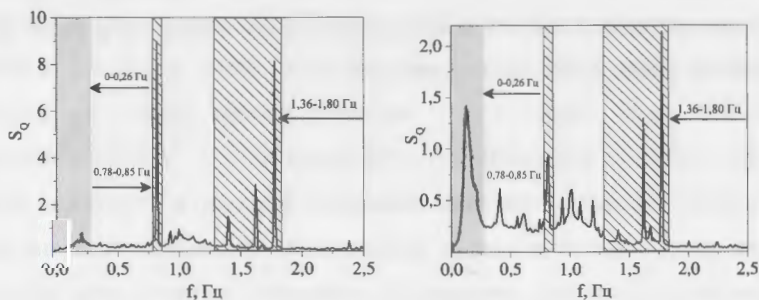


Рис. 2. Спектральная плотность колебаний энергии импульсов ИБР-2М (S_Q) при мощности 2 МВт в разные периоды работы реактора: 2014 г. (слева), 2016 г. (справа). Заштрихованная область связана с вибрациями подвижных отражателей; область, обозначенная серым цветом в диапазоне 0-0,26 Гц, – с работой системы АР

Исследования показали, что полные среднеквадратические колебания энергии импульсов ИБР-2М при достижении энерговыработки 600 МВт·сут уменьшаются с ~5 до 3,7 % за счет уменьшения колебаний, связанных с вибрациями ПО. В то же время низкочастотные колебания (~0-0,26 Гц) постепенно растут. Их рост при достижении энерговыработки 800 МВт·сут сказался на увеличении полных колебаний мощности (заштрихованная область на рис.3).

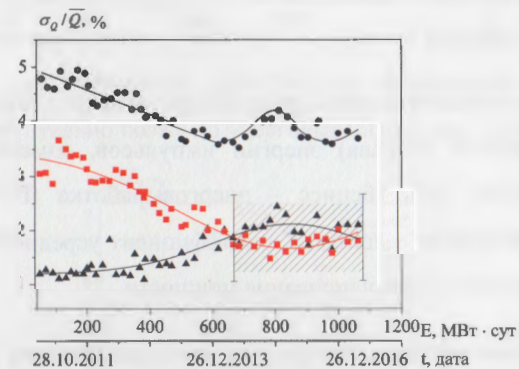


Рис.3. Изменение относительного среднеквадратического отклонения колебаний энергии импульсов в процессе работы реактора ИБР-2М: ● – полные колебания; ▲ – низкочастотные колебания (~0 – 0,26 Гц), ■ – шумы со стороны ПО (0,78 – 0,85) + (1,36 – 1,80) Гц

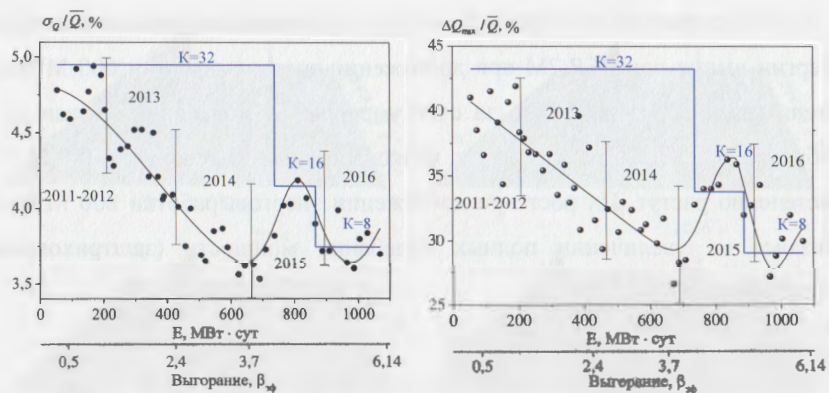


Рис.4. Изменение относительного среднеквадратического отклонения (слева) и размаха колебаний (справа) энергии импульсов, измеренных в конце реакторных циклов. Ось абсцисс – энерговыработка (E) и среднее по активной зоне выгорание топлива; K– коэффициент усреднения импульсов в системе автоматического регулирования мощности

Исследования показали, что рост шумов с выгоранием топлива можно уменьшить путем оптимизации параметров системы АР. В результате оптимизации параметров системы АР полные колебания (размах) мощности ИБР-2М уменьшились с 36 до 27 % (см. рис.4). Нужно отметить, что за весь период работы реактора относительные стандартные отклонения колебаний мощности не превышали 5 %, из которых ~1,6 % связаны с работой системы АР и ~2,5 % обусловлены осевыми вибрациями лопастей ПО. Таким образом, как следует из работы [6], где подробно представлено изменение статистических характеристик флуктуаций энергии импульсов в течение реакторного цикла в начале кампании, вклад шумов энергии импульсов, вызванных вибрациями лопастей ПО, в полную дисперсию колебаний мощности уменьшился с ~50 до 20 %.

Для понимания того, как шумовое состояние ИБР-2М соотносится с соответствующим шумовым состоянием реактора ИБР-2 (ранее

измеренным), были проведены их сравнения друг с другом в зависимости от энерговыработки. При этом использовались данные по относительным среднеквадратическим отклонениям энергии импульсов ИБР-2 при 2 МВт в период с 1983 по 1989 г. На рис. 5 показано сравнение среднеквадратических отклонений колебаний мощности ИБР-2 и ИБР-2М. Видно, что шумы мощности ИБР-2М существенно меньше, чем у своего предшественника ИБР-2, особенно после оптимизации параметров системы АР. Поскольку шумы мощности определяются не только возмущениями реактивности, но и динамическими свойствами реактора, следует ожидать, что область колебательной неустойчивости ИБР-2М как импульсной системы будет наблюдаться значительно позже по энерговыработке, чем у ИБР-2.

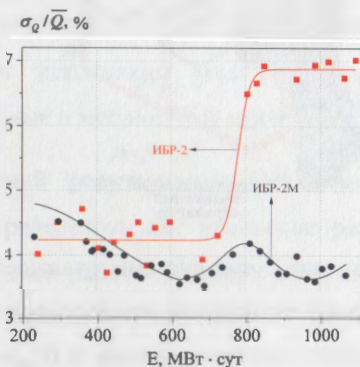


Рис.5. Относительные среднеквадратические отклонения мощности в период работы ИБР-2 с 1983 по 1989 г. (■) и ИБР-2М с 2012 по 2016 г. (●)

Поскольку на шумы мощности существенно влияют низкочастотные случайные возмущения реактивности, были проведены исследования по влиянию колебаний термодинамических параметров первого контура натриевой системы охлаждения активной зоны (АЗ) реактора ИБР-2М на колебания мощности. Шумы реактивности со стороны системы охлаждения АЗ, как показал опыт эксплуатации ИБР-2, являются при нормальной работе реактора основным источником низкочастотной неустойчивости реактора. Поэтому для ИБР-2М влияние шумов натриевой системы охлаждения АЗ на

колебания мощности исследовались достаточно подробно, особенно при работе реактора при номинальной мощности 2 МВт и расходе натрия через АЗ 100 м³/ч. Получены данные о статистике колебаний параметров контура, их взаимосвязи, и даны оценки по влиянию шумов первого контура системы охлаждения АЗ на шумы реактивности и мощности, а также на работу системы АР. На рис.6 показана принципиальная схема охлаждения АЗ реактора, а также расположение измерительных датчиков.

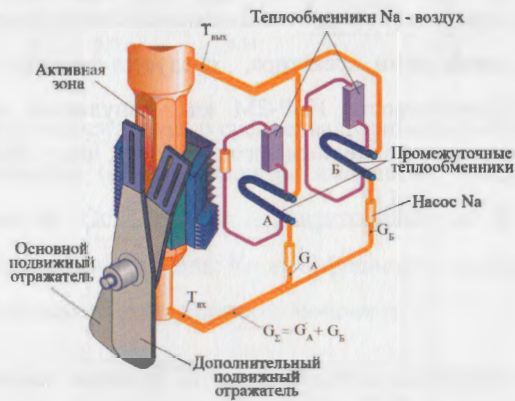


Рис.6. Принципиальная схема системы охлаждения реактора ИБР-2М. Показано расположение измерительных датчиков расхода натрия через АЗ (G_{Σ}), расхода натрия первого контура в петлях А (G_A) и Б (G_B), температуры натрия на выходе ($T_{\text{вых}}$) и входе ($T_{\text{вх}}$) в АЗ

Спектральные плотности колебаний расхода (S_G) и температуры ($S_{T_{\text{вх}}}$) натрия на входе в АЗ, а также подогрева натрия ($S_{\Delta T^{\circ}}$) в АЗ показаны на рис.7. Из рисунка видно, что в спектрах колебаний расхода и температуры натрия имеются от двух до трех больших пика на частотах менее 0,26 Гц. Остальные колебания малы, и ими при анализе можно пренебречь. Основной пик колебаний для указанных выше параметров первого контура находится на частоте суточных колебаний, т.е. с периодом 24 ч.

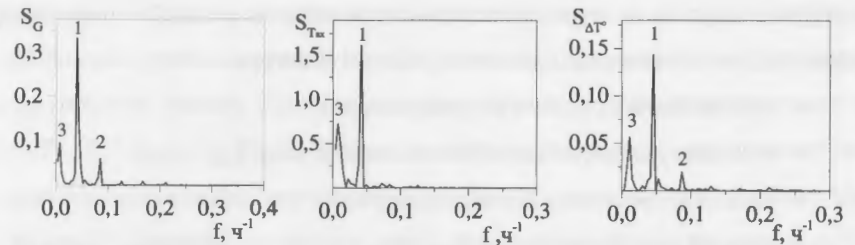


Рис.7. Спектральные плотности колебаний расхода натрия через АЗ (S_G), его температуры на входе в АЗ ($S_{T_{\text{вх}}}$) и подогрева в АЗ ($S_{\Delta T^{\circ}}$)

Исследовались колебания реактивности, включая все ее медленные компоненты, действующие со стороны первого контура системы охлаждения АЗ. Шум реактивности и колебания энергии импульсов со стороны первого контура зависят от источников различного типа, в основном это температурные, расходные и мощностные изменения.

Колебания полной реактивности. Медленное изменение полной реактивности $\rho_{\Sigma}(t)$ определялось как изменение реактивности, вызванное перемещением в процессе работы реактора всех блоков регулирования в системе управления и защиты относительно их некоторого первоначального (базового) положения z_{0i} :

$$\rho_{\Sigma}(t) = \sum_{i=1}^4 [k_i(z_i) - k_i(z_{0i})],$$

где $k_i(z_i)$ —кривая эффективности i -го блока регулирования [7], $z_i = f(t)$ — положение i -го блока регулирования относительно АЗ в момент времени t ($i=1,4$). Полная реактивность $\rho_{\Sigma}(t)$ компенсирует действие различных каналов обратной связи — температурной, расходной, мощностной, выгорания и т.д.:

$$\rho_{\Sigma}(t) = - [\rho_w(t) + \rho_T(t) + \rho_G(t) + \rho_E(t) + \rho_X(t)],$$

где $\rho_w(t)$ — мощностной эффект реактивности, $\rho_T(t)$, $\rho_G(t)$ — реактивность по температуре и расходу натрия; $\rho_E(t)$ — эффект выгорания топлива; $\rho_X(t)$ —

случайные эффекты от шумов реактивности различного рода. Для получения оценки $\rho_w(t)$ измерялись следующие параметры реактора:

- положение всех блоков регулирования z_i ,
- температура натрия на входе в активную зону $T_{вх}$,
- расход натрия через активную зону G ,
- энергия импульсов (мощность W).

Изменение реактивности $\rho_T(t)$ при отклонении температуры натрия на входе в АЗ от T_0 до $T_{вх}(t)$ в момент времени t определяется как

$$\rho_T(t) = dK/dT \cdot [T_{вх}(t) - T_0],$$

где $dK/dT = \left. \frac{dK}{dT} \right|_{G,W = \text{const}}$ – изотермический коэффициент реактивности, $T_{вх}(t)$, T_0 – текущее и среднее значение температуры натрия на входе в АЗ соответственно. Изотермический коэффициент реактивности есть изменение коэффициента размножения при медленном (квазистатическом) изменении температуры натрия на входе в АЗ на 1°C при постоянных значениях мощности и расхода натрия. В среднем изотермический коэффициент не зависит от мощности реактора и расхода натрия через АЗ и равен $-(1,19 \pm 0,10) \cdot 10^{-2} \beta_{эф}/^\circ\text{C}$ [7, 8].

Изменение реактивности $\rho_G(t)$ при изменении расхода натрия от G_0 до $G(t)$ в момент времени t определяется в виде

$$\rho_G(t) = dK/dG \cdot [G(t) - G_0],$$

где $dK/dG = \left. \frac{dK}{dG} \right|_{W,T = \text{const}}$ – расходный коэффициент реактивности, т.е. изменение коэффициента размножения, отнесенное к изменению расхода натрия на входе в АЗ; $G(t)$, G_0 – текущее и среднее значение расхода натрия через АЗ соответственно. В общем случае расходный коэффициент реактивности сложным образом зависит от температуры натрия и мощности

реактора. При медленном изменении мощности и расхода натрия в небольших пределах (до $\sim 10\%$) значение расходного коэффициента реактивности можно принять равным асимптотически установившемуся $-0,7 \cdot 10^{-2} \beta_{эф}/\text{м}^3/\text{ч}$ [7, 8]. Эффект выгорания топлива ρ_E определяется как разность критических состояний реактора на мгновенных нейтронах при “нулевой” мощности от цикла к циклу. В среднем скорость выгорания $\rho_E/E = -0,5 \cdot 10^{-2} \beta_{эф}/\text{МВт} \cdot \text{сут}$ [7], где E есть энерговыработка.

Колебания мощностной обратной связи $\rho_w(t)$ определяются относительно состояния равновесной импульсной критичности сразу после вывода реактора на номинальную мощность 2 МВт (базовое состояние).

Соответствующие временные ряды колебаний реактивности $\rho_\Sigma(t)$, $\rho_w(t)$, $\rho_T(t)$ и $\rho_G(t)$ представляют собой основу для получения спектральной плотности колебаний указанных выше параметров. Как показали исследования, в спектрах колебаний полной реактивности и реактивности мощностной обратной связи имеются три пика с основным пиком на частоте суточных колебаний (24 ч) (см. рис.8).

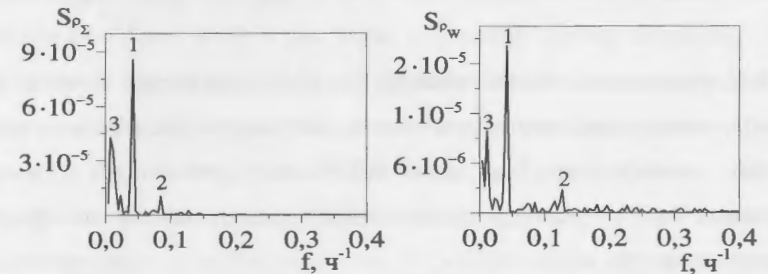


Рис. 8. Спектральная плотность медленных колебаний полной реактивности (слева) и реактивности мощностной обратной связи (справа) при работе реактора при мощности 2 МВт и расходе натрия через АЗ $100 \text{ м}^3/\text{ч}$

Спектральные плотности колебаний реактивности по расходу и температуре натрия повторяют спектральные плотности колебаний самого

расхода и температуры (см. рис.7). На 96 % температурные и расходные колебания реактивности состоят из 2-3 частот. Показано, что температурные колебания реактивности в 3-5 раз выше расходных, т.е. в системе стабилизации мощности температурные возмущения доминируют. В целом это обстоятельство, т.е. наличие только одной доминантной компоненты в полных шумах реактивности, упрощает работу системы стабилизации мощности.

На рис. 9 для иллюстрации вышесказанного приведены спектральные плотности колебаний температуры и расхода натрия через АЗ, реактивности мощностной обратной связи, полной реактивности, взаимные спектральные плотности, а также функции когерентности.

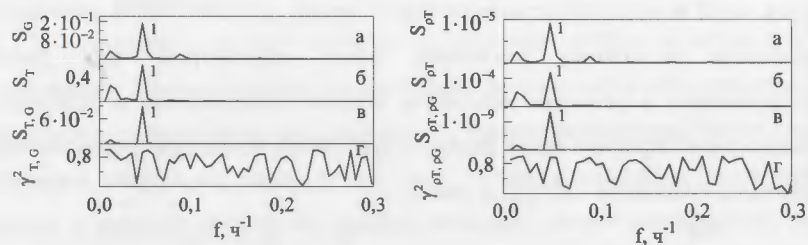


Рис.9. Корреляция колебаний температуры и расхода натрия на входе в АЗ (слева) и между колебаниями реактивности по температуре и расходу натрия (справа): спектральная плотность колебаний первого (а) и второго параметров (б); взаимная спектральная плотность (в) и функция когерентности (г)

Для всех колебаний реактивности, обусловленных работой первого контура системы охлаждения АЗ, характерна одна особенность: основное колебание представляет собой колебание гармонического вида с периодом, равным одним суткам. Из рис.9 видно, что взаимные колебания реактивности мощностной обратной связи и полной реактивности, а также

колебаний расхода и температуры натрия в первом контуре наблюдаются на одной частоте с периодом в одни сутки. Фазовый сдвиг на этой частоте Φ_{p_0, p_Σ} между полной реактивностью и реактивностью мощностной обратной связи практически отсутствует (-1°), а функция когерентности высокая (0,87). Можно сказать, что колебания полной реактивности практически без запаздывания следуют за колебаниями мощностной обратной связи. Корреляция между ними достаточно жесткая, но не полная, что указывает на присутствие в полной реактивности компонентов от других источников шумов, находящихся вне системы охлаждения АЗ.

Исследованы также колебания так называемого изобарического эффекта реактивности, вызванного возможным влиянием случайного изменения давления аргона в газовой полости над АЗ на колебания уровня натрия и связанных с этим колебаний реактивности. Показано, что указанные процессы (давление аргона – уровень натрия) жестко взаимосвязаны и при нормальной работе реактора колебания давления аргона вызваны изменением уровня натрия. В то же время колебания уровня натрия малы: полный размах колебаний равен 4,5 см, а амплитуда основного колебания с периодом 24 ч равна всего 4 мм. Такие изменения уровня натрия над АЗ не могут вызвать заметных колебаний реактивности и повлиять на энергию импульса. Расчетное изменение реактивности при уменьшении уровня, например, на 10 мм мало ($<10^{-5} \% K_{эф}$). Таким образом, шумами реактивности, вызванными колебаниями уровня натрия при изменении давления аргона в газовой полости над АЗ, в нормальном состоянии реактора можно пренебречь. Данные исследования подтверждают практически нулевое значение изобарического эффекта реактивности ИБР-2М, ранее оцененное по данным энергетического пуска ИБР-2.

Шумы тепловой мощности, оцененные по колебаниям разности температур натрия на выходе и входе в АЗ и по колебаниям расхода натрия малы. Спектр колебаний тепловой мощности близок к белому шуму с одной

выраженной частотой суточных колебаний с амплитудой ~ 2 кВт. Такие малые колебания мощности на этой частоте связаны с тем, что соответствующие суточные доминантные колебания расхода и подогрева натрия в АЗ находятся в противофазе. Полный шум тепловой мощности больше ± 10 кВт, поскольку вызван не только нестабильностью термодинамических параметров первого контура системы охлаждения АЗ, но и многими другими факторами.

В третьей главе приведен анализ реакторных шумов для целей диагностики и прогнозирования состояния ИБР-2М. Использовались различные методы анализа шумов энергии импульсов, например кластерный анализ, метод нейронных сетей и др.

С целью изучения структуры шумов энергии импульсов и ее изменения в процессе работы реактора использовались методы распознавания образов, частным случаем которых является кластерный анализ. Свойство реакторных шумов как-то группироваться в значимые структуры позволяет использовать его в диагностике реактора путем изучения отклонений кластерной структуры от устойчивой (типичной).

При исследовании кластерной структуры шумов энергии импульсов были применены как иерархические, так и неиерархические методы кластерного анализа. В качестве элемента (объекта) кластерной структуры использовалась спектральная плотность колебаний энергии импульсов, оцененная по временному ряду 8192 последовательных значений энергии импульсов (28 минут работы реактора). Каждый элемент был представлен в процессе кластерного анализа в виде точки в 256-мерном евклидовом пространстве. В основном использовался иерархический кластерный анализ [3] как наиболее гибкий из существующих методов кластерного анализа, который позволяет детально исследовать структуру различий между объектами и выбрать наиболее оптимальное число кластеров. Неиерархические алгоритмы использовались в дополнение к первым,

поскольку эвристические процедуры анализа данных, встроенные в эти алгоритмы, давали более значимое число кластеров. В работе при оценке качества кластерной структуры использовались несколько критериев, наиболее эффективные из которых были три: индекс Данна, значение *силуэта* и физический смысл результатов кластеризации [9-12]. Понятие “физический смысл” здесь рассматривается как возможность физической реализации той или иной кластерной структуры.

На рис.10 приведена последовательность смены кластеров во времени для колебаний энергии импульсов и для колебаний мощности, связанных с вибрациями лопастей ПО, в одном из типичных циклов работы реактора при мощности 2 МВт. Из рис.10 видно, что спектральная плотность колебаний энергии импульсов в отдельном цикле разделяется на четыре кластера и что изменение кластерной структуры полных шумов в основном следует за изменением шумов, связанных с вибрациями ПО.

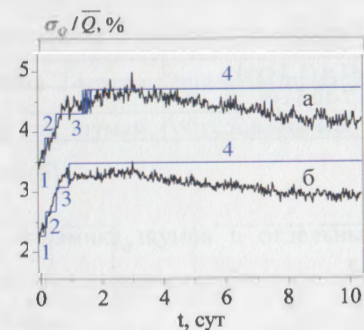


Рис.10. Изменение относительного среднеквадратического отклонения полных (а) и связанных с осевыми вибрациями лопастей подвижных отражателей (б) колебаний энергии импульсов. Линией показан переход шумового состояния реактора из одного кластера в другой. Цифрами отмечены номера кластеров

Первые три кластера включают в себя спектры переходной области, длящейся 1,7 сут после выхода реактора на мощность 2 МВт. Четвертый,

основной, кластер соответствует установившемуся шумовому состоянию реактора. Это состояние начинается через 1,7 сут от начала работы реактора и продолжается до конца реакторного цикла. Интенсивность шумов в 4-м шумовом состоянии реактора со временем меняется с тенденцией к уменьшению на ~12 % к концу цикла. При этом уменьшение уровня шумов слабо влияет на их спектральный состав. Таким образом, через 1,7 сут шумы мощности в целом стабилизируются. Характеристики кластеров представлены в табл.1. Структура кластеров приведена на рис.11.

Таблица 1. Характеристики кластеров шумового состояния ИБР-2М в процессе работы реактора

№ кластера	Анализ по полным колебаниям энергии импульсов	Анализ по колебаниям энергии импульсов, связанных с осевыми вибрациями лопастей подвижных отражателей
	Время жизни кластера после выхода на мощность 2 МВт	Время жизни кластера после выхода на мощность 2 МВт
1	0-5 ч	0-6 ч
2	5-14 ч	6-14 ч
3	14-41 ч (1,2 сут)	14-24 ч (1 сут)
4	1,7-10,5 сут	1-10,5 сут
Всего	10,5 сут	10,5 сут

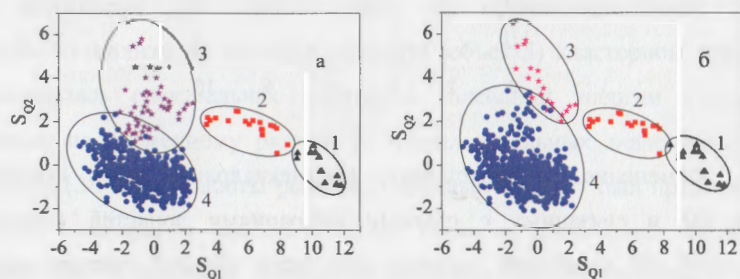


Рис.11. Структура кластеров, сжатая из 256-мерного в 2-мерное пространство по полным колебаниям энергии импульсов (а) и по колебаниям, обусловленным осевыми колебаниями лопастей подвижных отражателей (б)

На рис.12 показано изменение кластерной структуры в 2-мерном представлении пространства реакторных шумов в зависимости от времени работы реактора как для полных колебаний мощности, так и для колебаний, обусловленных вибрациями ПО.

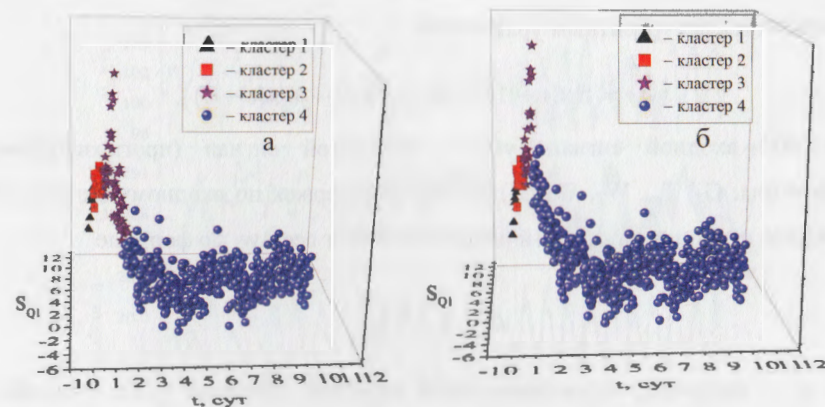


Рис.12. Изменение кластерной структуры колебаний энергии импульсов в зависимости от времени в 2-мерном представлении пространства шумов по полным шумам (а) и по шумам, обусловленным вибрациями лопастей подвижных отражателей (б)

Таким образом, динамика шумов в отдельных реакторных циклах практически полностью обусловлена изменением вибрационного состояния ПО.

При исследовании медленных процессов, связанных с колебаниями термодинамических параметров реактора, использовался алгоритм нейронной сети [13]. Эта интеллектуальная система способна распознавать и прогнозировать закономерности временных рядов. Использование нейросетевой модели с обратной связью позволило решить задачу прогнозирования на сильно зашумленных временных рядах, какими являются шумы энергии импульсов ИБР-2М [14].

Исследовались колебания температуры натрия на входе ($T_{вх}$) и выходе ($T_{вых}$) из АЗ, расхода натрия в петлях А (G_A) и Б (G_B) первого контура с суммарным расходом $G = G_A + G_B$ и тепловой мощности (W_T). Указанная выше выборка значений параметров представляла собой основу для прогнозирования. В общем случае нелинейная авторегрессионная сеть описывается рекуррентным уравнением

$$y(t) = f(x(t-1) + x(t-2) + \dots + x(t-d)),$$

где $x(t)$ – входной сигнал; $y(t)$ – выходной сигнал (прогнозируемые параметры: G_{Σ} , $T_{вх}$, W_T , W_T/G_{Σ}); d – число задержек по входному сигналу. В процессе обучения каждый i -й нейрон изменяет вес Δw_i по формуле

$$\Delta w_i = -\eta \frac{\partial e}{\partial w_i},$$

где η – параметр, характеризующий скорость обучения [15]; e – ошибка обучения. В качестве алгоритма обучения применен метод нелинейной оптимизации: алгоритм Левенберга – Марквардта (Levenberg–Marquardt) [16, 17]. Вектор i -го нейрона обновляется по формуле

$$w_i(\text{new}) = w_i(\text{old}) + \Delta w_i,$$

где $w_i(\text{new})$, $w_i(\text{old})$ – измененный и предшествующий ему вес i -го нейрона. После обучения, когда все веса зафиксированы, в структуру нейронной сети вводилась обратная связь. Для уменьшения влияния шумовой компоненты на результат прогноза перед входом нейронной сети был добавлен медианный фильтр [18, 19]. Чтобы предсказать более тонкие детали изменения параметров, использовали следующий алгоритм обучения и предсказания. На основе выборки за весь предыдущий реакторный цикл, т.е. приблизительно за десять суток работы реактора, проводилось обучение нейронной сети. Затем в новом цикле на основе обучения сети за предыдущий цикл для всех указанных выше параметров выполнялась процедура прогнозирования на интервале времени одни сутки. Далее текущие данные последовательно

накапливались в общем массиве, по которому шло обучение. Таким образом, выполнялась скользящая операция суточного прогноза. В качестве иллюстрации процедуры прогноза основных параметров первого контура системы охлаждения АЗ на рис.13 приведены данные по измеренным и прогнозируемым во времени параметрам.

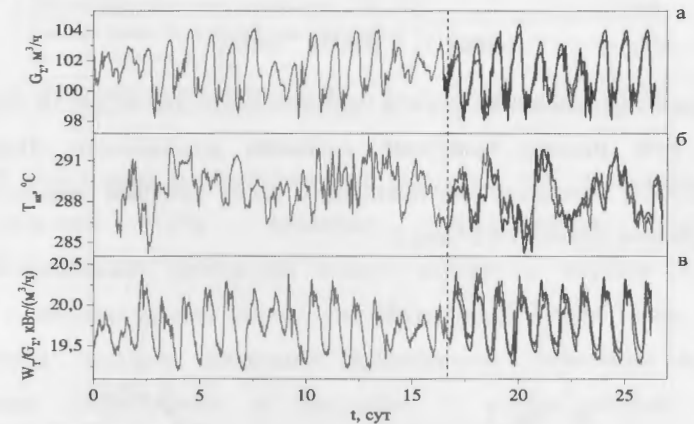


Рис.13. Результат прогноза по изменению расхода натрия через АЗ (G_{Σ}) (а), температуры натрия на входе в АЗ ($T_{вх}$) (б) и величины, пропорциональной подогреву (W_T/G_{Σ}) (в). Пунктирной линией разделены обучающая выборка и результат прогноза, — эксперимент, — прогноз

Суммарное воздействие изменения расхода и температуры натрия на входе в АЗ на реактивность в первом приближении определяется их суммой:

$$\rho_{GT}(t) = \rho_G(t) + \rho_{T_{вх}}(t).$$

Аналогично вычисляется суммарная реактивность прогнозируемых процессов $\rho_G^*(t)$ и $\rho_{T_{вх}}^*(t)$:

$$\rho_{GT}^*(t) = \rho_G^*(t) + \rho_{T_{вх}}^*(t).$$

Прогнозируемая реактивность $\rho_{GT}^*(t)$ есть уже заранее известный процесс, который в принципе может быть исключен из общего изменения реактивности. Способ исключения может быть разным, например введение реактивности $\rho_{GT}^*(t)$ с обратным знаком с помощью дополнительного блока регулирования. Тогда колебания остаточной реактивности

$$\Delta\rho_{GT}(t) = \rho_{GT}(t) - \rho_{GT}^*(t),$$

фактически определяемые ошибкой прогноза, как видно из рис.14, более чем в три раза меньше колебаний исходной реактивности. Параметры распределения колебаний реактивности, а также тепловой мощности до и после прогноза приведены в табл.2.

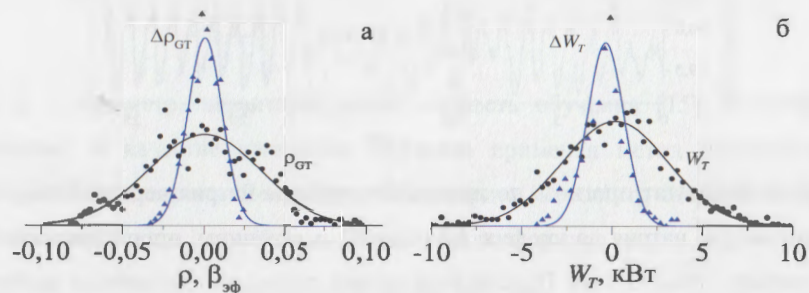


Рис.14. Плотность распределения колебаний реактивности, действующей со стороны системы охлаждения АЗ, до (ρ_{GT}) и после ($\Delta\rho_{GT}$) прогноза (а); распределение колебаний тепловой мощности до (W_T) и после (ΔW_T) прогноза (б)

Таблица 2. Параметры распределения колебаний тепловой мощности и полной реактивности до (W_T, ρ_Σ) и после ($\Delta W_T, \Delta\rho_\Sigma$) прогноза при стандартном отклонении (σ) и размахе колебаний (ΔX)

Параметр	σ	ΔX
Тепловая мощность W_T , кВт	3,20	25,94
Остаточная тепловая мощность ΔW_T , кВт	1,26	7,66
Полная реактивность по температуре и расходу натрия $\rho_\Sigma, \beta_{эф}$	0,033	0,175
Остаточная реактивность $\Delta\rho_\Sigma, \beta_{эф}$	0,011	0,061

В результате прогнозирования показано, что нейронная сеть с погрешностью $\sim 5\%$ позволяет предсказывать изменение термодинамических параметров первого контура в текущем реакторном цикле с использованием данных за предыдущий цикл. Таким образом, результаты прогноза позволяют существенно уменьшить медленные колебания реактивности и связанную с ними реакцию системы автоматической стабилизации мощности.

В **заклучении** сформулированы основные результаты диссертационной работы, выносимые на защиту.

Публикации автора по теме диссертации

1. Pepelyshev Yu.N., Tsogtsaikhan Ts. Investigation of the Pulse Energy Noise Dynamics at IBR-2M Using Cluster Analysis //Annals of Nuclear Energy. 2015. V. 83. P. 50–56.
2. Ososkov G.A., Pepelyshev Yu. N., Tsogtsaikhan Ts. Prediction of Liquid Sodium Flow Rate through the Core of the IBR-2M Reactor Using Nonlinear Autoregressive Neural Networks //European Physical Journals. 2016. V.108. 02036.
3. Пепельшев Ю.Н., Цогтсайхан Ц., Ососков Г.А. Использование методов кластерного анализа и авторегрессионных нейронных сетей для диагностики шумов реактора ИБР-2М //Письма в ЭЧАЯ. 2016. Т. 13, вып. 5. С. 1089-1094.
4. Пепельшев Ю.Н., Цогтсайхан Ц. Прогнозирование колебаний термодинамических параметров системы охлаждения реактора ИБР-2М с помощью нейронных сетей //Атомная энергия. 2016. Т. 121, вып. 3. С. 136-139.
5. Пепельшев Ю.Н., Рогов А.Д., Цогтсайхан Ц. Статистический анализ флуктуаций энергии импульсов реактора ИБР-2М. Препринт ОИЯИ P13-2012-131. Дубна, 2012.
6. Пепельшев Ю.Н., Цогтсайхан Ц. Влияние шумов натриевой системы охлаждения активной зоны ИБР-2М на колебания реактивности. Препринт ОИЯИ P13-2014-61. Дубна, 2014.
7. Пепельшев Ю.Н., Цогтсайхан Ц. Исследование динамики шумов энергии импульсов реактора ИБР-2М в процессе выгорания топлива. Препринт ОИЯИ P13-2017-4. Дубна, 2017.

Список литературы

1. Пепельшев Ю.Н. Исследование колебаний подвижных отражателей (энергетический пуск реактора ИБР-2). Сообщение ОИЯИ 13-87-564. Дубна, 1987.
2. Ананьев В.Д. и др. Физический пуск модернизированного реактора ИБР-2 (ИБР-2М). Сообщение ОИЯИ P13-2012-41. Дубна, 2012.
3. Pepelyshev Yu.N., Tsogtsaikhan Ts. Investigation of the Pulse Energy Noise Dynamics at IBR-2M Using Cluster Analysis //Annals of Nuclear Energy. 2015. V. 83. P. 50–56.
4. Бондарченко Е.А., Пепельшев Ю.Н., Попов А.К. Экспериментальное и модельное исследование особенностей динамики импульсного реактора периодического действия ИБР-2 //ЭЧАЯ. 2004. Т. 35, вып. 4.
5. Пепельшев Ю.Н., Цогтсайхан Ц. Влияние шумов натриевой системы охлаждения активной зоны ИБР-2М на колебания реактивности. Препринт ОИЯИ P13-2014-61. Дубна, 2014.
6. Пепельшев Ю.Н., Рогов А.Д., Цогтсайхан Ц. Статистический анализ флуктуаций энергии импульсов реактора ИБР-2М. Препринт ОИЯИ P13-2012-131. Дубна, 2012.
7. Ананьев В.Д. и др. Энергетический пуск модернизированного реактора ИБР-2 (ИБР-2М). Препринт ОИЯИ P13-2012-42. Дубна, 2012.
8. Ананьев В.Д. и др. Физический пуск импульсного исследовательского реактора ИБР-2. Сообщение ОИЯИ P13-12-41. Дубна, 2012.
9. Goujun Gan, Chaogun Ma, Jianhong Wu. Data Clustering: Theory, Algorithms, and Applications. 2007. V.2. P. 109-137; V.4. P. 354-362.
10. Болдак А.А., Сухарев Д.Л. Определение количества кластеров в статистических данных //Вісник НТУУ «КПІ»: Інформатика, управління та обчислювальна техніка. 2011. Вып. 53. С. 119-122.
11. Dunn J. Well Separated Clusters and Optimal Fuzzy Partitions // Journal of Cybernetics. 1974. No. 4. P. 95-104.
12. Ljung L. System Identification: Theory for the User. 2nd ed. Prentice Hall PTR; 1998.
13. Lee Giles C., Lawrence S., Ah Chung Tsoi. Noisy Time Series Prediction Using Recurrent Neural Networks and Grammatical Inference //Machine Learning. 2001. V. 44. P. 161-183.
14. Haykin S. Neural Networks: a Comprehensive Foundation. 2nd ed. Prentice Hall; 1998.
15. Levenberg K. A Method for the Solution of Certain Problems in Least Squares //Quart. Appl. Math. 1944. V. 2. P. 164-168.

16. Marquardt D. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters //SIAM J. Appl. Math. 1963. V. 11. P. 431-441.
17. Arce G.R. Nonlinear Signal Processing: A Statistical Approach. New Jersey, USA: Wiley, 2005.
18. Huang T., Yang G., Tang G. A Fast Two-Dimensional Median Filtering Algorithm //IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing. 1979. V. 27, No. 1. P. 13-18.