

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

Цолмон Цогтсайхан

Исследование случайных возмущений реактивности реактора ИБР-2М

Специальность 01.04.01-

«Приборы и методы экспериментальной физики»

Диссертация на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук

Пепельшев Юрий Николаевич

Дубна – 2018

Оглавление

| | Стр. |
|---|-----------|
| Введение | 4 |
| ГЛАВА 1. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ РЕАКТОРА ИБР-2М..... | 12 |
| 1.1. Место ИБР-2М среди исследовательских реакторов | 12 |
| 1.2. Подвижный отражатель ИБР-2М | 20 |
| 1.3. Формирование импульса в ИБР-2М..... | 21 |
| 1.4. Системы управления и защиты (СУЗ) ИБР-2М..... | 22 |
| 1.5. Ядерная безопасность реактора..... | 26 |
| ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ В РЕАКТОРЕ ИБР-2М..... | 27 |
| 2.1. Случайные процессы в реакторе ИБР-2М..... | 27 |
| 2.2. Быстрые и медленные колебания реакторных параметров | 27 |
| 2.3. Методы анализа случайных процессов и основные результаты обработки | 32 |
| 2.3.1. Общий статистический анализ | 34 |
| 2.3.2. Кластерный анализ..... | 39 |
| 2.3.3. Искусственные нейронные сети | 43 |
| 2.4. Исследование колебаний шумов энергии импульсов | 45 |
| 2.5. Исследование динамики шумов энергий импульсов реактора ИБР-2М в процессе выгорания топлива..... | 51 |
| 2.5.1. Режим стационарной мощности | 55 |
| 2.5.2. Шумовое состояние реактора при подъеме и снижении мощности. | 62 |
| 2.6. Исследование влияния шумов натриевой системы охлаждения активной зоны реактора на колебания реактивности..... | 65 |
| 2.6.1. Колебания расхода и температуры натрия. Колебания тепловой мощности | 70 |
| 2.6.2. Температурная и расходная компоненты колебаний реактивности | 75 |
| 2.6.3. Полные колебания реактивности и колебания мощностной обратной связи..... | 77 |

| | |
|--|------------|
| 2.6.4. Взаимная корреляция между колебаниями параметров первого контура системы охлаждения активной зоны и колебаниями реактивности..... | 80 |
| 2.7. Выводы..... | 83 |
| ГЛАВА 3. АНАЛИЗ ШУМОВ РЕАКТОРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ИБР-2М ... | 86 |
| 3.1. Введение в шумовую диагностику ИБР-2М..... | 86 |
| 3.2. Диагностика состояния реактора по шумам мощности | 86 |
| 3.3. Диагностика состояния реактора по шумам термодинамических параметров системы охлаждения активной зоны | 93 |
| 3.4. Выводы | 98 |
| ГЛАВА 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 100 |
| Список литературы | 102 |

Введение

Импульсный реактор на быстрых нейтронах периодического действия является импульсным источником нейтронов, предназначены для проведения физических исследований с помощью нейтронов. Он работает в режиме периодических очень коротких пульсаций мощности при достаточно высоком среднем ее значении. Импульсы мощности импульсный реактор на быстрых нейтронах периодического действия развиваются за счет внешней модуляции реактивности, например при периодическом движении какого-либо элемента реактора влияющего на реактивность. Периодические на короткое время достигается состояние надкритичности на мгновенных нейтронах, в течение которого мощность быстро растет, а затем, после снижения реактивности, спадает. В остальное время реактор является глубоко подкритическим, и мощность его очень мало.

Первый в мире импульсный реактор на быстрых нейтронах с периодической модуляцией реактивности ИБР был создан в 1959 г. в Объединенном институте ядерных исследований и пущен в эксплуатацию в 1960 году. Это был первый в мире реактор нового типа, в котором импульсы создавались периодическим вращением части активной зоны [1-3].

Импульсный реактор ИБР-2М, пущенный в эксплуатацию в 2012 г., есть модернизированная версия реактора ИБР-2, остановленного в 2006 г. в связи с выработкой ресурса. Сложность реактора ИБР-2М потребовала принципиально нового подхода к исследованию его характеристик. 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 $\beta_{и}$, величина которой существенно меньше эффективной доли $\beta_{эф}$. Поэтому при переходе реактора из режима непрерывной мощности в импульсный флуктуации мощности, а именно, энергии импульсов автоматически возрастают в $\beta_{эф}/\beta_{и}$ раз, т. е. для реакторов

на P_u 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, например, как система охлаждения 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.

С точки зрения безопасности реактора все шумы реактивности можно разделить на две большие группы. Первая – шумы с частотой выше общей пороговой частоты мощностной обратной связи и системы стабилизации мощности ($\sim 0,03$ Гц), вторая группа – низкочастотные шумы с частотой ниже указанной. В первом случае шумы реактивности вызывают флуктуации энергии импульсов, во втором – приводят к колебаниям и смещению стержня автоматического регулятора (АР), который при больших колебаниях реактивности может выйти за пределы зоны стабилизации. Полные шумы мощности реактора достигают ± 20 % в режиме стабилизации. Ситуация усугубляется тем, что при работе реактора деградационные процессы, происходящие в активной зоне и в ее ближайшем окружении, приводят к изменению уровня и структуры шумов. 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.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментальные исследование различных случайных возмущений реактивности модернизированного реактора ИБР-2М.

Цели диссертационной 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 динамики их изменения 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 АЗ ИБР-2М.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментального исследования динамика изменения колебаний энергий импульсов в процессе работы реактора.
2. Результаты экспериментального исследования влияние шумов натриевой системы охлаждения активной зоны ИБР-2М на колебания реактивности и мощности.
3. Результаты применения различных методов анализа данных в исследовании и шумовой диагностике состояния реактора 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, начиная 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.
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 по величине 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 неустойчивости 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 безопасной и надежной работы реактора. Показана возможность с помощью прогнозирования колебаний некоторых параметров натриевой системы охлаждения активной зоны уменьшить колебания реактивности и, соответственно, тепловой мощности.

Личный вклад автора в проведении исследований и получении представленных в работе результатов является определяющим. Все представленные в работе результаты получены либо самим автором, либо при его непосредственном участии.

Апробация работы и публикаций

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 [4-10].

Объем и структура работы

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

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

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

Во **Второй главе** описана методика измерения шумов основных реакторных параметров для исследования реактора. Рассмотрены методы анализа случайных процессов и результаты обработки. Представлены данные о динамике изменения шумового состояния реактора в зависимости от выгорания топлива за значительный период работы реактора, начиная с момента ввода ИБР-2М в эксплуатацию в 2011 и до конца 2016 г. Определены диапазоны частот, уровень колебаний и указаны возможные причины появления колебаний в шумах энергии импульсов. Исследованы характеристики шумов энергий импульсов при штатном снижении и подъеме в отдельных циклах по годам 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), работой автоматического регулятора (АР) и низкочастотные колебания температуры и расхода натриевого теплоносителя при его протекании через активную зону.

Представлены результаты исследования по влиянию колебаний термодинамических параметров первого контура натриевой системы охлаждения активной зоны реактора ИБР-2М при номинальной мощности 2

МВт и расходе натрия через активную зону $100 \text{ м}^3/\text{ч}$. Получены данные о статистике колебаний параметров контура, их взаимосвязи и даны оценки влияния шумов первого контура системы охлаждения АЗ на шумы реактивности и мощности, а также на работу системы АР.

В **Третьей главе** приведен анализ реакторных шумов для диагностики и прогнозирования состояния ИБР-2М. Использовались различные методики анализа.

При исследовании кластерной структуры шумов были применены различные методы кластерного анализа, как иерархические, так и неиерархические. Иерархический кластерный анализ, как наиболее гибкий из существующих методов кластерного анализа, 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 три критерия. Показано, что изменение спектральной плотности колебаний энергии импульсов после выхода реактора на номинальную мощность 2 МВт имеет переходную область длительностью ~ 3 суток. В процессе работы реактора структура шумов последовательно разделяется на четыре устойчивых кластера, три из которых отражают особенности переходной области шумов. Четвёртая устойчивая структура шумов не зависит от уровня шумов и времени работы реактора.

При исследовании медленных процессов, связанных с колебаниями термодинамических параметров реактора, использовался алгоритм нейронной сети. Показана возможность с помощью прогноза на основе нейронных сетей в три раза уменьшить медленные колебания реактивности и соответственно тепловой мощности.

В **Заключении** диссертации сформулированы основные результаты выполненных работ.

ГЛАВА 1. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ РЕАКТОРА ИБР-2М

1.1. Место ИБР-2М среди исследовательских реакторов

Ядерные реакторы существенно различаются между собой в зависимости от назначения и других признаков. По своему назначению ядерные реакторы подразделяются на нескольких групп; 1) энергетические, в которых энергия, выделяющаяся при делении ядер горючего, используется для выработки электроэнергии, а также для др. промышленных и бытовых нужд; 2) исследовательские реакторы, в которых возникающее излучение используется для научных и прикладных исследований в области ядерной физики, физики твёрдого тела, биофизики, химии и др.; 3) промышленные, или изотопные, реакторы, используемые для наработки (накопления) искусственные изотопов [11-16]. Первые исследовательские реакторы, построенные в сороковых годах (Энрико Ферми, 1942, Чикаго, и Ф-1, 1946, Москва), были установками малой мощности и преимущественно использовались для изучения физики реакторов и реакторной технологии [17-21].

В 50-х и 60-х годах во всем мире строились исследовательские реакторы малой мощности, использующие урановое топливо, обогащенное изотопом ^{235}U по весу в пределах 20%, т.е. использующие низкообогащенный уран. Однако широкое использование исследовательских реакторов для фундаментальных исследований, испытания материалов и производства радиоактивных изотопов обусловило высокий спрос на реакторы большей удельной мощности и на более высокие концентрации ^{235}U , что привело к замене ранее использовавшегося низкообогащенного уранового топлива ураном высокого обогащения, причем степень обогащения достигла 70 и даже 90%. Высокообогащенное топливо обладает следующими преимуществами: оно более экономично, может использоваться в активной зоне реактора более продолжительное время, отличается более высокой удельной реактивностью. Это топливо стало легко доступным и

использовалось не только для реакторов большой мощности, но и для реакторов малой мощности, для которых вполне пригодным было низкообогащенное топливо [22].

В настоящее время в 55 странах действует около 250 исследовательских реакторов мощностью от менее 1 Вт до 100 МВт и выше. Эти реакторы используются во всех областях науки и техники. Сегодня они используются, главным образом, в таких областях, как фундаментальные исследования, производство радиоактивных изотопов, нейтронно-активационный анализ и испытание материалов [23-25].

Большинство исследовательских реакторов работают в режиме стационарного во времени потока нейтронов (самоподдерживающаяся реакция идет непрерывно, если реактор находится в рабочем состоянии). Но существуют и импульсные реакторы, которые работают в режиме коротких мощных вспышек цепной реакции деления, разделенных интервалами времени, в течение которых реактивность отрицательна.

Импульсные реакторы самогасящего действия сначала использовались только в военных целях – для имитации процессов в начальной стадии ядерного взрыва, для радиационных испытаний в условиях, имитирующих ядерный взрыв и изучения биологического действия радиации. Впоследствии область их использования сместилась в сторону научных и научно-технических работ, например, исследования лазеров с ядерной накачкой, испытания твэлов ядерных реакторов в аварийных режимах, фундаментальная физика (генерация ультрахолодных нейтронов с высокой плотностью, измерение сечения рассеяния (n, n) – нейтрона на нейтроне) и др. Предельным случаем импульсного реактора самогасящего действия является *ядерный взрыв*. Одно время ядерные взрывы (подземные) проводились для физических экспериментов и накопления трансурановых изотопов, но чаще – для крупномасштабных горно-земляных работ.

Количество действующих и уже выведенных из работы импульсных реакторов самогасящего действия достаточно велико – больше 100, а вот импульсный реактор другого типа – периодического действия – в настоящее время действует только один. Это исследовательский импульсный реактор на быстрых нейтронах ИБР-2М в Дубне, в Объединенном институте ядерных исследований, Московская область. Такие реакторы по нейтронным процессам близки к самогасящимся реакторам, а по тепловым - к реакторам со стационарным потоком. Импульсы нейтронов генерируются в них периодически с частотой от 0,02 секунды до нескольких секунд, (иногда эти реакторы называют пульсирующими), так что поле температур в реакторе практически не зависит от времени. Система охлаждения может быть обычной. Длительность импульса у периодических реакторов такая же короткая (от 40 мкс до нескольких мс), но за счет частого повторения импульсов среднее по времени значение мощности достигает нескольких мегаватт, уступая лишь один порядок величины стационарным реакторам со средним потоком нейтронов 10^{14} , в то время как пиковая мощность равна мощности реакторов атомных электростанций – 1-2 ГВт. Цепная реакция и инициируется и гасится одним элементом, периодически вызывающем кратковременное превышение над единицей коэффициента размножения на мгновенных нейтронах. Таким элементом может быть часть активной зоны или отражателя. На стадии концептуальных проектов были даже импульсные реакторы периодического действия, управляемые магнитным полем, реакторы с самоподдерживающимся режимом пульсаций, использующие эффект запаздывания теплового расширения вследствие конечной скорости деформации металла (скорость звука – предел скорости деформации).

Реактор ИБР успешно проработал до середины 1968 г., когда он был демонтирован и заменен импульсным реактором – ИБР-30. В реакторе ИБР-30 повторяется общая компоновка узлов ИБР. Несколько изменена конструкция ТВЭлов, чтобы обеспечить съем тепловой мощности до 30 кВт. В

основном подвижном диске диаметрально противоположно запрессованы два вкладыша из ^{235}U для распределения тепловой нагрузки между ними. Введен третий подвижный элемент для медленной модуляции реактивности – подвижный отражатель в виде качающегося вольфрамового стержня. При работе всех трех модуляторов реактивности (основных подвижных зон, вспомогательной подвижной зоны и подвижного отражателя) вспышки мощности реактора возникают сравнительно редко: один раз в течение 2-3 с. Но зато интенсивность их очень велика: в таком режиме редких периодических импульсов было достигнуто пиковое значение мощности реактора более 1000 МВт. Кинематическая схема реактора ИБР-30 позволяет осуществлять работу почти с любой частотой повторения импульсов в диапазоне от 100 до 0,13 с⁻¹.

На основе опыта успешной работы ИБР был спроектирован мощный импульсный реактор периодического действия ИБР-2, создаваемый также в Дубне. Пуск реактора был осуществлен в 1977 г. Комплекс ИБР-2 включает в себя кроме импульсного реактора на быстрых нейтронах периодического действия с жидкометаллическим охлаждением также сильноточный линейный индукционный ускоритель электронов ЛИУ-30 и экспериментальные устройства. Работа установки возможна в двух вариантах: а) в бустерном режиме с ускорителем-инжектором и б) в импульсном режиме без инжектора; импульсное действие реактора обеспечивается периодическим изменением реактивности системы в результате перемещения части отражателя по отношению к активной зоне. Активная зона реактора представляет собой неправильный шестигранник, набранный из кассет твэлов типа кассет реакторов БР-5 или БОР-6 с шагом 27 мм. Сборки вставлены с натягом в нижнюю опорную стальную плиту; в каждой из них – по семь твэлов, дистанционированных друг от друга проволокой диаметром 0,5 мм. Высота активной части твэла, набранной из таблеток спеченной двуокиси плутония, составляет 44 см. Активная зона

размещается в двухстенном стальном корпусе: пространство между стенами является контрольным на протекание натрия и служит для подачи горячего воздуха при разогреве аппарата. Боковые стороны шестигранника защищены вольфрамовыми блоками толщиной 80 мм, выполняющими роль органов регулирования. Вольфрамовые блоки охлаждаются воздухом.

В связи с выработкой ресурса основных узлов реактора, а также с целью развития и совершенствования реактора была разработана концепция модернизации ИБР-2. Концепция модернизации реактора ИБР-2 предусматривает выполнение работ, включая разработку, изготовления и монтаж реакторного оборудования. В тоже время, с учетом опыта эксплуатации реактора и проведения физических исследований, данная концепция содержит ряд новых технических решений, заметно улучшающих эксплуатационные и физические характеристики реактора, что позволит говорить о создании в процессе модернизации фактически нового реактора ИБР-2М.

С января 2007 г. после прекращения работы реактора на физический эксперимент проводятся работы по модернизации ИБР-2 в соответствии с «Программой работ реактора ИБР-2 в режиме временного останова (2007-2010 г.)».

Программа развития и совершенствования реактора ИБР-2 предполагал три направления работ [26]:

- улучшение основных параметров реактора,
- повышение безопасности и эксплуатационной надежности реактора,
- обновление основного оборудования реактора.
- В ходе модернизации ИБР-2 замене на новые подлежал следующие узлы и системы реактора:
 - корпус реактора,
 - топливная загрузка,
 - стационарные отражатели с откатными защитными устройствами,

- система управления и защиты, включая исполнительные механизмы органов регулирования и аварийной защиты, аппаратуру контроля и управления реактором, систему контроля технологических параметров и пульт реактора,
- система радиационного контроля,
- замедлители,
- система охлаждения криогенных замедлителей.

Это позволило не только улучшить основные параметры реактора, но и повысить безопасность и эксплуатационную надежность реактора [26]. В 2006 г. на сборочном участке ТВС в ОИЯИ были изготовлены тепловыделяющие сборки для топливной загрузки активной зоны реактора ИБР-2М. Первым этапом работ по демонтажу отработанного оборудования ИБР-2 стала разгрузка активной зоны реактора ИБР-2, проведенная в первой половине 2007 г. После выгрузки активной зоны ИБР-2, натриевый теплоноситель был слит из контуров охлаждения, натриевые контуры заполнены аргоном, демонтировано оборудование системы управления и защиты с отработавшим сроком службы. Подвижный отражатель отодвинут от корпуса в промежуточное положение. Корпус реактора демонтирован и удален в хранилище отработавших корпусов. Следующим этапом демонтажа оборудования стало удаление откатных биологических защит со стационарными отражателями. Для выполнения этой задачи были реализованы технические и организационные меры по защите персонала от воздействия ионизирующего излучения в связи с высокой наведенной активностью стационарных отражателей. Опытным производством НИКИЕТ изготовлен и поставлен в ОИЯИ корпус реактора ИБР-2М. Опытным производством ОИЯИ были изготовлены новые откатные биологические защиты со стационарными отражателями. Особенностью конструкции новых откатных защит является создание откатных замедлителей, устанавливаемых в массив каждой защит и передвигающихся по рельсовому пути вдоль продольной оси [27]. Это позволяет производить оперативно смену

замедлителей без демонтажа стационарных отражателей и рабочих органов СУЗ. Заключительный этап, модернизации был проведен на период 2010 — 2012 г.г. включает в себя:

- физический пуск реактора ИБР-2М с водяными замедлителями,
- энергетический пуск реактора,
- монтаж комплекса криогенных замедлителей,

Таким образом, после 2011 г. в ОИЯИ снова начинал работать модернизированный реактор ИБР-2М. Новизна реактора ИБР-2М по сравнению с реактором ИБР-2 состояло в следующем:

1. Компактная активная зона рассчитана на загрузку 69 ТВС вместо 78 ТВС для реактора ИБР-2 и, как следствие, снижение массы загружаемого топлива.
2. Использование в качестве топливной загрузки только втулочных ТВЭЛов что позволяет увеличить допустимую глубину выгорания до 9%, т.е. почти 1,5 раза в сравнении с реактором ИБР-2.
3. Применение двух блоков аварийной защиты в сочетании с приводом на базе шагового двигателя, реализующих функции быстрой и медленной аварийной защиты. При этом увеличивается скорость срабатывания аварийной защиты и существенно упрощается конструкция стационарного отражателя.
4. Создание откатных замедлителей, что позволяет производить оперативно смену замедлителей без демонтажа стационарных отражателей и рабочих органов СУЗ.
5. Создание комплекса криогенных замедлителей.

Благодаря использованию комплекса замедлителей становится возможным обеспечение высокой эффективности исследований по физике конденсированного состояния с использованием холодных нейтронов с длиной волны более 0,4 нм. В качестве рабочего материала криогенных замедлителей используются твердые шарики из смеси ароматических

углеводородов мезитилена, которые периодически сменяются в камере замедлителя. Такой замедлитель создается впервые в мире [28].

Одним из важных преимуществ использования криогенных замедлителей на основе ароматических углеводородов является продолжительность их работы без смены температурного режима и загрузки не менее трех суток. Комплекс замедлителей на модернизированном реакторе ИБР-2М позволит повысить эффективность использования нейтронов в экспериментах на выведенных пучках до 25 раз [29-38].

В настоящее время ИБР-2М-самый высокопоточный в мире импульсный источник нейтронов для научных исследований. Основные параметры и характеристики ИБР-2 и ИБР-2М даны в Таблице 1. В процессе модернизации были полностью заменены активная зона с корпусом аппарата, стационарные отражатели, органы регулирования и аварийной защиты.

Таблица 1. Основные параметры и характеристики ИБР-2 и ИБР-2М

| Характеристика | ИБР-2 | ИБР-2М |
|---|-------------------|-------------------|
| Средняя тепловая мощность реактора | 2 МВт | 2 МВт |
| Мощность в импульсе | 1500 МВт | 1830 МВт |
| Мощность между импульсами | 0,15 МВт | 0,2 МВт |
| Длительность импульса мощности на половине высоты | 245 | 200 мкс |
| Частота импульсов мощности | 5 с ⁻¹ | 5 с ⁻¹ |
| Объем активной зоны | 22 л | 19.5 л |
| Теплоноситель | жидкий натрий | жидкий натрий |
| Эксплуатационный ресурс ПО, часы | 20000 | 55000 |
| Количество ТВС | 78 | 69 |
| Максимальное выгорание | 6,5 % | 9 % |

1.2. Подвижный отражатель ИБР-2М

Импульсный исследовательский реактор периодического действия это реактор на быстрых нейтронах, работающий в режиме периодические и часто повторяющихся импульсов мощности. Его главная отличительная особенность наличие механического модулятора реактивности подвижного отражателя (ПО), который обеспечивает циклический процесс глубокого изменения реактивности в течение неограниченного времени [39].

Модулятор реактивности состоит из основного (ОПО) и дополнительного (ДПО) подвижных отражателей (см. рис.1). Ротор ОПО представляет собой лопасть с тремя “зубьями” и противовесом, а ДПО – лопасть с двумя “зубьями”. Модулятор реактивности вместе с приводом и защитой смонтирован на откатывающейся тележке — роторы заключены в герметичный кожух и вращаются в среде гелия. Принципиальным отличием ИБР-2М является наличие подвижных отражателей нейтронов, которые обеспечивают пульсирующий режим работы. Роторы вращаются в противоположные стороны с разными скоростями в кожухе, заполненном гелием. Скорость основного подвижного отражателя 600 об/мин, дополнительного – 300 об/мин. Когда роторы проходят мимо активной зоны одновременно, создается импульс реактивности. В штатном режиме положение органов 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 одной миллисекунды, переводится из состояния глубокой подкритики ($k_{эф} \approx 0,97$) в надкритическое состояние по мгновенным нейтронам. В течение этого времени происходит стремительный рост мощности.

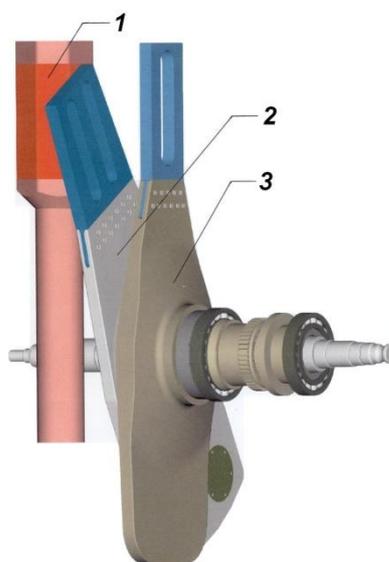


Рис. 1. Схема ИБР-2 с подвижным отражателем ПО-3: 1 – активная зона; 2, 3 – основной и дополнительный подвижный отражатель соответственно

На периферии роторов, на уровне активной зоны реактора, закреплены гребенки из никелевого сплава, являющиеся собственно отражателями нейтронов. Линейная скорость движения гребенок - около 70 м/с. При одновременном прохождении их мимо активной зоны происходит быстрое увеличение коэффициента размножения. Вследствие последовательного трехкратного перекрытия щелей гребенок изменение коэффициента размножения имеет пульсирующий характер, но наибольшее значение $k_{эф} \sim 1.001$ на мгновенных нейтронах достигается при симметричном расположении гребенок. На этом гребне коэффициента размножения развивается и затухает импульс мощности реактора.

1.3. Формирование импульса в ИБР-2М

При вращении подвижные отражатели создают в реакторе ИБР-2 периодические импульсы реактивности (см. рис. 2). Каждый второй импульс реактивности имеет наибольшую амплитуду. Он создается при прохождении мимо активной зоны одновременно ОПО и ДПО. Органы управления реактором вводятся в такое положение, что реактивность реактора, обусловленная каждым вторым импульсом модулятора реактивности, периодически (с периодом $T_u = 0,2$ с) на короткое время (~ 400 мкс)

становится положительной на мгновенных нейтронах. Вследствие этого реактор генерирует мощные нейтронные импульсы с частотой 5 Гц.

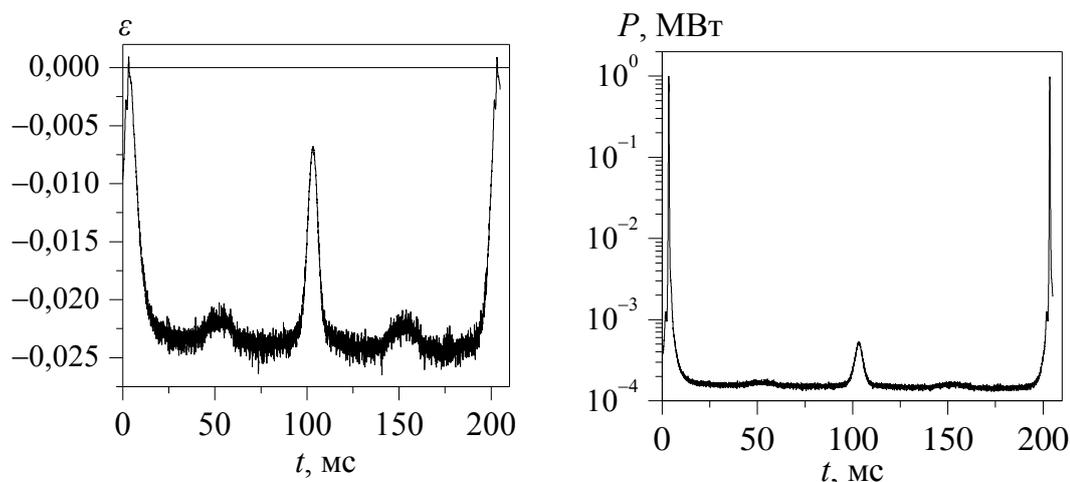


Рис. 2. Изменение реактивности на мгновенных нейтронах и мощности между соседними импульсами мощности при средней мощности 1,35 МВт. ϵ – реактивность в абсолютных единицах, P – мощность в относительных, t – время в мс

Это приводит к образованию побочных нейтронных импульсов с незначительной амплитудой (на три порядка меньшей, чем амплитуда импульса мощности). В интервалах между импульсами, т.е. когда напротив активной зоны нет ни ОПО, ни ДПО, мощность реактора (мощность фона) меньше амплитуды импульса мощности примерно на четыре порядка. В результате такого принципа формирования пульсирующей реактивности почти вся энергия, выделяемая в реакторе, выделяется в течение импульсов мощности (93%), на долю же пауз приходится лишь 7 % всей энергии.

1.4. Системы управления и защиты (СУЗ) ИБР-2М

Основным средством оперативного управления значением и пространственным распределением плотности нейтронов в активной зоне ядерного реактора является размещение и перемещение так называемых СУЗ.

Для управления модернизированным реактором ИБР-2М была разработана и изготовлена совершенно новая, отвечающая всем современным требованиям безопасности, система управления и защиты

реактора, предназначенная для контроля мощности реактора, управления, поддержания и аварийного прекращения цепной реакции деления, контроля состояния модулятора реактивности, контроля технологических параметров систем, важных для безопасности, недопустимое отклонение которых требует аварийного останова реактора.

В составе СУЗ ИБР-2М были модернизированы следующие составные части:

- исполнительные механизмы СУЗ (разработка НИКИЭТ);
- иницирующая часть СУЗ — комплекс аппаратуры системы управления и защиты реактора ИБР-2М (АСУЗ-12Р), включая подвески ионизационных камер (разработка СНИИП-Систематом);
- полномасштабный пульт для организации рабочих мест инженера СУЗ, инженера КИП и начальника смены (разработка СНИИП-СИСТЕМАТОМ);
- аппаратура резервного пункта управления (разработка СНИИП-Систематом). Введен ряд новых функций, определяемых комплексом АСУЗ-12Р:
- автоматизированная предпусковая проверка контроля срабатывания аварийной защиты, что значительно сократило время на подготовку реактора к работе;
- архивация, отображение и документирование контролируемых параметров;
- плановый останов с мощности менее $1\% W_{\text{ном}}$;
- контроль времени падения рабочих органов СУЗ;
- автоматический останов реактора на заданном уровне мощности.

Качественно изменились предоставление информации по контролируемым параметрам на пульте управления реактором и ряд технических характеристик каналов защиты и контроля, так, чувствительность пусковых каналов контроля нейтронного потока по сравнению с предыдущей

аппаратурой повысилась в 3-5 раз. На этапе физического пуска ИБР-2М были проведены испытания указанных частей и аппаратуры комплекса АСУЗ-12Р при совместной работе в составе СУЗ ИБР-2М:

- приводов органов регулирования (КО-1, КО-2, РР, АР) и защиты (АЗ-1, АЗ-2), подвесок блоков детектирования нейтронного потока ПИК1-ПИК5;
- комплекса АСУЗ-12Р.

К органам системы управления и защиты (СУЗ), перемещающим в матрице стационарного стального отражателя вольфрамовые блоки [40-43], относятся: два компенсирующих органа (КО), два блока аварийной защиты (АЗ), промежуточный (ручной) регулятор (РР) и автоматический регулятор (АР) (рис. 3).

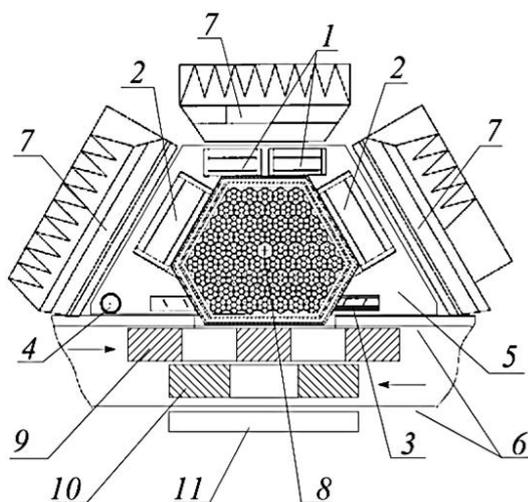


Рис. 3. Поперечный разрез активной зоны реактора ИБР-2М. 1 – блоки аварийной защиты; 2 – блоки первого и второго компенсирующих органов; 3 – блок промежуточного регулятора; 4 – стержень автоматического регулятора; 5 – матрица стационарного отражателя; 6 – кожух подвижного отражателя; 7 – водяные гребенчатые замедлители; 8 – внешний нейтронный источник; 9 – основной подвижный отражатель; 10 – дополнительный подвижный отражатель; 11 – водяной плоский замедлитель

Аварийная защита. АЗ обеспечивает резкое уменьшение реактивности за время между соседними импульсами мощности. Состоит из двух блоков – АЗ1 и АЗ2. По команде на сброс блоки АЗ перемещаются вниз

за первые 0,1 с не менее чем на 80 мм, а за 0,2 с не менее чем на 210 мм. В исходном (начальном) положении блоки АЗ располагаются в активной зоне на отметке около 380 мм.

Компенсирующий орган. КО состоит из двух блоков – КО1 и КО2. В штатном режиме КО может перемещаться с разной скоростью (малой или большой), причем не непрерывно, а шагами продолжительностью не более 4 с. Предусмотрена также аварийная скорость перемещения КО вниз (41 мм/с) при появлении сигнала на сброс аварийной защиты.

Автоматический регулятор. АР предназначен для автоматического поддержания мощности. При сигнале на сброса аварийной защиты АР перемещается вниз с максимальной скоростью 16,7 мм/с.

Промежуточный регулятор. Промежуточный регулятор управляется вручную. Скорость его перемещения 0,79 мм/с. ПР перемещается не непрерывно, а шагами продолжительностью не более 7 с. Перемещение ПР (и, следовательно, изменение с его помощью реактивности) осуществляется тогда, когда автоматический регулятор приближается к краю своей линейной зоны. В результате перемещения ПР АР возвращается в середину своей линейной зоны. При сигнале на сброс аварийной защиты ПР перемещается вниз. В табл. 2 приведены, полные и дифференциальные эффективности органов.

Таблица 2. Эффекты реактивности рабочих органов (РО) СУЗ ИБР-2М

| РО СУЗ | Рабочий ход от НКВ до ВКВ, мм | Эффективность | | | | |
|-----------|--|---------------------------------|-------------------|---------------------|---------------------------------|-------------------------|
| | | Полная | | Дифференциальная | | |
| | | % $K_{эф}$ | Доли $\beta_{эф}$ | Линейный участок | % $K_{эф}/мм$ | $10^{-2} \beta_{эф}/мм$ |
| АР | 0-295 | $(1,73 \pm 0,07) \cdot 10^{-2}$ | 0,0805 | 0-130 | $(9,67 \pm 0,39) \cdot 10^{-5}$ | $0,045 \pm 0,0018$ |
| ПР | 0-370 | $0,27 \pm 0,011$ | $1,25 \pm 0,05$ | 150-250 | $(9,6 \pm 0,038) \cdot 10^{-4}$ | $0,44 \pm 0,018$ |
| КО1 | 0-410 | $2,01 \pm 0,08$ | $9,3 \pm 0,37$ | 150-250 | $(6,9 \pm 0,28) \cdot 10^{-3}$ | $3,2 \pm 0,13$ |
| КО2 | 0-410 | $2,18 \pm 0,08$ | $10,1 \pm 0,4$ | 150-250 | $(7,3 \pm 0,29) \cdot 10^{-3}$ | $3,4 \pm 0,14$ |
| АЗ1 | 0-380 | $1,04 \pm 0,042$ | $4,80 \pm 0,19$ | 120-220 | $(3,6 \pm 0,14) \cdot 10^{-3}$ | $1,64 \pm 0,066$ |
| АЗ2 | 0-381 | $1,05 \pm 0,042$ | $4,85 \pm 0,19$ | 120-220 | $(3,4 \pm 0,14) \cdot 10^{-3}$ | $1,57 \pm 0,063$ |

Примечание. НКВ, ВКВ – нижний и верхний концевые выключатели соответственно.

1.5. Ядерная безопасность реактора

Безопасность ядерных реакторов обычно рассматривают с двух точек зрения: ядерной и радиационной. Оценка ядерной безопасности предполагает анализ тех характеристик реактора, которые определяют масштаб возможных изменений мощности реактора, возникающих при различных аварийных ситуациях. Под радиационной безопасностью понимают меры, принимаемые для защиты обслуживающего персонала и населения от неконтролируемой утечки радиоактивности при любом режиме работы реактора [44, 45].

Эксплуатирующая организация ОИЯИ проводит всеобъемлющую оценку безопасности реактора. Основой для этой оценки служат данные, полученные из анализа текущих значениях параметров реактора, их влияния на изменение реактивности, включая случайные колебания, а также информация из научных исследований и опыта предыдущей эксплуатации реактора. Оценка безопасности проводится на протяжении всех стадий жизненного цикла реактора.

Для обеспечения безопасной и надежной работы ИБР-2М принята мировая практика использования система управления и защиты, а также специфические для импульсного реактора периодического действия методы оценки безопасности, например, исследование реакторных шумов с помощью различных методов анализа и диагностики.

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ В РЕАКТОРЕ ИБР-2М

2.1. Случайные процессы в реакторе ИБР-2М

В процессе эксплуатации реактора ИБР-2М статистические свойства случайных колебаний реакторных параметров, влияющих на реактивность, таких, например, как температуры и расхода натрия на входе в активную зону, вибраций подвижных отражателей и т.д. меняются. Параллельно этим изменениям в активной зоне реактора происходят различные процессы деградационного типа, изменяющие динамические свойства реактора. Все это в целом приводит к изменению случайных колебаний энергии импульсов. Исследование реакторных шумов на протяжении всей работы реактора имеет большое значение для определения условий его безопасной и надежной работы. Анализ шумов мощности реактора позволяет определять различные изменения и нарушения в работе реактора и диагностировать измененное (нетипичное) состояние реактора на ранней стадии развития дефекта. Теоретически описать шумовые свойства реактора ввиду сложности процессов, происходящих в активной зоне и ее ближайшем окружении, невозможно. Надежную информацию по шумам ИБР-2М для целей их практического использования можно получить только экспериментальным путем.

2.2. Быстрые и медленные колебания реакторных параметров

Поскольку понятия «быстрые» или «медленные» эффекты реактивности в реакторе ИБР-2М достаточно условны, рассмотрим это обстоятельство более подробно. Все многообразие эффектов реактивности вне зависимости от их физической природы можно разделить на три группы по степени их обработки системой автоматического регулирования.

- 1) К первой группе можно отнести эффекты, спектральный состав которых превышает граничную частоту пропускания системы автоматического регулирования $f > 1$ Гц. Для эффектов этой группы система автоматического регулирования полностью «прозрачна».

- 2) Вторую группу составляют быстрые эффекты реактивности, временные константы которых находятся как в зоне действия системы автоматического регулирования, так и вне ее. Система автоматического регулирования частично обрабатывает эти эффекты, частично нет.
- 3) Третья группа - медленные эффекты, частотный диапазон которых находится в зоне действия системы автоматического регулирования ($f < 0,1$ Гц). Временные константы медленных эффектов составляют часы-сутки. Система автоматического регулирования надежно обрабатывает эти эффекты.

Эффекты первой группы вызваны случайными шумами реактивности от вибраций подвижных отражателей и топливных кассет, флуктуации температуры и расхода натрия и т. д. Эта группа шумов характеризуется большой частотой их появления (от 1 Гц до ~ 2 кГц) и достаточно высокой амплитудой. Шумы реактивности в этом частотном диапазоне вызывают случайные колебания энергии импульсов мощности, контролируемые только системой защиты реактора.

Эффекты второй группы (быстрые эффекты реактивности) имеют две или более компоненты, одна из которых практически мгновенная (действует в интервалах времени, сравнимых с периодом повторения импульсов мощности), другие компоненты имеют временные константы менее 1-2 мин. С точки зрения эксплуатации реактора это наиболее сложные эффекты, во многом определяющие условия стабильной и безопасной работы реактора. Для компенсации таких эффектов оператору приходится часто вмешиваться в процесс регулирования. Третья группа эффектов реактивности (медленные эффекты реактивности) надежно и полностью обрабатывается системой автоматического регулирования мощности. Оператор может прогнозировать свое участие в процессе регулирования [46].

Мощностной эффект. Под мощностным эффектом понимается изменение коэффициента размножения (реактивности) при изменении мощности. Изменение мощности приводит к стабилизации мощности, или к ее колебательной неустойчивости.

Этот эффект реализуется по различным каналам мощностной обратной связи, которые по времени действия для ИБР-2М можно разделить на быстрые (менее 3 мин) и медленные (с временными константами от 3 мин до нескольких суток). Знание параметров медленных эффектов реактивности необходимо для понимания и прогнозирования состояния реактора при длительной его работе, а также оценки динамики развития аварийных ситуаций [47].

При резком изменении мощности в ИБР-2М происходит следующее:

- 1) быстрый неоднородный подогрев топлива, натрия, находящегося в данный момент активной зоне, искривление топливных элементов и топливных кассет. Характерные времена – 0,1-3с;
- 2) смещение разогретого натрия по оси активной зоны. Аксиальное расширение твелов, разогрев корпуса активной зоны и его смещение относительно стационарных отражателей. Характерные времена – 2-20 с;
- 3) подогрев активной зоны натрием, поступающим после круга циркуляции по первому контуру системы охлаждения в активную зону. Характерные времена – 20-100 с;

По времени действия МОС можно разделить на две компоненты быструю и медленную. Характеристики и физическая природа этих компонент существенно различаются. Под быстрой обратной связью понимается мощностная связь, действующая в течение 20-60 с после возмущения реактивности, под медленной - все остальное. Быстрая МОС обусловлена процессами, происходящими в активной зоне, медленная - тепловыми процессами в системе охлаждения реактора и

термомеханическими изменениями в ближайшем окружении активной зоны после возмущения мощности. Диапазон времени 20-60 с связан с ограничением по времени циркуляции натрия первом контуре системы охлаждения активной зоны. Быстрый компонент мощности как наиболее ответственная за стабильность и динамическую устойчивость реактора [48].

Расходный эффект. Охлаждение активной зоны реактора ИБР-2М осуществляется с помощью жидкого натрия, циркулирующего в двух независимых петлях первого и второго контуров системы охлаждения реактора. В процессе нормальной работы реактора расход натрия через активную зону меняется. Это, например, флуктуации расхода, обусловленные работой электромагнитных насосов, изменение расхода за счет изменения плотности натрия при изменении его температуры, принудительное изменение расхода при изменении режима эксплуатации реактора или при исследовании реактора, сбросы расхода при аварийном расхолаживании при сбросе мощности и т. д. При этом любое изменение расхода вызывает соответствующее изменение в состоянии активной зоны (коэффициента размножения) и, соответственно, мощности. Знание параметров расходного эффекта, так же как и эффекта, связанного с изменением мощности реактора, необходимо для обеспечения условий надежной и безопасной работы реактора, для прогнозирования поведения реактора в различных переходных процессах и аварийных ситуациях, а также для прогнозирования изменения расходного эффекта в процессе выгорания топлива.

Под расходным эффектом реактивности понимается изменение реактивности при изменении расхода натрия через активную зону. При резком уменьшении расхода натрия в активной зоне ИБР-2М происходит следующее:

- 1) быстрый, во время изменения расхода, гидродинамический толчок на топливные кассеты. В данной ситуации при уменьшении расхода это «схлопывание» топливных кассет к центру активной зоны. Характерные времена - 1-6 с;
- 2) далее, аналогично резкому росту мощности, происходит быстрый неоднородный подогрев топлива и натрия, находящегося в активной зоне, искривление твэлов и топливных кассет, смещение разогретого натрия по оси активной зоны, разогрев корпуса активной зоны и его смещение относительно стационарных отражателей. Характерные времена - 20-60 с;
- 3) далее происходит подогрев активной зоны натрием, поступающим после круга циркуляции по первому контуру системы охлаждения в активную зону. После чего температурные изменения в активной зоне и в системе ее охлаждения начинают стабилизироваться. Характерные времена - 300 с и более.

Для безопасности реактора важно знать наиболее быстрые первые два эффекта. Первый эффект имеет чисто гидродинамическую природу и проявляется при любой мощности от нулевой до номинальной 2 МВт [49].

Температурный (изотермический) эффект. Изотермический коэффициент реактивности определяется как изменение реактивности при равномерном увеличении температуры реактора на один градус при постоянной мощности и расходе. На практике этот коэффициент отражает влияние температуры натрия на реактивность. В динамическом смысле изотермический коэффициент реактивности состоит из двух компонент. Основная компонента мгновенная (постоянная времени около 0,1 с) отрицательная, вторая - положительная меньшей амплитуды с постоянной времени несколько минут [50]. Асимптотическое изменение реактивности за время 1-2 мин и есть изотермический коэффициент реактивности.

2.3. Методы анализа случайных процессов и основные результаты обработки

Накопление данных осуществлялось с помощью системы измерения реакторных параметров, предназначенной для исследования реактора на стадии физического и энергетического пуска. Результаты измерений записывались с частотой повторения импульсов, равной 5 с^{-1} с меткой астрономического времени.

После накопления данных последовательных значений энергии импульсов данные записываются в файл для дальнейшей обработки. Структурная схема измерительной системы показана на рис. 4. В качестве детектора нейтронов использовалась ионизационная камера КНК-53М, установленная вблизи активной зоны непосредственно у замедлителя со стороны первого горизонтального пучка нейтронов. Схема расположения ионизационных камер вокруг активной зоны показана на рис. 5.

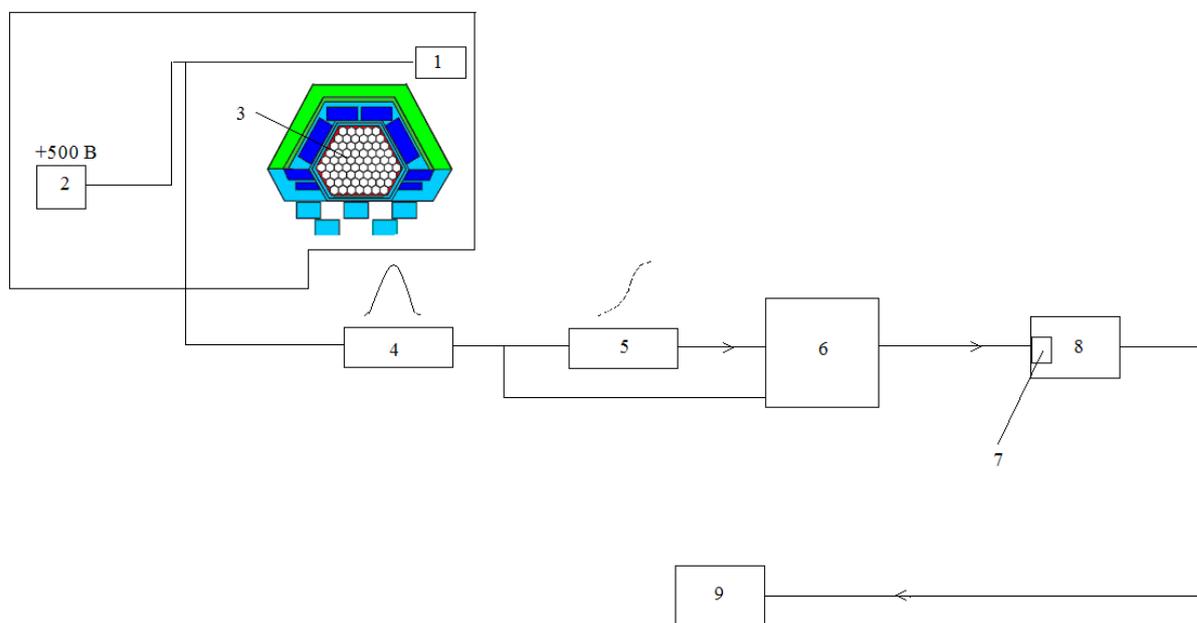


Рис.4. Структурная схема измерительной системы, 1— Ионизационная камера, 2— Блок высокого напряжения, 3— активная зона, 4— усилитель импульса тока, 5— интегратор, 6 — аналого цифровой преобразователь, 7— контроллер связи, 8— рабочая станция, 9— станция обработки данных.

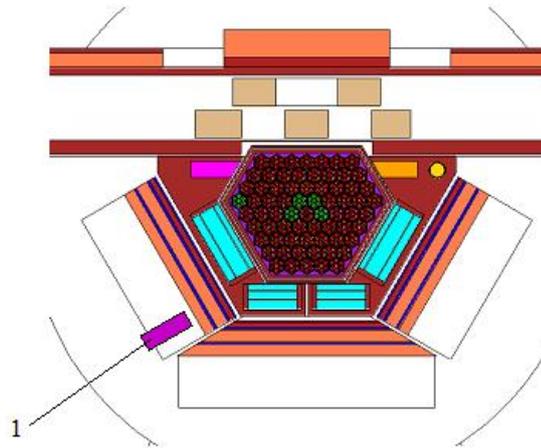


Рис.5. Схема расположения ионизационной камеры вблизи активной зоны модернизированного реактора ИБР-2, 1— Ионизационная камера.

Ионизационная камера КНК53М предназначена для измерения плотности потока нейтронов с компенсацией сопутствующего гамма-излучения для применения в системах управления и защиты ядерных реакторов. Некоторые характеристики ионизационная камера КНК-53М показана в таб.3. Ионизационная камера КНК-53М является камерой рабочего диапазона, токовая, компенсированная, с твёрдым борным покрытием электродов. Покрытие выполнено бором, обогащённым изотопом ^{10}B , степень обогащения 85 %. Покрытие нанесено только на положительные электроды, площадь покрытия около 1800 см^2 . Конструктивно камера представляет набор пластин диаметром 44,5 мм, закреплённых на стержневых электродах. Камера заполнена газовой смесью, состоящей из 94 % гелия и 6 % азота при давлении 0,6 МПа.

Таблица.3. Некоторые характеристики ионизационная камера КНК-53М

| Технические характеристики ионизационной камеры КНК53М | |
|---|--|
| Собственный фон | $1,0 \cdot 10^{-10} \text{ А}$ |
| Сопротивление изоляции при нормальных условиях | $3,0 \cdot 10^{11} \text{ Ом}$ |
| Сопротивление изоляции при повышенной рабочей температуре | $1,0 \cdot 10^8 \text{ Ом}$ |
| Значение абсолютной чувствительности | |
| К гамма-излучению | не более $1,3 \cdot 10^{-12} \text{ А} \cdot \text{Р}^{-1} \cdot \text{ч}$ |
| К нейтронам | $1,61 \cdot 10^{-14} \text{ А} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{нейтр}^{-1}$ |
| Напряжение питания | +500В, -(100В-500В) |
| Габариты | 50x50x512мм |

КНК-53М представляет собой алюминиевую герметичную трубу, в нижней части которой размещена сама ионизационная камера, подвешенная на жёсткой алюминиевой штанге. Для обеспечения защиты в верхней части подвески штанга выполнена в виде стального цилиндра. В верхней части подвески труба соединена с герметичной клеммной коробкой. Токоведущие жилы, проходящие от камеры до клеммной коробки по всей длине изолированы от металлических конструкций подвески специальными керамическими изоляторами. От канала подвеска изолирована специальными втулками, равномерно распределёнными по высоте трубы подвески. Подключение подвески к источнику питания и электронным приборам осуществляется высокочастотным коаксиальным кабелем через герметичный разъём. Большинство деталей подвески выполнено из алюминия, корпус клеммной коробки и сама камера выполнены из нержавеющей стали.

2.3.1. Общий статистический анализ

Полной временной ряд $X(t)$, зарегистрированный в течение всего реакторного цикла, разбивается на N отдельных последовательных временных рядов X_i длиной 8192. Далее для каждого временного ряда X_i проводится предварительная обработка, суть которой заключалась в следующем. В начале осуществляется фильтрация временного ряда для исключения неправдоподобных значений, вызванных различными возможными сбоями измерительной системы или искажениями в канале передачи данных (аппаратурных выбросов), затем осуществлялись операции удаление полиномиального тренда и центрирование. Наличие выброса в точке i X_i определялось по критерию [51]

$$\frac{|X_i - \bar{X}|}{\sigma_X} \geq k, \quad (\sigma_L^2 - \sigma_X^2)/\sigma_X^2 \geq m,$$

где \bar{X} - среднее значение временного ряда, $L = \overline{1,16}$ - число разбиений временного ряда X_i по 512 значений, $i = \overline{1,512}$ - текущий индекс, σ_X , σ_L - стандартное отклонение, определенное по всему ряду X_i и на участке

временного ряда (L-м сегменте) длиной 512. Значение k и m зависят от плотности распределения и для исследуемых временных рядов выбирались равными 6. При малом числе выбросов (менее 10) значение выброса в точке i заменялось на $(X_{i-1} + X_{i+1})/2$. При несоблюдении условий стационарности в широком смысле временной ряд приводился к стационарному виду с потерей части информации в низкочастотной области спектра. Для последовательных сегментов временного ряда длиной 512 устранялся линейный $Y_t = a + bx$ или квадратичный $Y_t = a + bx + cx^2$ тренд. Коэффициенты a , b и c определялись методом наименьших квадратов. В дальнейшем исследовался центрированный временной ряд.

$$X(t) = X(t) - Y_t$$

В общей статистической обработке колебаний энергии импульсов учитывалось то обстоятельство, что данные об энергии импульсов поступают с 3-х независимых детекторов, окружающих активную зону. Их показания могут коррелировать с движением корпуса активной зоны как целого, так и с движением отдельных элементов, окружающих активную зону. Кроме того известно, что на колебания мощности влияет целый ряд реакторных параметров, возмущения которых вызывают колебания реактивности и соответственно колебания энергии импульсов. Поэтому в статистическую обработку были включены также и процедуры взаимного спектрального и корреляционного анализа. Вычислялись следующие характеристики временного ряда:

1. Плотности распределения энергии импульсов $P(X_n)$ и отклонений $P(\Delta X_n)$, $\Delta X_n = X_{n+1} - X_n$, параметры распределения - первые четыре центральных момента (среднее значение, дисперсия, коэффициент асимметрии и эксцесс);
2. Автоспектр (спектральная плотности мощности) $S_{XX}(f)$, f – частота;
3. Плотность кросс – спектра (взаимная плотность мощности) $S_{XY}(f)$;

4. Вариация (автовариационная функция) $R_{XX}(\tau)$, τ – временной сдвиг;
5. Ковариация (взаимная автоковариационная функция) $R_{XY}(\tau)$;
6. Фазовый сдвиг $\Phi_{XY}(f)$;
7. Функция когерентности $\gamma_{XY}^2(f)$.

Вычисление спектральных оценок. В результате эксперимента в памяти ЭВМ формируется конечный дискретный временной ряд

$$X(n\Delta t) = X^*(n\Delta t) \cdot f_t(n\Delta t), \quad (4)$$

где $n = 0, \dots, T-1$, T – длина ряда (число последовательных значений энергии импульсов), Δt – период между импульсами, $X^*(n\Delta t)$ – бесконечный временной ряд, соответствующий реальному физическому процессу, $f_t(n\Delta t)$ – прямоугольное весовое окно данных. Непосредственный переход от временных соотношений, определяемых выражением (4), к частотным

$$F_x(k\Delta f) = F_x^*(k\Delta f) * F(k\Delta f), \quad (5)$$

где $\Delta f = f_0 / 2T$, $-\infty < k < \infty$, f_0 – частота опроса, F – оператор Фурье преобразования, $*$ – оператор свертки, приводит к искаженному представлению спектральной оценки, в которой компоненты временного ряда с частотой не кратной величине $1/T$, оказываются “размытыми” по всем возможным частотам вычисленного спектра. Для повышения статистической устойчивости авто и кросс - спектров использовались следующие методы:

1. Введение временного окна;
2. Применение метода периодограмм с усреднением.

Основу метода периодограмм в данном пакете обработки составляет усреднение спектральных оценок, получаемых на коротких участках (сегментах) исходного временного ряда $X(n\Delta t)$ $n = 0, 1, \dots, T-1$. Ряд $X(n\Delta t)$ разбивается на L участков длиной $M=512$. Для каждого i -го сегмента $X^{(i)}$ вычисляется конечное дискретное преобразования Фурье $S^{(i)}(f)$ на основе которого определяются текущие i -ые периодограммы

$$|S^{(i)}(f)|^2 = \text{Re}^2[S^{(i)}(f)] + \text{Im}^2[S^{(i)}(f)].$$

Оценкой авто - \bar{S}_{XX} - и кросс-спектров \bar{S}_{XY} являются оценки усредненных периодограмм

$$\bar{S}_{XX}(f) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L |S_{XX}^{(i)}(f)|^2; \quad \bar{S}_{XY}(f) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L |S_{XY}^{(i)}(f)|^2;$$

Оценки фазового спектра $\Phi_{XY}(f)$ и функция когерентности $\gamma_{XY}^2(f)$ задаются в виде:

$$\Phi_{XY}(f) = \arctg \frac{\text{Im}[S_{XY}]}{\text{Re}[S_{XY}]}, \quad \gamma_{XY}^2(f) = \frac{\bar{S}_{XY}^2}{\bar{S}_{XX} \bar{S}_{YY}},$$

а вариация R_{XX} и ковариация R_{XY} вычисляются из обратного дискретного преобразования Фурье

$$R_{XX}(\tau) = F^{-1}(S_{XX}), \quad R_{XY}(\tau) = F^{-1}(S_{XY}), \text{ где } \tau \text{ временной сдвиг.}$$

Метод модифицированных периодограмм позволяет в \sqrt{L} уменьшить стандартную ошибку спектральных оценок, сохранив при этом высокую разрешающую способность, свойственную отдельной периодограмме. В начале обработки по методу периодограмм вводится дополнительное усреднение каждой периодограммы в соответствие с выбранным спектральном окном, что эквивалентно умножению отдельного i -го сегмента временного ряда на соответствующее временное окно. В работе использовалось одно из оптимальных временных окон - окно Кайзера Бесселя [52].

Для оценки статистического разброса энергии импульсов использовались следующие характеристики:

1. Дисперсия

$$\sigma_t^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2,$$

где X_i - временной ряд, \bar{X} - среднее значение, n - длина временного ряда.

Дисперсия по спектру

$$\sigma_f^2 = \sum_{j=1}^z |S^{(i)}(f)|^2 \Delta f$$

где - $|S^{(i)}(f)|^2$ - спектральная плотность, $z = 256$ – число дискретных значений спектральной плотности, f – частота. При введении временного окна условие равенства дисперсий по времени и спектру не выполняется, т.е. $\sigma_t^2 \neq \sigma_f^2$, а коэффициент связи между ними при устранении тренда и переходе от одного временного ряда к другому может меняться. Поэтому использовались обе оценки дисперсии.

2. Относительное стандартное отклонение σ_Q/\bar{Q} и относительный размах колебаний $\Delta Q_m/\bar{Q}$, $\Delta Q_m = Q_{\max} - Q_{\min}$, где Q_{\max} , Q_{\min} – максимальное и минимальное значение энергии импульсов.

3. Относительная парциальная дисперсия

$$\eta_j^2 = \left(\frac{\sigma_{f_j}^2}{\sigma_f^2} \right) * 100\% ,$$

где $\sigma_{f_j}^2$ – дисперсия колебаний на средней частоте f_j в диапазоне Δf_j

$$\sigma_{f_j}^2 = \sum_{\Delta f_j} |S^{(i)}(f)|^2 \Delta f ,$$

и относительное парциальное среднеквадратическое отклонение

$$\eta_j = \left(\sqrt{\frac{\sigma_{f_j}^2}{\sigma_f^2}} \right) \cdot \frac{\sigma_t}{\bar{Q}} \cdot 100\% .$$

Оценки парциальных среднеквадратических отклонений на частоте f_j введены с целью показать, какие были бы колебания мощности, если бы другие источники возмущений кроме j -го отсутствовали.

4. Коэффициент асимметрии $A = \frac{\mu^3}{\sigma_t^3}$, где $\mu^3 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3}{n-1}$ и эксцесс

$E = \frac{\mu^4}{\sigma_t^4} - 3$, где $\mu^4 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^4}{n-1}$. Для симметричных распределений

коэффициент асимметрии равен нулю. Эксцесс характеризует относительную остроконечность или сглаженность распределения по сравнению с нормальным, для которого эксцесс равен нулю.

2.3.2. Кластерный анализ

Задача кластерного анализа в данном случае есть классификация большого объема данных по шумовому состоянию ИБР-2М. Использовались различные методы кластерного анализа, как иерархические, так и неиерархические. Иерархический кластерный анализ, как наиболее гибкий из существующих методов кластерного анализа, 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, например, алгоритм ISODATA [53], давали более значимое число кластеров. Каждая последовательная спектральная плотность колебаний энергии импульсов (далее спектр), отражающая шумовое состояние реактора в интервале времени ~28 минут (или 8192 последовательных значений энергии импульсов), представлялась в виде точки в многомерном Евклидовом пространстве. Евклидово расстояние между i -ой и k -ой точками есть

$$d_{ik} = \left[\sum_{j=1}^p (x_{ij} - x_{ik})^2 \right]^{\frac{1}{2}}.$$

Размерность пространства составляла 256 координат по числу точек в спектре. Выбранные методы кластерного анализа основаны на анализе расстояний между точками. Мера подобия – минимум расстояния между точками в кластере. В качестве альтернативного расстояния исследовался также квадрат евклидова расстояния и абсолютная величина расстояния между точками. Наибольшей трудностью при исследовании динамического изменения структуры объектов с использованием кластерного анализа является определение “правильного” числа кластеров. Все алгоритмы кластеризации основаны на предположении, что исходное распределение объектов (в данном случае спектров) неравномерно в пространстве с выбранной мерой длины [54]. Другими словами, кластеризация возможна,

если сами исходные данные позволяют это сделать. Существует ряд эвристических алгоритмов кластеризации, способных автоматически определять количество кластеров [55-59]. Но этого недостаточно, поскольку все алгоритмы основаны на формализованных процедурах анализа, поэтому требуют введения дополнительных априорных данных или использования приемлемых критериев оценки результатов. В настоящее время известно, по крайней мере, шестнадцать критериев оценки “правильного” числа кластеров [60]. Все они при анализе структуры шумов ИБР-2М дают, за некоторым исключением, результаты близкие друг другу. В работе при оценке качества кластерной структуры использовались три критерия. Первым критерием “правильности” кластеризации был принят индекс Данна $MD(c) = \min(r(j, i)) / \max(D_k) \forall i, j, k: i \neq j$, где D_k – диаметр кластера, $r(j, i)$ – расстояние между кластерами i и j , c – количество кластеров. Индекс Данна позволяет оценить компактность кластеров и их удаленность друг от друга [61]. Вторым обязательным условием анализа была оценка “силуэта”, которая для i -ой точки вычисляется как $sw_i = \frac{(b_i - a_i)}{\max(a_i, b_i)}$, где a_i – среднее расстояние от всех других точек в своем кластере, $d(i, c)$ – среднее расстояние относительно всех точек в кластере c , $b_i = \min d(i, c)$ [62]. Если среднее значение “силуэта” по всем точкам $\overline{sw} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n sw_i > 0.5$, то разбиение объектов по кластерам осмысленно, если $\overline{sw} < 0.2$ – данные не имеют кластерной структуры. Например, на рис. 6, показаны изменение “силуэта” при классификации спектров колебаний энергии импульсов ИБР-2М с получением трех и четырех кластеров для одного из иерархических методов анализа.

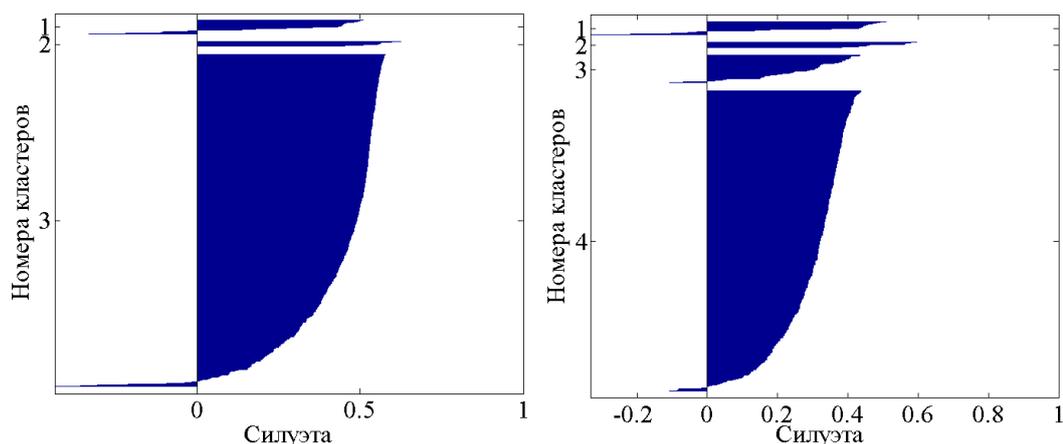


Рис.6. Пример изменения "силуэта" при использовании взвешенного попарно-группового метода кластерного анализа для трех (слева) и четырех кластеров (справа) при анализе шумов энергии импульсов ИБР-2М.

Среднее значение "силуэта" для трех кластеров на рис.9 равно 0.43 и 0.30 – четырех. Левая структура "лучше" правой, но обе слабо классифицированы. Отметим, что в этом примере переход от Евклидова расстояния к его квадратичной форме почти в полтора раза увеличивает значение "силуэта", хотя кластерная структура практически не меняется. Таким образом, выбор числа кластеров с использованием индекса Данна и "силуэта" является необходимым, но не достаточным критерием. Третий критерий оценки оптимального числа кластеров в данной работе основан на физическом смысле результатов кластеризации. С физической точки зрения, если существует возможность разбиения спектров на кластеры, то эти кластеры должны отличаться наличием некоторого инвариантного (в данном случае устойчивого) признака относительно общего изменения реакторного шума. Т.е. задача выбора оптимального алгоритма кластеризации спектров колебаний энергии импульсов ИБР-2М фактически состояла в следующем: временная последовательность спектров не должна иметь большого числа "перескоков" в соседние кластеры при достаточно высоких показателях индекса Данна и силуэта. На рис.7 показано, изменение средней величины "силуэта" от числа кластеров при использовании некоторых методов кластерного анализа.

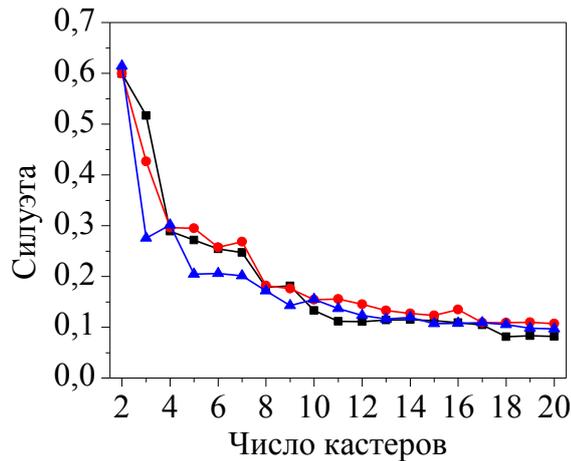


Рис.7. Изменение величины “силуэта” от числа кластеров при использовании некоторых методов кластерного анализа: ■ – Взвешенное попарно-групповое среднее, ▲ – Одиночное связывание (метод ближайшего соседа), ● – Невзвешенное расстояние между центрами масс.

При выборе оптимальной кластерной структуры использовались следующие процедуры кластеризации: метод дальнего соседа, взвешенное попарно-групповое среднее, взвешенное расстояние между центрами масс, метод наименьших квадратов (метод Ward’a) и ряд других [62]. Наилучшие результаты показал алгоритм с решением минимаксной задачи на основе взвешенного попарно-группового среднего и Евклидова расстояния. Выделялись структура кластеров с минимальными расстояниями между точками в кластере при среднем расстоянии $D(P \cup E, C)$ между центрами кластеров.

$$D(P \cup E, C) = \frac{D_{P,C} + D_{E,C}}{2}$$

где $P \cup E$ слияния кластеров, $D_{P,C}, D_{E,C}$ расстояния между кластерами $P \cup E$ и C . На рис.8 показано, схема алгоритма иерархической кластеризации.

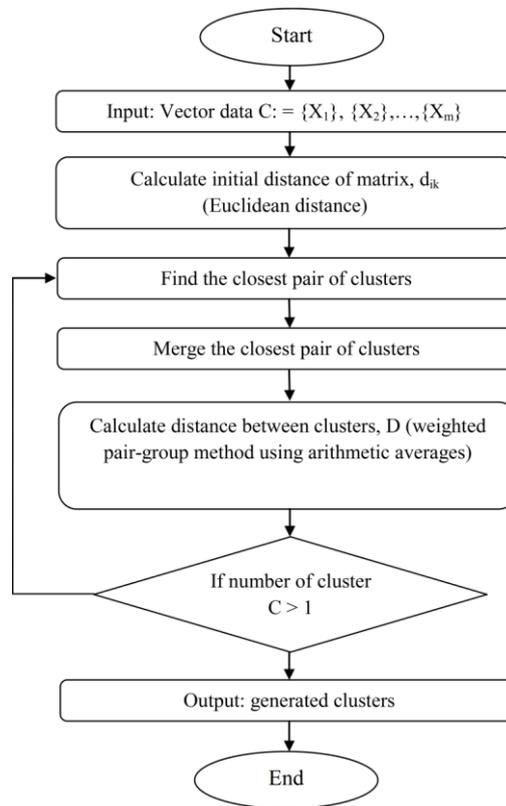


Рис.8. Схема алгоритма иерархической кластеризации

2.3.3. Искусственные нейронные сети

В качестве системы прогнозирования была выбрана модель нейронной сети (НС) [63, 64]. Эта интеллектуальная система способна прогнозировать закономерности временных рядов и в настоящее время широко используется в различных областях науки и техники [65]. Подробно методика использования НС на ИБР-2М представлена в [66]. Кратко суть этой методики состоит в следующем. Основу прогнозирования составляет нелинейная авторегрессионная сеть (NAR). Эта сеть относится к классу рекуррентных нейронных сетей (с обратными связями) и основана на нелинейной авторегрессионной модели [67-69]. Использование NAR, как показано в [70], позволяет решать задачу прогнозирования на сильно зашумленных временных рядах, что имеет место в измеряемых параметрах ИБР-2М. Расчет выходного значения сети y выполнялся по формуле

$$y = f\left(b + \sum_i w_i x_i\right),$$

где f -функция активации, b -значение смещение (bias), w_i -весовой коэффициент соответствующий i -ому нейрону, x_i - являются входами и y - выход. 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 [70], e -ошибка обучения. Весовой вектор i -ого 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 -ого нейрона. После обучения, когда все веса зафиксированы, в структуру NAR вводилась обратная связь.

Для уменьшения влияния шумовой компоненты на результат прогноза перед входом нейросети был добавлен медианный фильтр [71]. На рис.9 приведена архитектура нелинейной авторегрессионной сети.

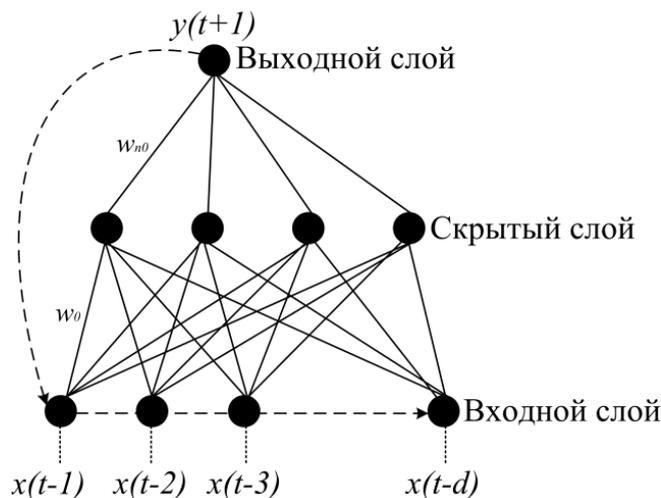


Рис.9. Структурная схема сети NAR

2.4. Исследование колебаний шумов энергии импульсов

Обработка данных основывалась на статистическом анализе временных рядов. Исходный временной ряд представляет собой массив последовательных значений энергии импульсов, зарегистрированных в течение полного реакторного цикла длительностью до 20 дней. Длина временного ряда в практических измерениях может составлять до $\sim 5 \cdot 10^7$ значений. Такая длина временного ряда соответствовала 11 суткам непрерывной работы реактора на средней мощности 2 МВт. Усредненная по всему реакторному циклу плотность распределения энергии импульсов приведена на рис. 10. В таблице 4 представлены значения параметров этого распределения.

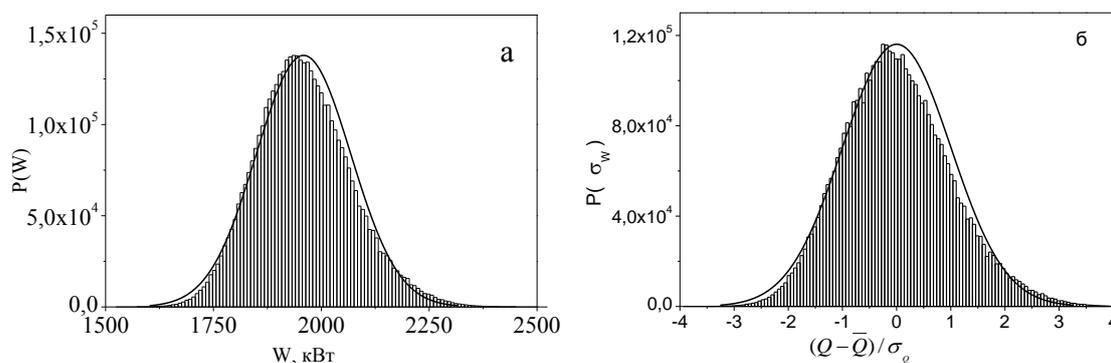


Рис.10. Плотность распределения энергии импульсов на мощности 2 МВт расходе натрия через активную зону $90 \text{ м}^3/\text{час}$: а - по мощности, б - в долях стандартного отклонения. Линией показан результат аппроксимации по гауссу.

Таблица.4. Значения параметров плотности распределения флуктуаций энергии импульсов на мощности 2 МВт и расходе натрия через активную зону $90 \text{ м}^3/\text{час}$

| Название параметра | Распределение по мощности (кВт) | Распределение по относительному отклонению энергии импульсов $(Q - \bar{Q})/\sigma_t$ |
|---|---------------------------------|---|
| Среднее значение, | 1960 | 0 |
| Стандартное отклонение | 110 | 1 |
| Максимальное отклонение от среднего в большую сторону | 560 (28%) | 5.2 |
| Максимальное отклонение от среднего в меньшую сторону | -430 (22%) | -3.9 |
| Относительный размах | 990 (50%) | 9.1 |
| Коэффициент асимметрии | | 0,34 |
| Экцесс | | 0,19 |

Как видно из рис.10 и таблицы 4, распределение энергии импульсов несимметрично: оно смещено в сторону меньших значений энергий. При этом нужно отметить, что вероятность появления импульсов в группе самых больших энергий выше, чем импульсов с самыми малыми энергиями. Согласно данным таблицы 4, отклонение значения максимальной энергии импульса от среднего в 1.33 раза выше, чем отклонение импульса с минимальной энергией. Полный размах колебаний мощности равный $9.1\sigma_t$ значительно превышает размах нормального усеченного распределения ($\sim 6\sigma_t$). Здесь и далее в тексте понятия распределение энергии и распределение мощности эквивалентны, поскольку при постоянной и стабильной длительности вспышки соотношение между энергией вспышки и фона не меняется, и мощность есть просто энергия за период. Среднеквадратические отклонения колебаний мощности в среднем составляют 110 кВт или 5.5 % от средней мощности, что мало. Напротив, размах колебаний мощности относительно среднего значения за полный цикл работы реактора достаточно велик (50%), хотя и находится в пределах допустимых требований. Для оценки степени безопасности реактора ИБР-2М важно не только характеристики разброса энергии импульсов, но и параметры распределения так называемых быстрых отклонений энергии импульсов, т.е. отклонений энергии в соседних импульсах (от i -го до $i+1$ импульса). На рис.11 представлена плотность распределения быстрых отклонений энергии, в таблице 5 – параметры этого распределения.

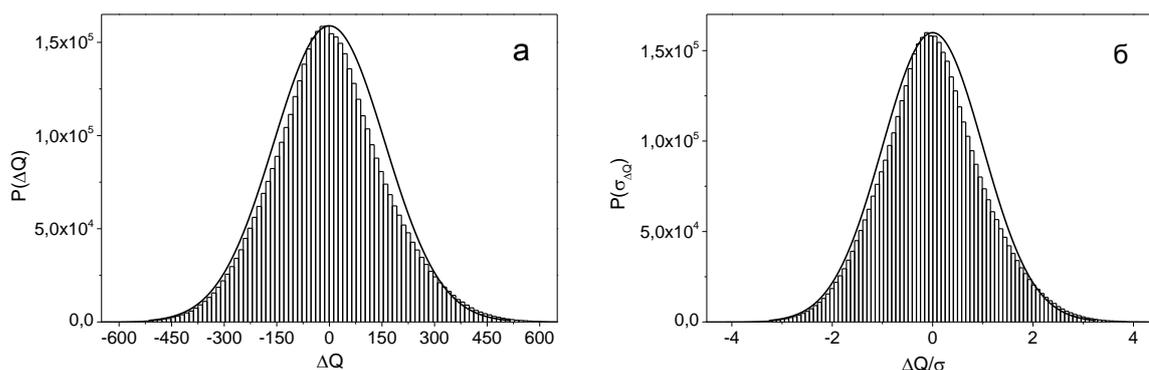


Рис.11. Плотность распределения быстрых отклонений энергии импульсов на средней мощности 2 МВт и расходе натрия через активную зону 90 м³/час: а - по мощности (ΔQ , кВт), б - в долях стандартного отклонения. Линией показан результат аппроксимации по гауссу.

Таблица.5. Значения параметров плотности распределения быстрых колебаний энергии импульсов на мощности 2 МВт расходе натрия через активную зону 90 м³/час

| Название параметра | Распределение по мощности ΔQ (кВт) | Распределение по относительному отклонению энергии импульсов $\Delta Q/\sigma$ |
|---|--|--|
| Среднее значение | 0 | |
| Стандартное отклонение | 158 | 1 |
| Максимальное отклонение в большую сторону | 814 (40%) | 5.1 |
| Максимальное отклонение в меньшую сторону | -776 (39) | -4.9 |
| Коэффициент асимметрии | 0.14 | |
| Эксцесс | 0.23 | |

Характерно, что асимметрия распределения быстрых колебаний мощности (см. рис.11) значительно меньше асимметрии в распределении импульсов по энергии. В пределах погрешности измерений и обработки данных можно считать, что максимальные быстрые отклонения мощности в сторону ее уменьшения и увеличения в среднем равны между собой и составляют ± 800 кВт. Это говорит о том, что в отдельных редких случаях энергия импульса может скачком меняться практически от минимального до

максимального значения. Для быстрых отклонений до 170 кВт преобладают отклонения в сторону меньших значений мощности. Асимметрия в распределении импульсов по энергии обусловлена нелинейным характером быстрой мощностной обратной связи. Последняя в ИБР-2М такова, что при одном и том же быстром возмущении реактивности изменение мощности в сторону уменьшения будет меньше, чем в сторону увеличения. Установление физических причин быстрой мощностной обратной связи есть чрезвычайно сложная задача, которая требует отдельного изучения и здесь не рассматривается. Отметим только, что все многообразие быстрых эффектов обратной связи вызвано температурными изменениями в активной зоне при изменении мощности.

Спектральный состав колебаний энергии импульсов показан на рис.12, где приведена усредненная за цикл спектральная плотность колебаний энергии импульсов. Из рис.12 видно, что в спектре колебаний энергии импульсов имеются два больших пика на частотах 0,82 и 1,78 Гц и три пика меньшей интенсивности в диапазоне частот 0,92 - 1,63 Гц. Как показал взаимный спектральный анализ, указанные пики есть детерминированные (гармонического типа) колебания мощности, обусловленные осевыми вибрациями лопастей подвижных отражателей [72, 73]. Частотный состав детерминированных колебаний энергии импульсов представлен в таблице 6. Отметим, что указанные частоты есть частоты реальных колебаний, “замаскированных” в спектре колебаний мощности в частотном диапазоне ниже критической частоты Найквиста равной для ИБР-2М 2.5 Гц.

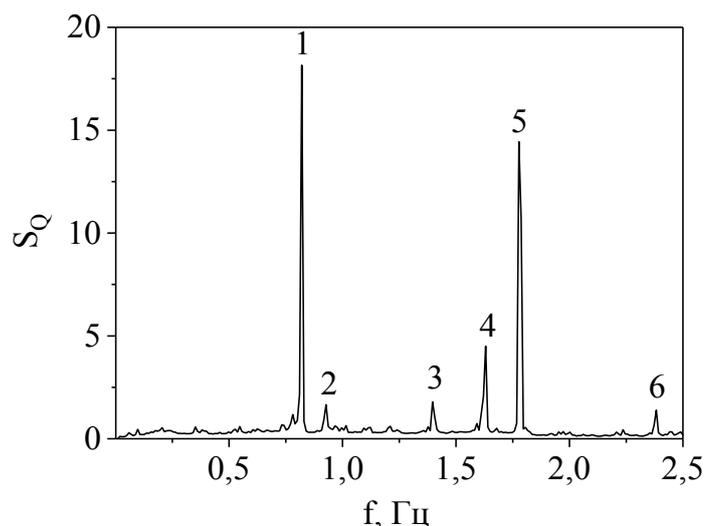


Рис.12. Усредненная за цикл спектральная плотность колебаний энергии импульсов ИБР-2М (S_Q) при мощности 2 МВт, f -частота. Цифрами отмечены пики на частотах: 1- 0,82, 2- 0,93, 3- 1,40, 4- 1,63, 5- 1,78 и 6-2,38 Гц.

Таблица.6. Сравнительная интенсивность колебаний энергии импульсов на основных детерминированных частотах

| № | Частота f , Гц | Значение S_Q | Источник возмущений |
|---|------------------|----------------|--|
| 1 | 0,82 | 18,19 | осевые колебания подвижных отражателей |
| 2 | 0,93 | 1,74 | |
| 3 | 1,40 | 1,84 | |
| 4 | 1,63 | 4,55 | |
| 5 | 1,78 | 14,5 | |
| 6 | 2,38 | 1,43 | |

Изменение спектральной плотности колебаний энергии импульсов ИБР-2М за цикл от момента выхода на мощность 2 МВт приведено на рис.13. В процессе работы реактора, как видно из рис.13, спектральная плотность колебаний энергии импульсов слабо меняется во времени, что в целом говорит о достаточно стабильной работе реактора и модулятора реактивности. Изменение величины относительной парциальной дисперсии колебаний энергии импульсов, обусловленных вибрациями лопастей подвижных отражателей за полный 11-дневный реакторный цикл, представлено на рис.14. Там же приведено изменение величины среднеквадратических отклонений флуктуаций энергии импульсов.

Переходная область роста колебаний, наблюдаемая в спектрах на всех основных частотах после выхода реактора на мощность (см. рис.13 и 14), связана с прогревом лопастей подвижных отражателей. Усиление колебаний мощности в начале цикла на наиболее интенсивной частоте 0.82 Гц, как показал анализ, вызвано ростом осевых (по направлению к активной зоне) колебаний лопасти дополнительного подвижного отражателя. Через 10 часов работы реактора на мощности уровень детерминированных колебаний стабилизируется и далее их интенсивность слабо меняются во времени.

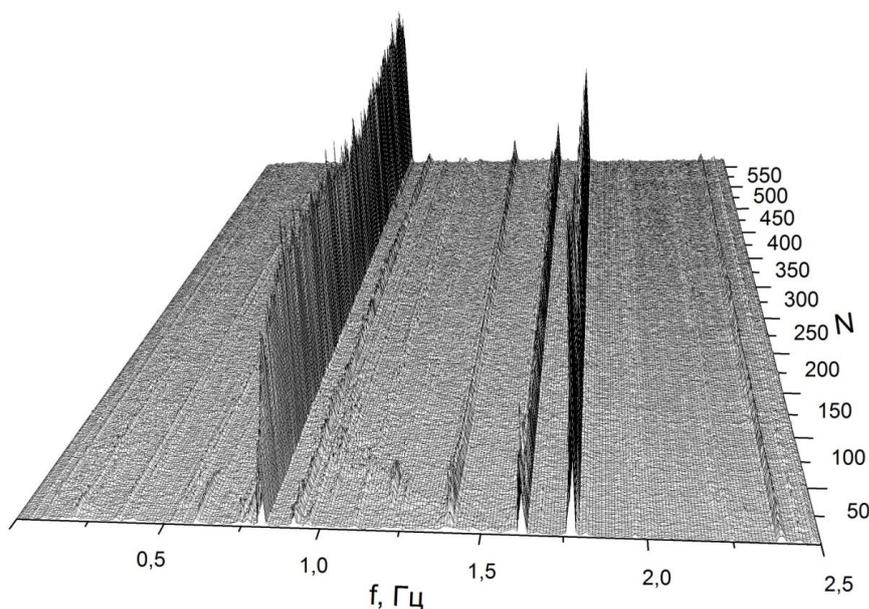


Рис.13. Изменение спектральной плотности колебаний энергии импульсов ИБР-2М за цикл длительностью 11 дней. Представлены 565 спектров.

Две основные частоты колебаний, возбуждаемые в мощности со стороны модулятора реактивности 0.82 и 1.78 Гц, дают в среднем по 20% от полной дисперсии шумов. Суммарная дисперсия колебаний мощности на шести детерминированных частотах (см. таблицу 6) составляет 50% от полной дисперсии. Таким образом, основной вклад, 50% в дисперсию шумов мощности, вносят неконтролируемые вибрации подвижных отражателей, и этот вклад в среднем сохраняется в течение всего реакторного цикла.

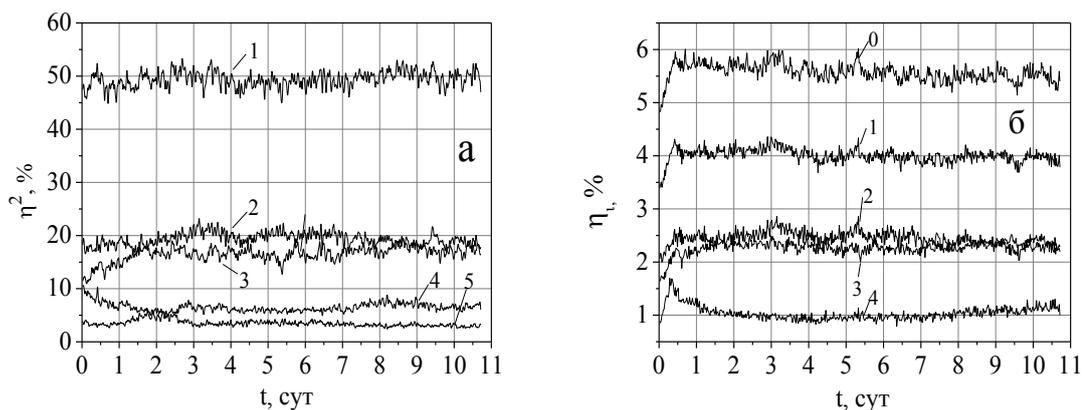


Рис.14. Изменение величины относительной парциальной дисперсии (а) и относительного среднеквадратического отклонения (б) колебаний энергии импульсов на основных частотах: 0 – полные колебания; 1- на частотах, связанных с вибрациями лопастей подвижных отражателей; 2-0.82; 3- 1.78; 4-1.40; 5-1.63 Гц.

2.5. Исследование динамики шумов энергий импульсов реактора ИБР-2М в процессе выгорания топлива

В процессе эксплуатации ИБР-2М меняются статистические свойства случайных колебаний реакторных параметров, влияющих на реактивность, таких, например, как температуры и расхода натрия на входе в активную зону, вибраций подвижных отражателей (ПО) и т.д. Параллельно этим изменениям при работе реактора, а следовательно, выгорании топлива в активной зоне реактора происходят различные процессы деградиационного типа, изменяющие динамические свойства реактора. Все это в целом приводит к изменению случайных колебаний энергии импульсов. Исследование реакторных шумов в зависимости от времени работы реактора, т.е. энерговыработки и соответственно выгорания топлива, представляется одним из важных элементов в обосновании безопасной и надежной его работы. Кроме оценки текущего шумового состояния реактора динамика шумов позволяет прогнозировать аномальные (нетипичные) состояния и источники их появления. Теоретически описать шумовые свойства реактора ввиду сложности процессов, происходящих в активной зоне и ее ближайшем окружении, невозможно. Надежную информацию по шумам ИБР-2М для

целей их практического использования можно получить только экспериментальным путем. В работе приводятся результаты измерения колебаний энергии импульсов за значительный период работы реактора, начиная с момента ввода ИБР-2М в эксплуатацию в 2011 и до конца 2016 г. вплоть до энерговыработки ~ 1100 МВт·сут.

При штатной работе ИБР-2М средняя мощность реактора поддерживается на постоянном (в среднем) уровне с помощью системы автоматического регулирования (АР). Система АР компенсирует медленные изменения мощности, с частотой менее 0.3 Гц. На более высокие частоты система АР практически не реагирует. В тоже время при нормальной работе реактора основной вклад в случайные колебания мощности вносит именно высокочастотная группа шумов. При этом медленные колебания мощности, компенсируемые системой АР, частично остаются в спектре колебаний энергии импульсов и могут служить показателем колебательной неустойчивости реактора. Это связано с тем, что колебательная неустойчивость ИБР-2М, если она может реализоваться, возникает, судя по работе ИБР-2, на частотах менее 0.3 Гц, т.е в области работы системы АР. ИБР-2М работает при мощности 2 МВт в циклическом режиме: 10-18 сут. работы на мощности с последующей остановкой на 10-14 сут.

Данные об энергии импульсов ИБР-2М регистрировались с помощью штатных детекторов нейтронов, расположенных вокруг активной зоны (ионизационных камер в токовом режиме). Накопление данных осуществлялось с помощью системы измерения реакторных параметров. Измерения проводились с частотой повторения импульсов равной 5 с^{-1} с меткой астрономического времени. Исходный временной ряд представлял собой массив последовательных значений энергии импульсов (Q), регистрируемый в течение каждого реакторного цикла, начиная с конца 2011 г и до конца 2016 г. Всего было исследовано 44 реакторных цикла. Длина временного ряда для одного цикла составляла до $\sim 6 \cdot 10^6$ значений энергии

импульсов. По измеренным временным рядам проводилась статистическая обработка с вычислением относительного среднеквадратического отклонения (σ_Q/\bar{Q}), размаха ($\Delta_{Q_{\max}}/\bar{Q}$) и спектральной плотности (S_Q) энергии импульсов [72]. Здесь \bar{Q} – среднее значения энергий импульсов. Также оценивались среднеквадратические парциальные колебания мощности, связанные с тем или иным частотным диапазоном. Оценки уровня парциальных колебаний полезны тем, что показывают, какие были бы полные колебания мощности, если бы все другие колебания отсутствовали. Здесь нужно отметить следующее. Система защиты реактора ориентирована на контроль за амплитудой импульсов, т.е. анализирует полные колебания мощности. Различные парциальные составляющие полного спектра колебаний и их тренд в процессе работы реактора система защиты не учитывает. Поэтому изучение парциальных составляющих полных шумов позволяет оценить доминирующее влияние отдельных процессов на безопасность реактора и дает возможность выполнить коррекцию опасных изменений. Режим работы реактора на мощности и изменение энерговыработки за исследуемый период эксплуатации ИБР-2М приведен на рис. 15 и в табл.17.

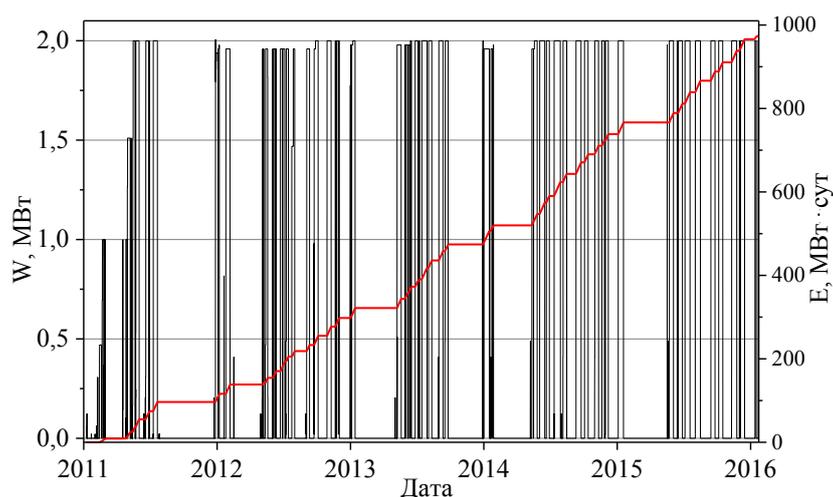


Рис. 15. Уровень средней мощности (W) и энерговыработки (E) в процессе работы ИБР-2М

Таблица. 7. Энерговыворотка ИБР-2М

| Год | Число циклов в году | Энерговыворотка за текущий год, МВт·сут. | Полная энерговыворотка, МВт·сут. |
|------|---------------------|--|----------------------------------|
| 2011 | 2 | 96,6 | 96,6 |
| 2012 | 7 | 122 | 218,6 |
| 2013 | 12 | 217,1 | 435,7 |
| 2014 | 9 | 208 | 643,7 |
| 2015 | 9 | 168 | 811,7 |
| 2016 | 5 | 164,5 | 976,2 |

Краткое описание работы автоматического регулятора мощности.

Автоматический регулятор мощности реактора ИБР-2М (АРМ) предназначен для относительного отклонения фактической нейтронной мощности реактора от заданной (разбаланс мощности) и формирования выходных управляющих сигналов для привода рабочего органа автоматического регулятора (РО АР), осуществляет контроль положения РО АР и формирует сигнал на сигнализацию при выходе РО АР за установленные пределы перемещения в автоматическом режиме работы. АРМ работает в диапазоне от 1 до 100% $W_{ном}$.

Режим стабилизаций мощности. АРМ выполняет расчет разбаланса U исходя из значений импульсной мощности $W_{им}$ и заданной мощности $W_з$, получаемых от трех каналов АКНП (аппаратура контроля нейтронного потока), и формирует сигналы управления перемещением РО АР (скорость F , направление перемещения).

Текущее значение средней мощности $W_{ср}$, % определяется по формуле

$$(W_{ср})_n = (W_{ср})_{n-1} + \frac{(сW_{им}_n - (W_{ср})_{n-1})}{K}$$

где $(W_{ср})_n$, $(W_{ср})_{n-1}$ - усредненное по выбранным каналам АКНП значение мощности после импульса мощности с номером n и $n-1$ соответственно, %; $сW_{им}_n$ - усредненное по выбранным каналам импульсная мощность, %; K - выбранный оператором коэффициент временного усреднения. Для

уменьшения шумов энергий импульсов реактора ИБР-2М можно менять величину коэффициента К от 1 до 32.

Текущее значение разбаланса U, % вычисляется по формуле:

$$U = \frac{((W_{cp})_n - W_3)}{W_3} \cdot 100\%$$

где W_3 - усредненное по выбранным каналам АКНП заданное значение мощности, %.

Частота F сигнала управления двигателем РО АР пропорциональна абсолютному значению разбаланса U и вычисляется с учетом настроек авторегулятора (зоны нечувствительности U_{min} , максимального разбаланса U_{max} , чувствительности U_s) по формуле

$$F = \frac{F_{max}}{U_s} \cdot |U|$$

где U - текущее значение разбаланса (%), U_s - значение разбаланса, при достижении которого выходной управляющий сигнал F_{out} имеет максимальное значение (%), F_{max} – максимальное значение формируемой частоты (170 Гц). Окончательно сигнал управления F_{out} формируется из условия следующие, частотный диапазон от 0 до 170 Гц.

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{out}=0 \text{ при } |U|<U_{min} \\ F_{out}=0 \text{ при } F<1 \\ F_{out}=F_{max} \text{ при } F>F_{max} \\ F_{out}=F_{max} \text{ при } |U|\geq U_s \\ F_{max}=170 \end{array} \right.$$

где U_{min} – значение разбаланса, менее которого (по абсолютной величине) выходной управляющий сигнал F_{out} равен 0.

2.5.1. Режим стационарной мощности

На рис.16 показано изменение спектральной плотности колебаний энергии импульсов в начале (2011 г), середине (2013 г.) и конце (2016 г)

указанного выше периода работы реактора. На рис.17 приведена характерная форма спектральной плотности колебаний, усредненной по всем циклам в 2014 и в 2016 г. Как видно из рис. 16 и 17, в спектре колебаний энергии импульсов имеются несколько пиков большой интенсивности, особенно на частотах 0,82 и 1,77 Гц. Эти, как и другие пики меньшей амплитуды, обусловлены осевыми вибрациями лопастей подвижных отражателей (ПО) [73, 74]. Поэтому область частот, заштрихованная на рис.3 в диапазоне 0,78-0,85 и 1,36-1,80 Гц, позволяла оценить мощность колебаний импульсов, обусловленных вибрациями ПО. Колебания в области низких частот $\sim 0-0,26$ Гц малы и при нормальной работе реактора вызваны работой АР [75]. С появлением неустойчивости мощность низкочастотных колебаний усиливается, соответственно растет и реакция АР.

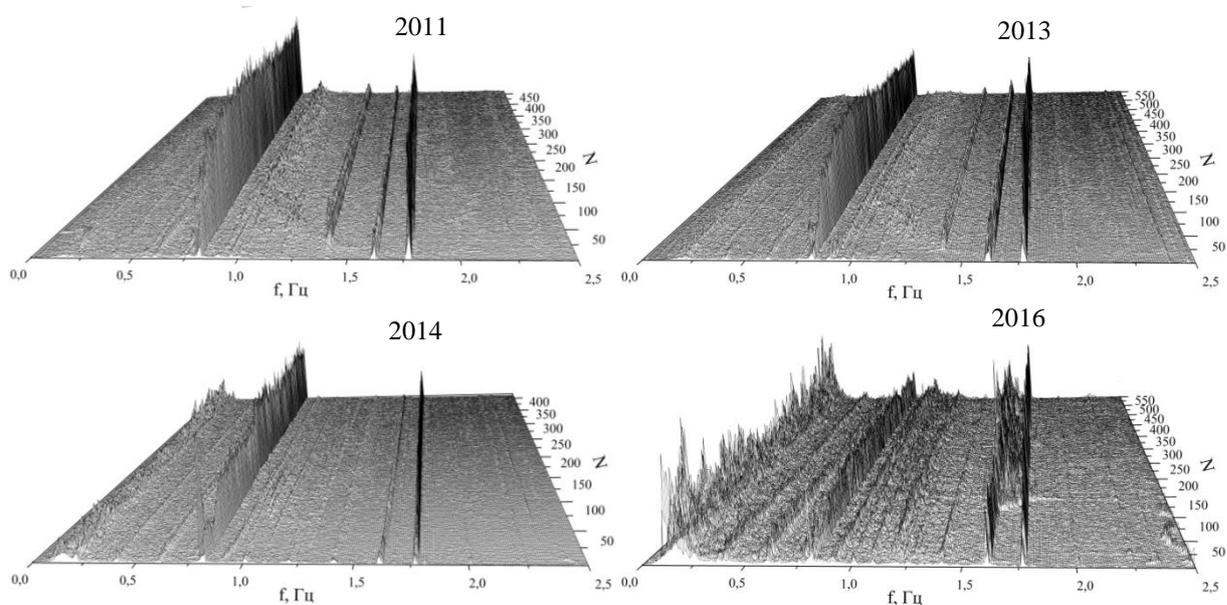


Рис.16. Характерное изменение спектральной плотности колебаний энергии импульсов ИБР-2М в отдельных циклах по годам при мощности 2 МВт

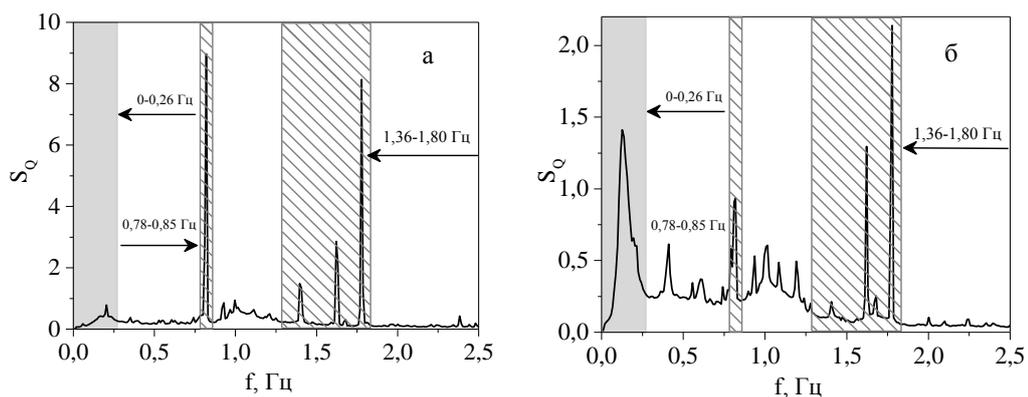


Рис.17. Спектральная плотность колебаний энергии импульсов ИБР-2М (S_0) при мощности 2 МВт в разные периоды работы реактора: 2014 г. (а), 2016 г. (б); f -частота. Заштрихованная область связана с вибрациями подвижных отражателей, область, обозначенная серым цветом в диапазоне 0-0,26 Гц, - с работой автоматического регулятора.

Параллельно данным, представленным на рис.16 и 17, исследовались шумы на коротких интервалах времени работы ИБР-2М (30 минут), регистрируемые в конце каждого реакторного цикла. В этом случае все медленные эффекты реактивности, обусловленные прогревом в окружении активной зоны и биологической защиты, стабилизируются, переходные процессы завершаются, и шумы мощности становятся асимптотически стабильными. Изменение величины среднеквадратических колебаний энергии импульсов и колебаний, связанных с вибрациями лопастей подвижных отражателей и работой АР в процессе работы ИБР-2М, приведено на рис.18. На рис. 19 показано изменение величин относительного среднеквадратического отклонения и размаха колебаний мощности, а также значение одного из параметров системы АР в процессе работы реактора.

Из рис.16 наглядно видно, что характер шумов в процессе работы ИБР-2М существенно меняется. Постепенно “чистая” форма спектральной плотности колебаний энергий импульсов, в которой преобладают колебания гармонического типа, вызванные вибрациями ПО, превращается в размытую низкочастотными шумами ”рыхлую” форму. Динамика этого процесса наглядно проявляется на графиках изменения уровней полных и

парциальных колебаний мощности. Из рис.18 и 19 видно, что полные колебания мощности ИБР-2М к концу 2014 г (650 МВт·сут) уменьшаются при среднеквадратических отклонениях с ~ 5.0 до 3.5% и при размахе колебаний - с ~ 42 до 30%. Уменьшение колебаний мощности происходит за счет уменьшения колебаний, связанных с вибрациями ПО. В то же время низкочастотные колебания (0-0,26 Гц) постепенно растут, что сказалось на усилении полных колебаний мощности (заштрихованная область на рис.17).

Для сравнения колебаний мощности ИБР-2 и ИБР-2М на рис.20 показано изменение величины полных и низкочастотных колебаний в зависимости от энерговыработки. Из рис.18 и 19 видно, что полные колебания мощности ИБР-2М к концу 2014 г (600 МВт·сут) уменьшаются для среднеквадратических отклонений с ~ 5.0 до 3.5% и для размаха колебаний - с ~ 42 до 30% за счет колебаний, связанных с вибрациями ПО. В то же время низкочастотные колебания (0-0,26 Гц) постепенно растут. Рост низкочастотных колебаний при достижении энерговыработки 800 МВт·сут сказался на усилении полных колебаний мощности (заштрихованная область на рис.18). Здесь нужно отметить следующее. Система защиты реактора ориентирована на контроль за амплитудой импульсов, т.е. анализирует полные колебания мощности. Различные парциальные составляющие полного спектра колебаний и их тренд в процессе работы реактора система защиты не учитывает. Поэтому изучение парциальных составляющих полных шумов мощности позволяет оценить доминирующее действие отдельных процессов в реакторе на его безопасность и возможность коррекции этого действия. Для сравнения шумовое состояние ИБР-2М был использован данные об относительных среднеквадратических отклонения мощности реактора ИБР-2 на мощности 2 МВт, который работал в период с 1981 по 2016 гг. На рис. 21 показано сравнение полные и низкий частотный колебаний мощности ИБР-2 и ИБР-2М. Видно, что полные и низкий

частотный колебаний мощности реакторов, начиная с энерговыработки ~700 МВт·сут, имеют тенденцию к возрастанию.

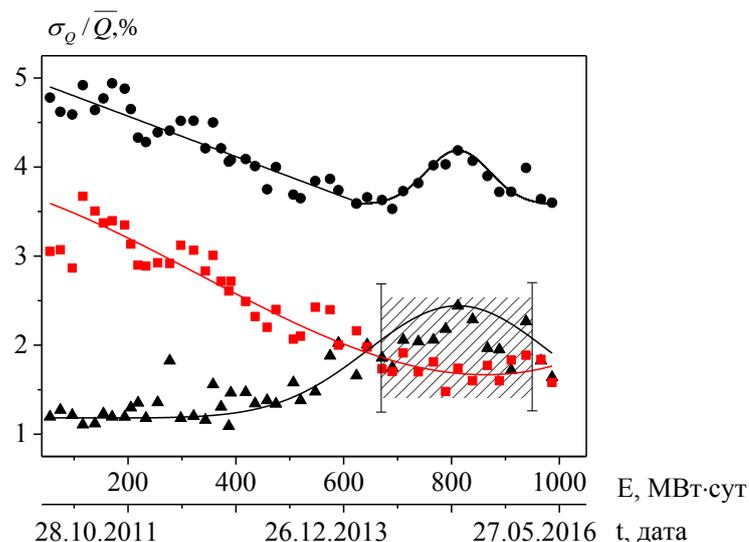


Рис.18. Изменение величины относительного среднеквадратического отклонения колебаний энергии импульсов в процессе работы реактора ИБР-2М. Ось абсцисс – дата (вверху) и энерговыработка (E), ● – полные колебания, ▲ – низкочастотные шумы (0 – 0,26 Гц), ■ – шумы со стороны ПО (0,78 - 0,85)+(1,36 – 1,80) Гц

Для ИБР-2 полные колебания резко возрастают до 7 % и при энерговыработке 800 МВт·сут стабилизируются. Для ИБР-2М изменение шумов в этой области энерговыработки близко к ИБР-2, но уровень шумов существенно меньше, почти в 2 раза (3.6%). Полные колебания энергии импульсов ИБР-2М как и в ИБР-2 растут до энерговыработки 800 МВт·сут.

Полные колебаний энергий импульсов реактора ИБР-2М в то же время начинается возрастать и с помощью изменение коэффициента К ее стабилизировал в диапазоне колебаний 3,5 - 4 %. В то же время было изменение величину коэффициента К автоматического регулятора от 32 на 16 и 8 для уменьшения шумов энергий импульсов реактора ИБР-2М (см. рис. 19). В результате изменение коэффициента К полные колебаний и размах мощности ИБР-2М уменьшились на ~0,7 и ~8 %. За весь период работы реактора полные относительные стандартные отклонение колебаний

мощности не превышают 5 %, из которых ~1,6 % связаны с работы АР и ~2,5 % обусловлены осевыми вибрациями лопастей ПО, энерговыработка равен ~1100МВт·сут.

За анализируемый период работы реактора (2011-2016 гг.) спектральная плотность колебаний энергий импульсов существенно менялась.

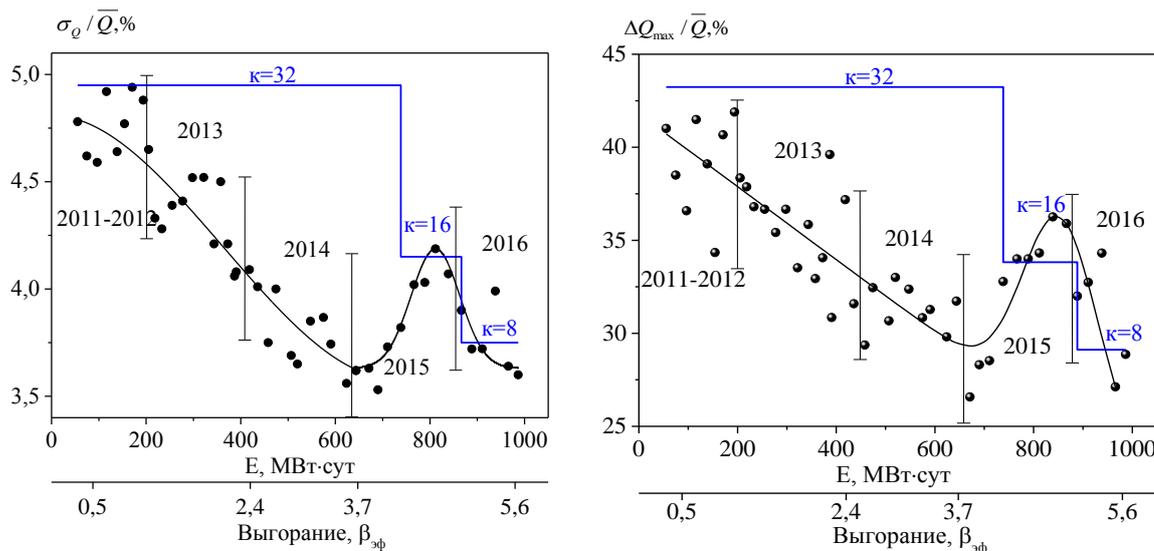


Рис.19. Изменение величины относительного среднеквадратического отклонения (слева) и размаха колебаний (справа) энергии импульсов, измеренные в конце реакторных циклов. Ось абсцисс – энерговыработка (E) и среднее по активной зоне выгорание топлива, K –значение коэффициента усреднения импульсов в системе автоматического регулирования мощности (АР)

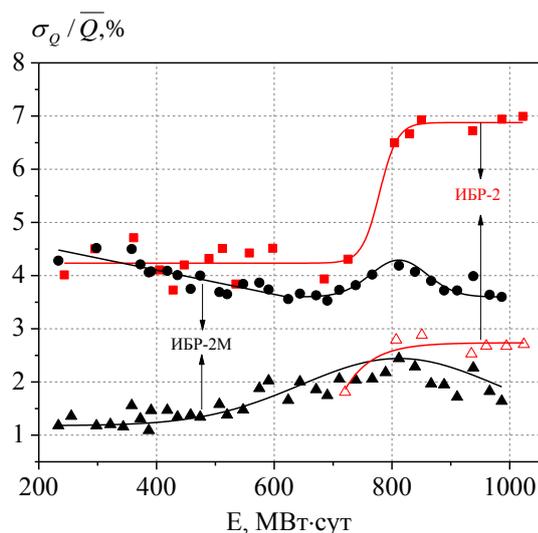


Рис.20. Полные и низкочастотные относительные среднеквадратические отклонения мощности в период работы ИБР-2 с 1983 по 1989г. и ИБР-2М с 2012 по 2016 г.; ● – полные колебаний, ▲ – 0 – 0,26 Гц ИБР-2М, ■ – полные колебаний, △ – 0 – 0,26 Гц ИБР-2

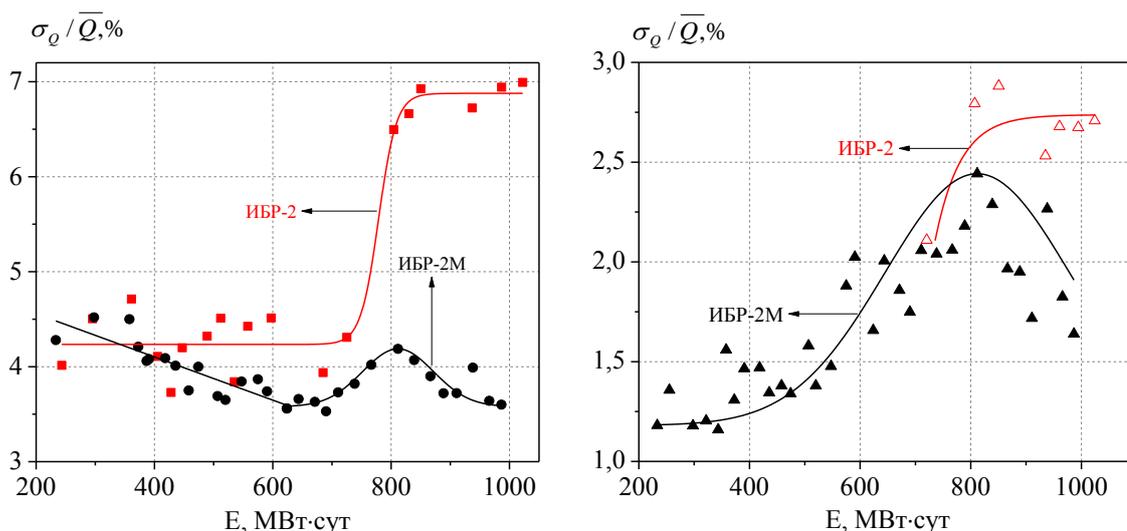


Рис.21. Полные и низкочастотные относительные среднеквадратические отклонения мощности в период работы ИБР-2 с 1983 по 1989г. и ИБР-2М с 2012 по 2016 г.: полные (●) и низкочастотные (0 – 0,26 Гц) (▲) колебания ИБР-2М и ИБР-2 (■, △) соответственно

Спад низкочастотных и соответственно полных шумов мощности, наблюдаемый на рис.5 и 6 при энерговыработке выше 800 МВт·сут, был достигнут за счет изменения параметров системы АР. Поскольку, как уже было сказано выше, низкочастотные шумы находятся в области пропускания амплитудно-частотной характеристики АР, то на них (шумы) можно

воздействовать путем изменения полосы пропускания. Исследования показали, что система АР является статистически оптимальным фильтром для реальных скачков и шумов реактивности с различными типами распределений, имеющими место при нормальной работе ИБР-2М [76]. Там же было показано, что можно выбрать совокупность значений оптимальных для данного шума параметров АР с тем, чтобы минимизировать уровень шумов.

2.5.2. Шумовое состояние реактора при подъеме и снижении мощности.

Исследование шумов энергии импульсов в динамическом (переходном) состоянии реактора важно по следующим причинам. Во-первых, что самое главное, такие измерения позволяют найти область мощности, в которой проявляется колебательная неустойчивость реактора, если такая неустойчивость имеет место. По всем модельным представлениям динамики реактора колебательная неустойчивость ИБР-2М может проявляться в области низких частот, находящейся в полосе пропускания системы АР (период колебаний 8-40 с). Поэтому возрастание низкочастотной компоненты в спектральной плотности колебаний мощности может служить неким “индикатором” неустойчивости реактора. Во-вторых, изменение шумов в процессе изменения мощности позволяет оценить источники динамических возмущений реактивности, проявляющихся в процессе изменения температуры активной зоны. На рис.22 для примера приведены спектры колебаний энергии импульсов в процессе подъема мощности в разные периоды работы ИБР-2М, а на рис.23 для сравнения – непрерывное изменение спектра колебаний при подъеме мощности в цикле со сбросом мощности и без сброса. Из рисунков видно, что в процессе работы реактора его шумовое состояние в переходных процессах изменения мощности усложняется, особенно при мощности выше 1500 кВт.

Более детально изменение шумов при изменении средней мощности реактора проявляется в следующем. Во-первых, с ростом мощности растет амплитуда основного пика на частоте 0,82 Гц. Доминирующее влияние колебаний энергии импульсов на частоте 0.82 Гц с ростом мощности сохраняется вплоть до мощности 1500 МВт. Колебания энергии импульсов на этой частоте вызваны осевыми колебаниями лопастей подвижных отражателей. Во-вторых, при дальнейшем повышении мощности выше 1500 кВт появляются другие пики на частотах ~0,1, 1,40, 1,63 и 1,77 Гц. Здесь нужно отметить, что реальные частоты колебаний ПО гораздо выше, но все они проявляются в спектре колебаний мощности в замаскированном виде в диапазоне частот, ограниченной критической частотой Найквиста равной в данном случае 2.5 Гц.

В третьих, как видно из рис.22, общая картина спектра колебаний энергии импульсов существенно усложняется в процессе работы реактора. При этом, динамика шумов при подъеме мощности до номинальной 2 МВт до и после сброса мощности практически не меняется. Слабо меняется и динамика парциальных компонентов шумов мощности при штатном подъеме и снижении мощности (см. рис.24).

В целом, шумовое состояние реактора ИБР-2М и динамика его изменения в основном зависят только от времени работы реактора на мощности, а, значит, зависят от энерговыделения и соответственно выгорания топлива.

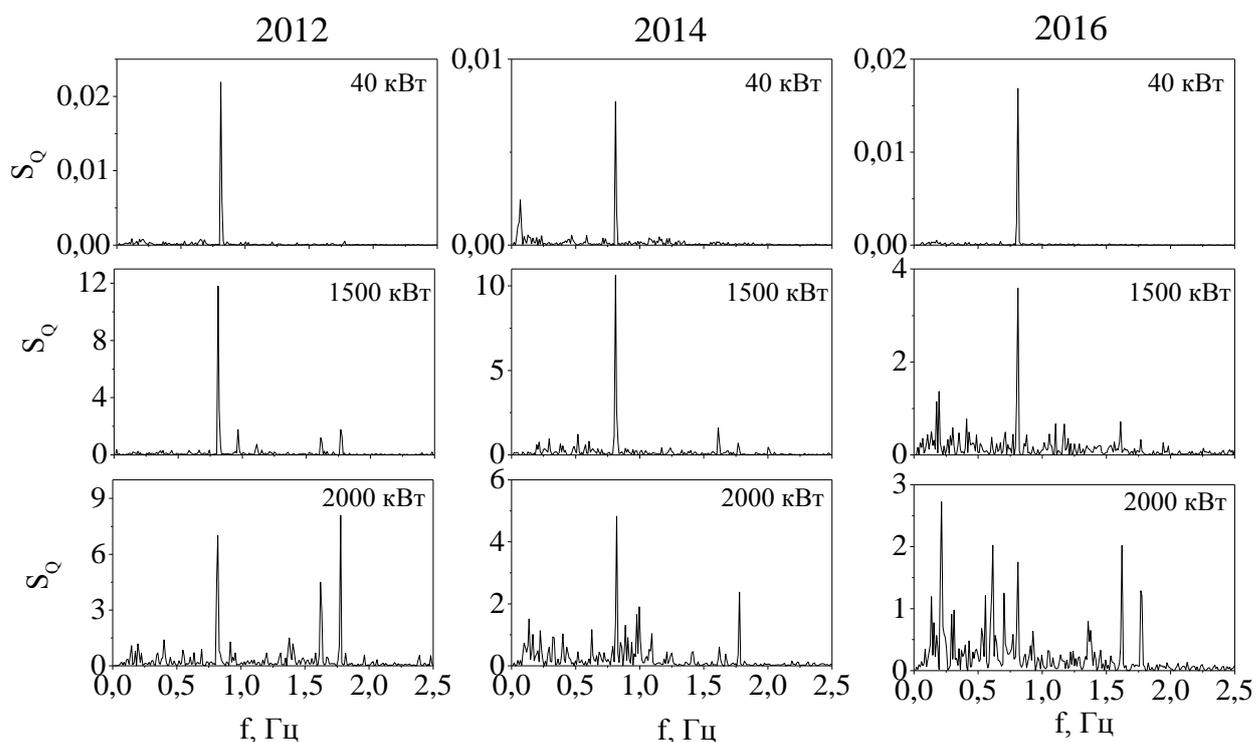


Рис.22. Изменение спектральной плотности флуктуаций энергии импульсов ИБР-2М в переходных процессах подъема мощности до номинальной равной 2 МВт (S_Q) при некоторых промежуточных уровнях мощности в различные периоды работы реактора. f -частота в Гц

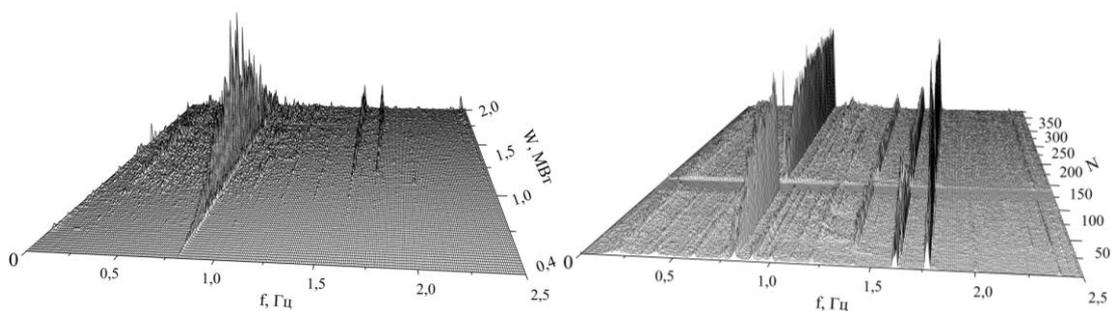


Рис.23. Изменение спектральной плотности колебаний энергии импульсов при подъеме мощности до номинальной 2 МВт (слева) и в цикле со сбросом мощности ИБР-2М (справа)

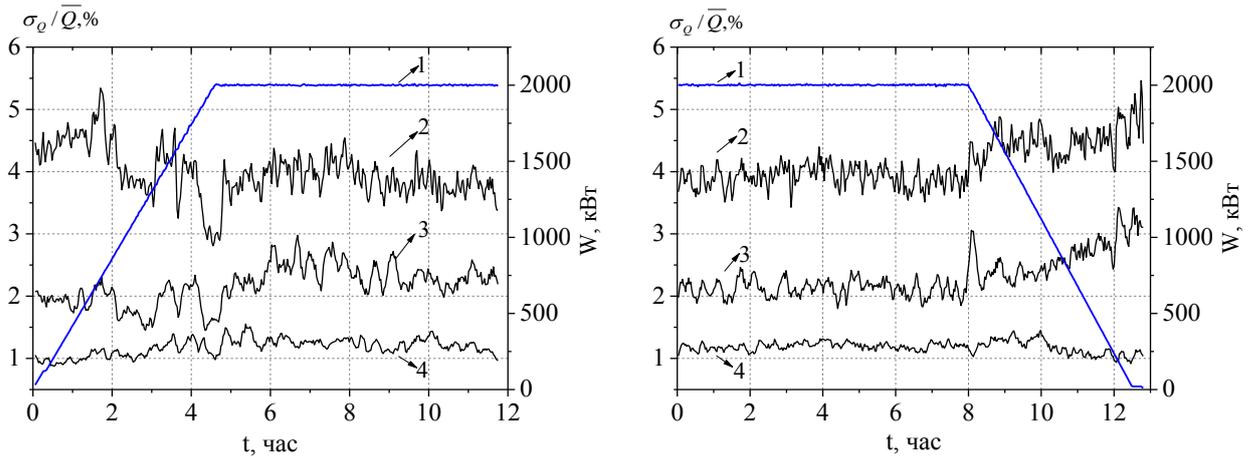


Рис.24. Изменение величины относительного среднеквадратического отклонения колебаний энергии импульсов при подъеме (слева) и снижении мощности ИБР-2М (справа): 1–мощность, 2 – полные колебания, 3 – низкочастотные шумы (0-0,26 Гц) , 4 – шумы, обусловленные вибрациями ПО (0,78 – 0,85+1,36 – 1,80 Гц)

2.6. Исследование влияния шумов натриевой системы охлаждения активной зоны реактора на колебания реактивности

На ИБР-2М в качестве теплоносителя в системе охлаждения активной зоны используется жидкий натрий с температурой около 300 °С. Система охлаждения трехконтурная двухпетлевая. В петлях первого и второго контуров протекает жидкий натрий. Натрий в петлях А и Б первого и второго контуров прокачивается с помощью электромагнитных насосов. Натрий первого контура непосредственно протекает в корпусе реактора и снимает тепло с твэлов. Натрий второго контура через промежуточные теплообменники А и Б охлаждает натрий первого контура и передает тепло атмосферному воздуху в воздушных теплообменниках. Изменение теплодинамического состояния первого контура приводит к соответствующему изменению температуры и расширению топлива, теплоносителя, опорной плиты, на которой установлены топливные кассеты, изгибу топливных кассет, деформации корпуса модулятора реактивности и т.д. В результате всех вышеуказанных процессов изменяется критическое состояние реактора, соответственно изменяется мощность, что вызывает

ответную реакцию автоматической системы регулирования (АР). В среднем с помощью системы АР нейтронная мощность поддерживается на постоянном уровне и все медленные колебания реактивности компенсируются этой системой путем перемещения органов регулирования относительно активной зоны.

Исследовались случайные колебания основных термодинамических параметров первого контура системы охлаждения АЗ, которые непосредственно вызывают шумы реактивности. Здесь нужно отметить следующее: реактивность реактора на мощности, измеряемая относительно равновесной импульсной надкритичности по мгновенным нейтронам, в среднем нулевая. Медленные колебания реактивности могут быть оценены только по известным (измеренным ранее) температурному и расходному коэффициентам реактивности и по положению органов регулирования относительно активной зоны. Изменялись следующие параметры:

- температура натрия на входе ($T_{\text{вх}}$) и выходе ($T_{\text{вых}}$) из АЗ,
- расход натрия в петлях А (G_A) и Б (G_B) первого контура с суммарным расходом $G_{\Sigma} = G_A + G_B$.
- Уровень натрия над активной зоной (h) и давление аргона в газовой полости, демпфирующего этот уровень ($P_{\text{Ар}}$).
- Положение всех органов регулирования: компенсирующих блоков КО1 и КО2, ручного регулятора РР и блока автоматического регулятора АР.

Период опроса данных для всех параметров составлял 0.1 с. Примерные точки измерения параметров первого контура системы охлаждения АЗ приведены на рис.25. На рис. 26 показано изменение некоторых параметров первого контура в течение одного из типичных реакторных циклов длительностью 11 суток.

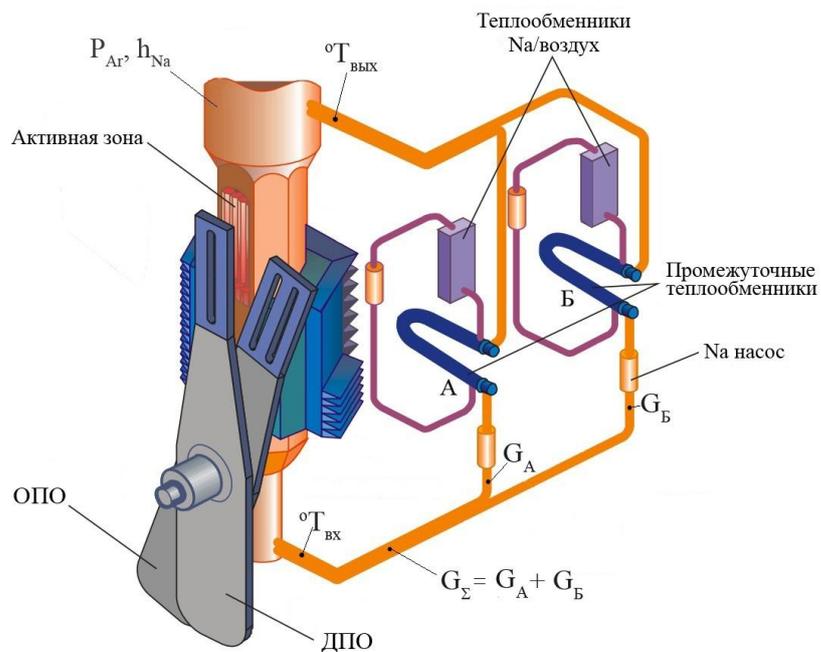


Рис.25. Принципиальная схема системы охлаждения реактора ИБР-2М. Показаны примерные места расположения измерительных датчиков: давления аргона (P_{Ar}), уровня натрия (h_{Na}), расхода натрия (G_{Σ}) через АЗ, расхода натрия первого контура в петлях А (G_A) и Б (G_B), температуры натрия на выходе ($^{\circ}T_{ВЫХ}$) и входе в АЗ ($^{\circ}T_{ВХ}$).

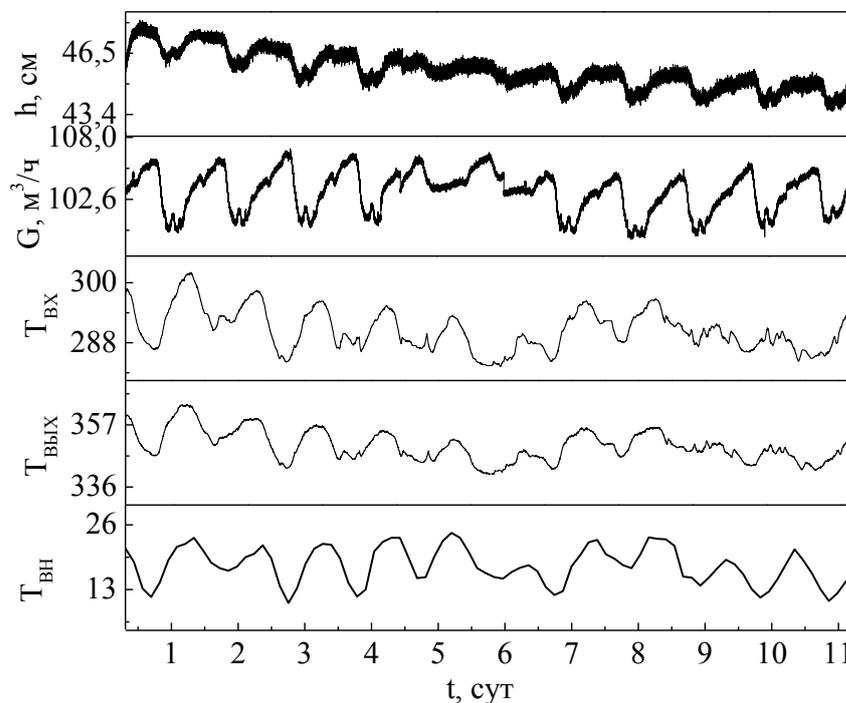


Рис.26. Типичное изменение некоторых параметров первого контура натриевой системы охлаждения активной зоны ИБР-2М за реакторный цикл: уровень натрия (h) в газовой полости над АЗ, расход (G и температура натрия на входе ($T_{ВХ}$) и выходе ($T_{ВЫХ}$) из АЗ; $T_{ВН}$ –

температура на выходе открытого третьего контура (температура воздуха вне здания реактора).

Как следует из рис.26, параметры первого контура претерпевают медленные (в основном, суточные) изменения. Эти изменения можно представить в виде суммы колебательной составляющей и некоторого линейного тренда. Для динамики тепловых процессов, происходящих в активной зоне, состояние первого контура при таких медленных изменениях его параметров можно считать квазистационарным (тепловая инерционность, например, топливного элемента составляет ~ 10 с, а время перемещения натрия через активную зону ~ 1 с). При условии стационарности переноса тепла из первого контура во второй и третий в системе охлаждения активной зоны устанавливается тепловой баланс

$$W = GC_p(T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}})\gamma + W_{\text{пот}}, \quad (6)$$

где W - средняя тепловая мощность активной зоны; G , C_p - расход и теплоемкость натрия соответственно; $T_{\text{вх}}$, $T_{\text{вых}}$ - температура натрия на входе и выходе из реактора, γ - плотность натрия, $W_{\text{пот}}$ - мощность тепловых потерь в корпусе реактора. Поскольку третий контур системы охлаждения АЗ ИБР-2М открыт на суточные изменения температуры атмосферного воздуха, стационарность теплового баланса можно принять только для процессов более быстрых, чем атмосферные колебания температуры. Если абстрагироваться от того, каким образом атмосферные колебания температуры влияют на мощность, то, колебания параметров первого контура, как и колебания тепловой мощности реактора можно рассматривать относительно их средних за цикл значений. Тогда для колебаний тепловой мощности $\Delta W(t)$ можно записать

$$\Delta W(t) = C_p \gamma \cdot [\Delta T^\circ(t) \cdot \Delta G(t) + G(t) \cdot \Delta[(\Delta T^\circ)(t)]], \quad (7)$$

где, $\Delta T^\circ(t) = (T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}})$ - подогрев натрия в активной зоне; $\Delta(\Delta T^\circ)$, ΔG – отклонение от среднего за цикл подогрева и расхода натрия соответственно.

Изменение коэффициента размножения нейтронов ΔK при малых отклонениях параметров контура от средних значений в зависимости от изменений мощности реактора, расхода и температуры натрия на входе в активную зону можно представить через соответствующие коэффициенты (dK/dW , dK/dG , dK/dT – мощностной, расходный и изотермический) в виде

$$\Delta K = dK/dW \cdot \Delta W(t) + dK/dG \cdot \Delta G(t) + dK/dT \cdot \Delta T(t) + \Delta K_{\text{доп}}(t).$$

Здесь $\Delta K_{\text{доп}}$ есть медленное изменение коэффициента размножения, обусловленное другими, находящимися вне системы охлаждения активной зоны, факторами, например, от выгорания топлива. Изменение коэффициента размножения за счет изменения мощности dK/dW и расхода dK/dG определяются из следующих уравнений

$$\left(\frac{dk}{dW}\right)_G = \left(\frac{dk}{dW}\right)_{G,T} + \frac{1}{GC_p\rho} \left(\frac{dk}{dT}\right)_{G,W} = a + \frac{b}{G}, \quad (8)$$

$$\left(\frac{dk}{dG}\right)_W = \left(\frac{dk}{dG}\right)_{W,T} - \frac{W}{G^2 C_p \rho} \left(\frac{dk}{dT}\right)_{W,G} = c - b \frac{W}{G^2}. \quad (9)$$

где c , b – коэффициенты; индексы указывают на постоянство того или иного параметра при изменении других. Поскольку мощность реактора при работающей системе автоматического регулирования в среднем постоянна (или меняется незначительно), то изменение коэффициента размножения в квазистационарном состоянии первого контура будет определяться в основном только изменением расхода и температуры натрия. Ниже дано краткое описание основных вычислительных процедур.

2.6.1. Колебания расхода и температуры натрия. Колебания тепловой мощности

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

$$\rho_{\Sigma}(t) = \sum_{i=1}^4 [k_i(z_i) - k_i(z_{0i})], \quad (10)$$

где $k_i(z_i)$ -кривая эффективности i -го блока регулирования, $z_i = f(t)$ – положение i -го блока регулирования относительно АЗ в момент времени t . Начальное (базовое) положение органов регулирования определялось в момент достижения номинальной средней мощности 2 МВт. Вычисленная из (10) реактивность включает все ее медленные компоненты, как со стороны первого контура, так и компоненты мощностной обратной связи.

В качестве характеристик колебаний исходных измеряемых параметров первого контура использовались спектральные плотности колебаний, их амплитуды, а также плотности распределений и параметры разброса.

Спектральный состав и амплитуды колебаний расхода и температуры натрия на входе в АЗ, а также подогрева натрия в АЗ показаны на рис.27 и в таб.8. Номера пиков, отмеченных на рис.27, соответствуют номерам в таблице 8. Из рис.27 видно, что в спектрах колебаний расхода и температур натрия имеются два-три больших пика на частотах, указанных в таблице 8. Остальные колебания вносят менее 3% в энергию колебаний и ими при анализе можно пренебречь. Основной пик колебаний для всех указанных на рис.26 процессов находится на частоте суточных колебаний, т.е. с периодом 24 ч.

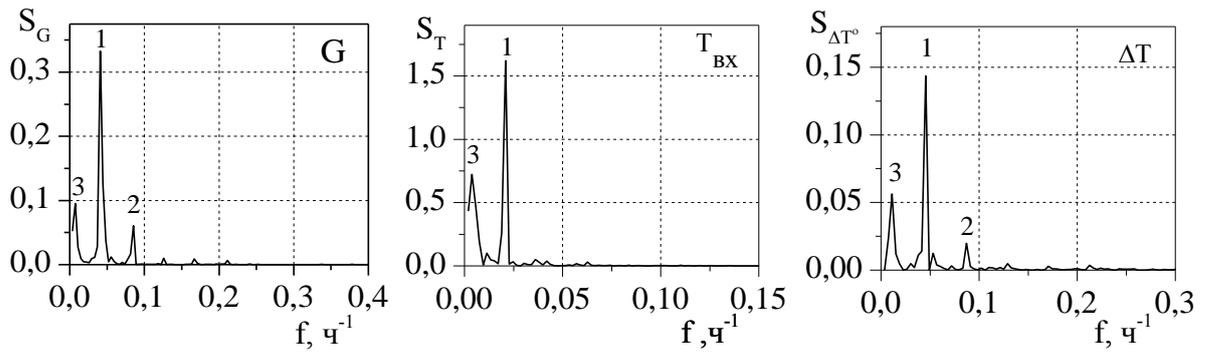


Рис.27. Спектральные плотности колебаний расхода натрия через АЗ (S_G), его температуры на входе в АЗ ($S_{T^{\circ}}$) и подогрева в АЗ ($S_{\Delta T^{\circ}}$).

Таблица.8. Амплитуды колебаний (a_G) расхода в петлях А (G_A) и Б (G_B) первого контура, суммарного расхода через АЗ (G_{Σ}) и температуры натрия a_T на входе и выходе из АЗ при мощности 2 МВт

| № | Период колебаний, ч | Амплитуда колебаний расхода $a_G, \text{ м}^3/\text{ч}$ | | | Амплитуда колебаний температуры $a_T, \text{ }^{\circ}\text{C}$ | |
|------------------|---------------------|---|----------------|----------------|---|----------------------------|
| | | G_{Σ} | G_A | G_B | $T_{\text{вх}}$ | $T_{\text{вых}}$ |
| 1 | 24 | 2,4 | 0,9 | 0,7 | 4,3 | 5,4 |
| 2 | 12 | 1,1 | 0,64 | 0,5 | - | - |
| 3 | 88 | 1,1 | 0,64 | 0,3 | 2,9 | 3,3 |
| Среднее значение | | $\bar{G}_{\Sigma}=103$ | $\bar{G}_A=52$ | $\bar{G}_B=51$ | $\bar{T}_{\text{вх}}=291$ | $\bar{T}_{\text{вых}}=350$ |

Как следует из табл.8, амплитуда колебаний полного расхода натрия через АЗ на основной частоте составляют $2,4 \text{ м}^3/\text{ч}$, в петле А – $0,9 \text{ м}^3/\text{ч}$ и в петле Б - $0,7 \text{ м}^3/\text{ч}$. Таким образом, амплитуда суточных колебаний расхода в петле А в 1,28 раза выше чем в петле Б, как и температура натрия на выходе из АЗ ($5,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$) по сравнению с входной ($4,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$) (см. табл.8).

Разность колебаний температуры натрия на выходе и входе в АЗ плюс колебания расхода определяют колебания тепловой мощности. Спектр колебаний тепловой мощности близок к белому шуму с одной выраженной частотой суточных колебаний, амплитуда которой приведена в табл.8. Среднее значение подогрева натрия и мощности реактора составляли $59 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и 1930 кВт соответственно.

Таблица.9. Значения амплитуд колебаний подогрева натрия ($a_{\Delta T^\circ}$) и тепловой мощности ($a_{\Delta W}$) реактора на основных частотах

| № | Период колебаний, ч | Амплитуда колебаний подогрева $a_{\Delta T^\circ}, ^\circ\text{C}$ | Амплитуда колебаний тепловой мощности $a_{\Delta W}, \text{кВт}$ |
|---|---------------------|--|--|
| 1 | 24 | 1,32 | ~ 2 |
| 2 | 12 | 0,87 | - |
| 3 | 88 | 1,10 | - |

Как видно из табл.9, амплитуда суточных колебания тепловой мощности мала ~2 кВт. Это связано с тем, что соответствующие доминантные колебания расхода и подогрева натрия в АЗ находятся в противофазе. Полные колебания тепловой мощности гораздо больше, но не превышают ± 10 кВт.

Колебания уровня натрия и давления аргона в газовой полости над активной зоной. Ранее, еще на стадии пуска ИБР-2, было показано, что влияние давления аргона в газовой полости над АЗ на реактивность отсутствует или же пренебрежимо мало, т.е. т.н. изобарический эффект реактивности отсутствует [77]. То же утверждалось и для уровня натрия над АЗ. Спектральный состав колебаний давления аргона в газовой полости и уровня натрия над активной зоной подобен колебаниям расхода натрия с амплитудами, представленными в табл.10. Корреляционная связь между уровнем натрия и давлением аргона над активной зоной на основной частоте колебаний высокая (функция когерентности равна 0,8). Можно считать, что указанные процессы жестко взаимосвязаны и при нормальной работе реактора колебания давления аргона вызвано изменением уровня натрия.

Таблица.10. Амплитуды колебаний уровня натрия и давления аргона в газовой полости над АЗ на основных частотах при расходе натрия через АЗ 100 м³/ч

| № | Период колебаний, ч | Амплитуда колебаний уровня натрия a_n , мм | Амплитуда колебаний давления аргона a_{Ar} , ати |
|---|---------------------|--|--|
| 1 | 24 | 4,0 | 0,012 |
| 2 | 88 | 2,2 | 0,0092 |
| 3 | 12 | 1,6 | 0,0058 |

Обращает на себя внимание тот факт, что детерминированные (гармонического вида) 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 не могут вызвать заметных колебаний реактивности и повлиять на энергию импульса. Расчетное изменение реактивности при уменьшении уровня, например, на 10 мм мало ($<10^{-5}\%$ $K_{эф}$). Отсюда становится понятным полученный ранее результат о нулевом изобарическом эффекте реактивности ИБР-2. Таким образом, при оценке шумов реактивности, вызванных колебаниями уровня натрия и давления аргона в газовой полости над АЗ, в нормальном состоянии реактора можно пренебречь.

На рис.28 приведены плотности распределения колебаний некоторых параметров первого контура: расхода натрия через АЗ, уровня натрия в газовой полости над АЗ и температуры натрия на входе и выходе из АЗ. В табл.11 даны значения разброса параметров. Там же в таб.11 даны и параметры разброса колебаний тепловой мощности.

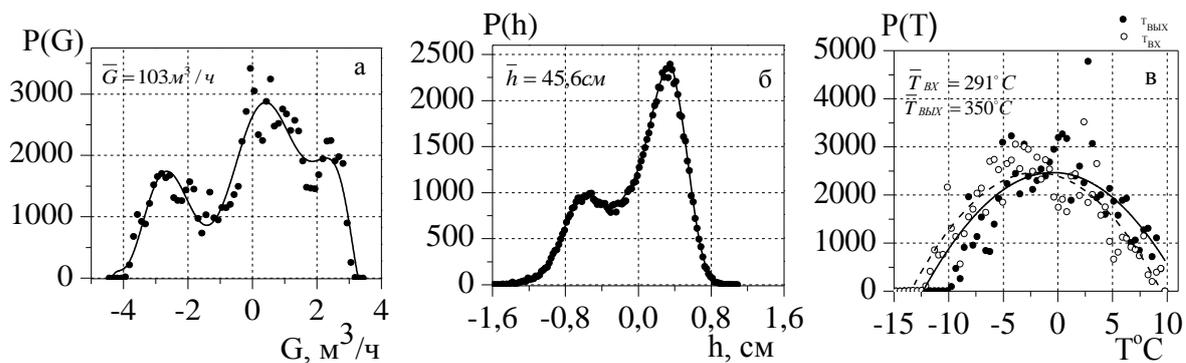


Рис.28. Плотность распределения колебаний некоторых параметров первого контура: а - расхода натрия через АЗ $G \text{ м}^3/\text{ч}$, б – уровня натрия в газовой полости над АЗ h , мм, в - температуры натрия на входе $T_{\text{вх}} \text{ }^\circ\text{C}$ и г - выходе из АЗ $T_{\text{вых}} \text{ }^\circ\text{C}$

Таблица.11. Стандартное отклонение (σ) и размах колебаний (Δm) основных теплофизических параметров первого контура системы охлаждения АЗ ИБР-2М при мощности 2 МВт и расходе натрия $100 \text{ м}^3/\text{ч}$; $\Delta x/\Delta \text{сут}$ - средний за цикл линейный тренд параметров за сутки

| Параметры | Стандартное отклонение, σ | Размах колебаний, Δm | Линейный тренд, $\Delta x/\text{сут}$ |
|--|----------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|
| Расход натрия через АЗ, $\text{м}^3/\text{ч}$ | 1,8 | 8,1 | -0,075 |
| Уровень натрия, мм | 9 | 45 | -2,5 |
| Температуры натрия на входе в АЗ, $^\circ\text{C}$ | 3,8 | 18,0 | -0,45 |
| Температуры натрия на выходе из АЗ, $^\circ\text{C}$ | 4,6 | 20,5 | -0,72 |
| Подогрев натрия в АЗ, $^\circ\text{C}$ | 1,8 | 8,8 | -0,26 |
| Давления аргона в газовой полости над АЗ, ати | 0,012 | 0,06 | -0,0016 |
| Тепловая мощность W , кВт | 2,5 | 18,0 | -5,0 кВт/сут |

Как следует из таблицы 11, полные колебания параметров первого контура достаточно велики. В среднем, относительный размах колебаний таких важных параметров как температуры и расхода натрия составляет 6-8%. При этом наблюдаемый линейный тренд всех параметров отрицательный, наиболее заметный для температуры натрия на выходе из АЗ $-0,72 \text{ }^\circ\text{C}/\text{сут}$. При наличии отрицательного тренда в подогреве и расходе натрия наблюдаться и соответствующий им тренд тепловой мощности со скоростью $-5 \text{ кВт}/\text{сут}$ или $0,25\%/сут$. Полные колебания тепловой мощности за реакторный цикл составляют не более $\sim 1\%$, а уменьшение мощности –

2,5%. Имеется ряд объяснений наблюдаемому процессу деградации мощности, однако точного понимания пока нет.

Полные колебания расхода натрия через АЗ равные 8,1% соответствуют полным колебаниям давления аргона над АЗ (~8,2% при среднем значении давления 0,73 ати).

2.6.2. Температурная и расходная компоненты колебаний реактивности

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

$$\rho_T(t) = dK/dT \cdot [T_{вх}(t) - T_0], \quad (12)$$

где $dK/dT = \left. \frac{\Delta K}{\Delta T} \right|_{G,W = const}$ - 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 активную зону 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 $-(1,19 \pm 0,10) \cdot 10^{-2} \beta_{эф}/^\circ\text{C}$ [78].

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

$$\rho_G(t) = dK/dG \cdot [G(t) - G_0], \quad (13)$$

где $dK/dG = \left. \frac{\Delta K}{\Delta G} \right|_{W,T = const}$ - расходный коэффициент реактивности, т.е.

изменение коэффициента размножения, отнесенное к изменению расхода натрия на входе в активную зону, $G(t)$, 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 ~10%) значение расходного коэффициента реактивности можно принять равным асимптотически установившемуся $-0,7 \cdot 10^{-2} \beta_{\text{эф}} / \text{М}^3 / \text{ч}$ [42, 77].

Колебания медленной мощностной обратной связи $\rho_w(t)$ определялись из уравнения баланса реактивности относительно состояния равновесной импульсной критичности сразу после выхода на номинальную мощность 2 МВт (базовое состояние) в следующем виде

$$\rho_w(t) = [\rho_{\Sigma}(t) - \rho_T(t) - \rho_G(t) - \rho_E(t)], \quad (14)$$

где ρ_{Σ} , ρ_T , ρ_G определены выше, ρ_E – эффект выгорания топлива.

2.6.3. Полные колебания реактивности и колебания мощностной обратной связи

В шумы реактивности со стороны первого контура вносят источники различного типа: в основном это температурные, расходные и мощностные. Спектральный состав и интенсивность колебаний полной реактивности при работе реактора с включенной системой стабилизации мощности, т.е. когда мощность реактора поддерживается в среднем на постоянном уровне, показаны на рис.29 и в табл. 12. Из рис.29 видно, что в спектрах колебаний полной реактивности и реактивности мощностной обратной связи имеются три пика с основным пиком на частоте суточных колебаний (24 ч). При этом амплитуда суточных колебаний значительная $3,0 \cdot 10^{-2} \beta_{эф}$. Как следствие - орган регулирования в системе обратной связи реактора претерпевает существенные колебательные перемещения. Амплитуда суточных колебаний автоматического регулятора (без учета компенсации постоянного тренда реактивности) вверх-вниз достигает ± 66 мм, из которых ± 29 мм вызваны колебаниями реактивности мощностной обратной связи. Для оценок использовалась дифференциальная эффективность АР равная $0,045 \cdot 10^{-2} \beta_{эф}/\text{мм}$. Как видно из рис.29 и таб.12, в колебаниях полной реактивности присутствует также очень медленная компонента с периодом 3,7 суток (88 ч). Для реакторного цикла, длительность которого превышает две недели, эта компонента определяется более точно и равна 7 суток. Реакция АР на эти недельные изменения реактивности составляет ± 46 мм. Такая покомпонентная оценка перемещений автоматического регулятора важна тем, что она дает оценку влияния отдельных колебательных процессов со стороны первого контура на работу системы автоматической стабилизации мощности. Фактически, эти оценки показывают, что будет, если исчезнут все колебательные компоненты реактивности кроме одного. Поскольку указанные выше компоненты смещены по фазе друг к другу, то полные колебания реактивности существенно выше. Например, размах колебаний полной реактивности, как и реактивности мощностной обратной связи

составляет каждый ~ 300 мм движения АР. Колебательная неустойчивость полной реактивности в данном случае накладывается на ее значительный тренд, равный 33 мм АР/сут. С учетом компенсации тренда с помощью промежуточного регулятора (действия оператора на пульте управления реактора) полные колебания АР составляют 100 мм. Возможные компоненты тренда полной реактивности подробно рассмотрены в [47]. На рис.30 приведен ход полной реактивности (ρ_{Σ}), реактивности мощностной обратной связи (ρ_w), суммарной реактивности по температуре и расходу натрия (ρ_{TG}) и реактивности по температуре (ρ_T) и расходу натрия (ρ_G) за реакторный цикл. В табл. 13 даны значения разброса параметров.

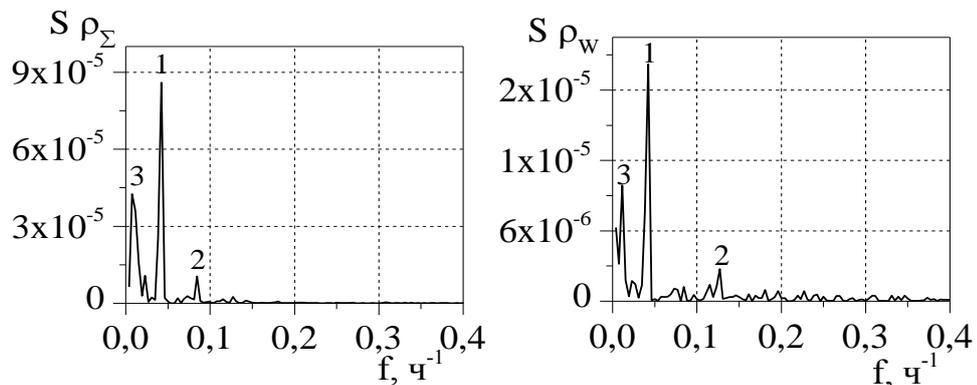


Рис.29. Спектральная плотность медленных колебаний полной реактивности (слева) и реактивности мощностной обратной связи (справа) при работе реактора на мощности 2 МВт и расходе натрия через АЗ 100 м³/ч

Таблица.12. Средняя амплитуда колебаний полной реактивности ($a_{\rho_{\Sigma}}$), реактивности мощностной обратной связи (a_{ρ_w}) и суммарной реактивности по температуре и расходу натрия ($a_{\rho_{TG}}$) на основных частотах

| № | Период колебаний, ч | Амплитуда колебаний реактивности, $10^{-2}\beta_{эф}$ | | |
|---|---------------------|---|--------------|-----------------|
| | | $a_{\rho_{\Sigma}}$ | a_{ρ_w} | $a_{\rho_{TG}}$ |
| 1 | 24 | 3,0 | 1,32 | 5,7 |
| 2 | 12 | 1,3 | - | - |
| | 8 | - | 0,55 | 0,75 |
| 3 | 88 | 2,1 | 0,90 | 3,0 |

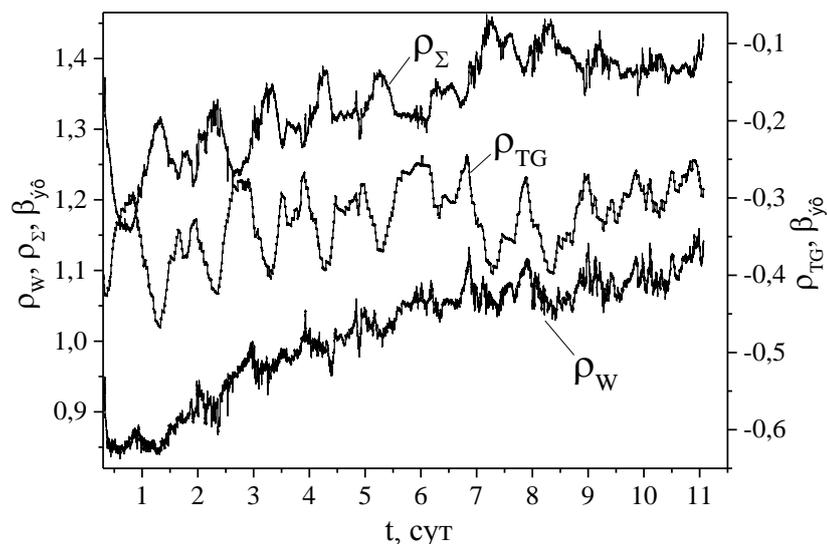


Рис.30. Изменение полной реактивности (ρ_{Σ}), реактивности мощностной обратной связи (ρ_w) и суммарной реактивности по температуре и расходу натрия (ρ_{TG}) в цикле через 10 часов после выхода на номинальную мощность 2 МВт.

Таблица.13. Стандартное отклонения (σ) и размах ($\Delta\rho_m$) полной реактивности (ρ_{Σ}), реактивности мощностной обратной связи (ρ_w), суммарной реактивности по температуре и расходу натрия (ρ_{TG}) и реактивности по температуре (ρ_T) и расходу натрия (ρ_G). $\Delta\rho/\Delta t$ -линейный тренд реактивности за сутки.

| Параметры | Стандартное отклонение, $\sigma, 10^{-2}\beta_{эф}$ | Размах колебаний, $\Delta\rho_m, 10^{-2}\beta_{эф}$ | Линейный тренд, $\Delta\rho/\Delta t, 10^{-2}\beta_{эф}/сут$ |
|---|---|---|--|
| Полная реактивность ρ_{Σ} | 2,7 | 14,0 | 1,5 |
| Реактивность мощностной обратной связи ρ_w | 1,6 | 13,0 | 2,3 |
| Суммарная реактивность по температуре и расходу ρ_{TG} | 3,5 | 15,2 | 0,75 |
| Реактивности по температуре натрия ρ_T | 4,0 | 17,5 | 0,6 |
| Реактивности по расходу натрия ρ_G | 1,2 | 4,8 | 0,083 |

Колебания расхода и температуры натрия на входе в АЗ непосредственно влияют на реактивность. Спектральные плотности колебаний реактивности по расходу и температуре натрия повторяют спектральный состав колебаний самого расхода и температуры (см. рис.29). На 96% температурные и расходные компоненты реактивности состоят из 2-

3-х частот, указанных в табл.11. Из табл.14 видно, что температурные колебания реактивности в 3-5 раза 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 контроль за работой системы стабилизации мощности.

Таблица.14. Амплитуда колебаний реактивности по расходу и температуре натрия на входе в АЗ на основных частотах при мощности 2 МВт и расходе 100 м³/ч

| № | Период колебаний, ч | Амплитуда колебаний реактивности, 10 ⁻³ β _{эф} | |
|---|---------------------|--|--|
| | | по расходу (a _{ρ_G}) | по температуре (a _{ρ_T}) |
| 1 | 24 | 1,64 | 4,8 |
| 2 | 12 | 0,78 | - |
| 3 | 88 | 0,50 | 3,0 |

Обращает на себя внимание тот факт, что характерный “сбой” в температуре и расходе натрия, видимый на рис.26 на 5-6-е сутки от начала реакторного цикла, попадает на субботний и воскресный день. Это типичная картина колебаний параметров первого контура в любом реакторном цикле. Наблюдаемый “сбой”, вероятнее всего, вызван изменением режима питания электромагнитных насосов 1-го контура. Сетевая нагрузка в субботу и воскресенье уменьшается, меняется частота и напряжение в сети, что напрямую действует на работу насосов. Соответственно меняется расход натрия через АЗ. Таким образом, первопричина периодических недельных возмущений реактивности и соответственно компенсирующих движений органов регулирования реактора определяется возмущениями расхода и затем уже, как следствие, изменением температуры натрия.

2.6.4. Взаимная корреляция между колебаниями параметров первого контура системы охлаждения активной зоны и колебаниями реактивности

Основные корреляционные связи между колебаниями термодинамических параметров первого контура системы охлаждения АЗ и колебаниями

реактивности представлены в табл. 15. На рис. 31 для иллюстрации приведены спектральные плотности колебаний температуры и расхода натрия через АЗ, реактивности мощностной обратной связи, полной реактивности, взаимные спектральные плотности и функции когерентности.

Таблица.15. Коэффициенты парной корреляции (r_{xy}) между колебаниями отдельных параметров первого контура и колебаниями реактивности, а также значения функции когерентности (γ_{xy}^2) на основной частоте суточных колебаний (период 24 ч)

| Теплодинамические параметры первого контура и колебаний реактивности | Коэффициент корреляции r_{xy} | Значение функции когерентности для суточных колебаний γ_{xy}^2 |
|---|---------------------------------|---|
| Температура и полный расход натрия на входе в АЗ ($T_{вх} - G_{\Sigma}$) | -0,77 | 0,91 |
| Уровень натрия и давление аргона в газовой полости над АЗ ($P_{Ar} - h$) | 0,63 | 0,8 |
| Расход натрия в петлях А и Б ($G_A - G_B$) | 0,92 | 0,97 |
| Полный расход натрия на входе в АЗ и уровень натрия ($G_{\Sigma} - h$) | 0,63 | 0,96 |
| Реактивность мощностной обратной связи и полная реактивность ($\rho_w - \rho_{\Sigma}$) | -0,57 | 0,87 |
| Реактивность по температуре и расходу натрия на входе в АЗ ($\rho_T - \rho_G$) | -0,72 | 0,93 |

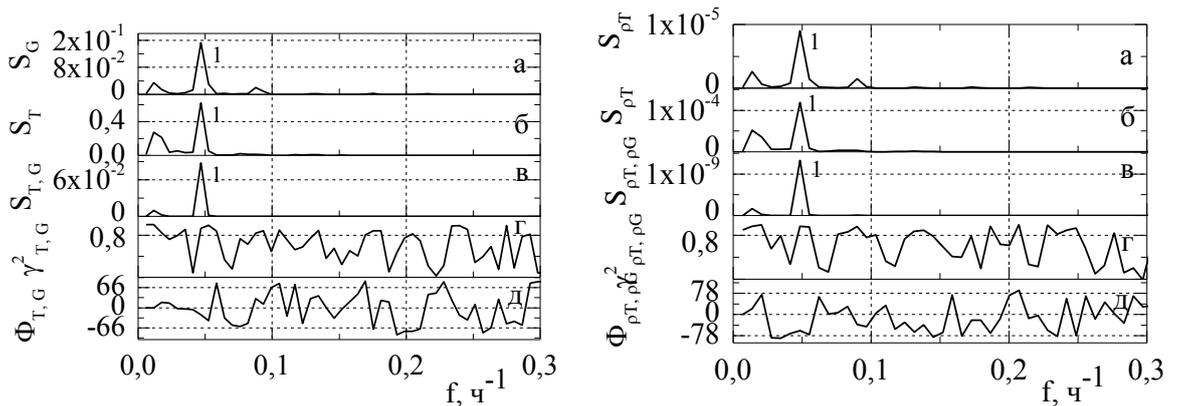


Рис.31. Корреляция между температурой и расходом натрия на входе в АЗ (слева) и между колебаниями реактивности мощностной обратной связи и колебаниями полной реактивности (справа): спектральная плотность колебаний первого (а) и второго параметров (б); взаимная спектральная плотность (в), функция когерентности (г) и фазовый сдвиг (д).

Для всех колебаний реактивности характерна одна особенность: основное колебание представляет собой колебание гармонического вида с периодом равным одним суткам. Из рис.31 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 одни сутки. Фазовый сдвиг на этой частоте $\Phi_{\rho_{\omega}, P_{\Sigma}}$ 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 достаточна жесткая, но не полная, что указывает на присутствие в полной реактивности компонент от других источников шумов, находящихся вне системы охлаждения АЗ.

Корреляционная связь между колебаниями реактивности по температуре и расходу на входе в активную зону на частоте суточных колебаний высокая и, естественно, отрицательная: функция когерентности равна 0,93, а коэффициент корреляции - 0,72. Таким образом, снижение, например, расхода на входе в АЗ приведет к росту реактивности за счет расходной компоненты обратной связи и росту температуры на выходе из АЗ, который через время циркуляции по контуру (минуты) вызовет уменьшение реактивности за счет температурного эффекта. Общая реактивность суточных колебаний будет скомпенсирована и уменьшится. Как и ожидалось, такая же сильная корреляция на основной частоте суточных колебаний наблюдается и между колебаниями температуры и расхода натрия на входе в АЗ: функция когерентности 0,91, коэффициент корреляции -0,77 (см. таб.15).

Анализ множественного коэффициента корреляции между тремя параметрами, такими как расход, температура натрия на входе в АЗ и реактивность мощностной обратной связи показывает, что статистическая взаимосвязь между ними средняя (0,69). Такая же степень корреляции

наблюдается и между реактивностью обратной связи по расходу, температуре натрия на входе в АЗ и полной реактивностью (множественный коэффициент корреляции равен 0,64). Это, как и при анализе парных корреляций, говорит о том, что колебания полной реактивности и реактивности обратной связи частично скомпенсированы и их корреляционная связь с расходом и температурой уменьшилась.

2.7. Выводы

Создана программа для статистической обработки временных рядов большой длительности до $\sim 5 \cdot 10^7$ последовательных событий, с помощью которой получены данные о шумовом состоянии реактора на стадии его начальной эксплуатации в 2011 году. Показано, что спектральный состав колебаний энергии импульсов реактора на 50% обусловлен детерминированными (гармонического типа) колебаниями подвижных отражателей и что интенсивность колебаний слабо меняются в течение реакторного цикла длительностью 11 дней.

Исследована динамика изменения шумов энергии импульсов за значительный период работы реактора, начиная с момента ввода ИБР-2М в эксплуатацию в конце 2011 г. и до конца 2016 г. до достижения энерговыделения равного ~ 1100 МВт·сут. Показано, что характеристики шумов энергии импульсов существенно зависят от энерговыделения (выгорания топлива). Показано, что парциальные колебания шумов, обусловленных вибрациями лопастей подвижных отражателей, со временем уменьшались и к концу анализируемого периода достигли минимума в среднеквадратических отклонениях равного 1.7%. Вероятнее всего, этот эффект связан с приработкой деталей модулятора реактивности как ротационной машины. Напротив, низкочастотная компонента шумов с частотами менее 0.26 Гц возрастала и при энерговыработке 800 МВт·сут достигла максимального значения равного 2.3%. После установки оптимальных для текущего шумового состояния реактора значений

параметров системы автоматического регулирования мощности парциальная компонента низкочастотных шумов уменьшилась до 1.7%.

За весь анализируемый период работы реактора при энерговыработке до ~1100МВт·сут. полные относительные стандартные отклонение колебаний мощности не превышали 5 %, из которых в среднем ~1.6 % связаны с работы АР и ~2,5 % обусловлены осевыми вибрациями лопастей ПО.

Таким образом, показано, что шумы энергии импульсов в процессе работы ИБР-2М существенно меняются как по спектральному составу, так и по уровню колебаний. При этом уровень полных колебаний значительно меньше допустимого. Кроме того, малый уровень низкочастотных шумов свидетельствует об отсутствии признаков колебательной неустойчивости реактора и значительном запасе по энерговыработке до появления неустойчивости.

Исследование шумов реактивности, вызванных колебаниями и трендом основных параметров первого контура системы охлаждения активной зоны при работе реактора на номинальной мощности 2 МВт, показали следующее:

- Полные колебания параметров первого контура достаточно велики 6-8%. Они проявляются на фоне отрицательного линейного тренда. В наибольшей степени тренд наблюдается для температуры натрия на выходе из АЗ (-0,72 °С/сут) и тепловой мощности, деградация которой идет со скоростью -5 кВт/сут. Полные колебания тепловой мощности за реакторный цикл - не более ~1 %, а уменьшение мощности – 2.5%;
- Колебания давления аргона над АЗ (~8%) и уровня натрия (4,5 см) не могут вызвать заметных колебаний реактивности и мощности;
- В спектрах колебаний всех теплофизических параметров первого контура, а также полной реактивности и реактивности мощностной обратной связи доминирует частота суточных колебаний. Амплитуда суточных колебаний полной реактивности значительная $3,0 \cdot 10^{-2} \beta_{эф}$. Как следствие - орган

автоматического регулирования (АР) в системе обратной связи реактора может претерпевать существенные колебательные перемещения ± 66 мм, ± 29 мм из которых вызваны колебаниями реактивности мощностной обратной связи;

- Отдельные компоненты реактивности, вызванные работой первого контура, смещены по фазе друг к другу, поэтому реальные колебания полной реактивности и реактивности мощностной обратной связи могут вызывать ~ 300 мм движения АР каждая.
- Медленные колебания полной реактивности накладывается на ее большой тренд 33 мм АР/сут. С учетом компенсации тренда колебания АР в процессе нормальной работы реактора достигают 100 мм. Тренд полной реактивности обусловлен процессами, действующими вне системы охлаждения АЗ;
- В колебаниях реактивности со стороны первого натриевого контура присутствует очень медленная компонента с периодом ~ 7 суток и амплитудой 46 мм движения АР. Эта компонента реактивности вызвана изменением расхода за счет изменения режима работы электромагнитных насосов при изменении сетевой нагрузки.

В целом медленные колебания параметров первого контура системы охлаждения АЗ достаточно сильно влияет на реактивность, работу системы стабилизации мощности и, соответственно, на безопасность реактора.

ГЛАВА 3. АНАЛИЗ ШУМОВ РЕАКТОРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ИБР-2М

3.1. Введение в шумовую диагностику ИБР-2М

Техническая диагностика - это дисциплина, которая изучает теорию, методы и средства распознавания состояния технических объектов и процессов. В простых случаях можно ограничиться диагностированием объектов или их элементов путём осмотра, инструментального контроля технических параметров или на основе испытаний вне режимного функционирования объектов, пользуясь теми или иными признаками состояний.

Сложные технические объекты и процессы иногда характеризуются скрытой динамикой, не имеющей явных признаков, и тогда материальным носителем информации могут служить шумы режимных параметров (мало амплитудные вариации параметров, присутствующие в режимах нормальной эксплуатации), алгоритмический анализ которых может дать сведения о запасах устойчивости нормально работающего оборудования для заблаговременного предотвращения аномального развития процессов.

Оборудование реакторных установок ИБР-2М представляет собой именно такие объекты, нуждающиеся в специальных, сложных диагностических процедурах, поскольку многообразие процессов в этом оборудовании и его конструктивно-технологические особенности определяют возможности развития скрытой динамики процессов [41].

3.2. Диагностика состояния реактора по шумам мощности

Изменение спектральной плотности колебаний энергии импульсов ИБР-2М за цикл от момента выхода на мощность 2 МВт до начала снижения приведено на рис.15. Усредненная по всему циклу спектральная плотность колебаний энергии импульсов приведена на рис. 32. Как видно из рис.32, в спектре колебаний энергии импульсов имеются несколько пиков большой интенсивности. Наибольшие изменения происходят на частотах 0.82 и 1.4 Гц.

Пики в диапазоне частот 0,78-0,85; 1,36-1,80 Гц, как уже было показано ранее, обусловлены осевыми вибрациями лопастей подвижных отражателей [42, 74]. Доминантные колебания энергии импульсов на частотах осевых колебаний подвижных отражателей, отмеченных на рис.14, вносят ~50% в полную дисперсию шума [78]. Остальные компоненты колебаний гармонического вида в спектрах шумов ИБР-2М слабо выражены и близки к уровню случайного фона.

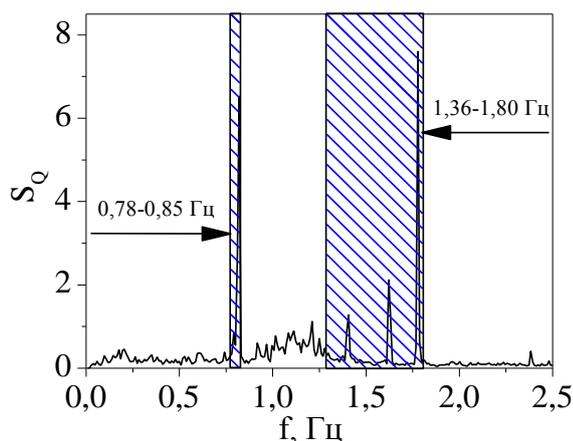


Рис.32. Усредненная за цикл спектральная плотность колебаний энергии импульсов ИБР-2М (S_Q) при мощности 2 МВт и расходе натрия 100 м³/ч, f -частота. Заштрихованная область связана с вибрациями подвижных отражателей.

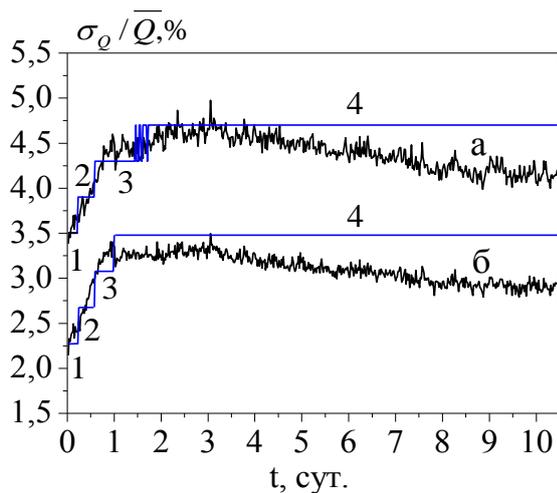


Рис.33. Изменение величины относительного среднеквадратического отклонения полных (а) и связанных с осевыми вибрациями лопастей подвижных отражателей (б) колебаний

энергии импульсов. Линией показан переход шумового состояния реактора из одного кластера в другой. Цифрами отмечены номера кластеров.

Там же на рис.33 приведены последовательность смены кластеров во времени для полных колебаний энергии импульсов и для колебаний, связанных с вибрациями лопастей подвижных отражателей. Из рис.33 видно, что спектральная плотность колебаний энергии импульсов разделяется на четыре кластера. Первые три кластера включают в себя спектры переходной области, длящейся 1,7 суток после выхода реактора на номинальную мощность 2 МВт. Четвертый, основной кластер, соответствует установившемуся шумовому состоянию реактора. Это состояние начинается через 1,7 суток от начала работы реактора на мощности и продолжается до конца реакторного цикла. Интенсивность шумов в этом 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 суток шумы мощности в целом стабилизируются. Характеристики кластеров представлены в таб.16. Структура кластеров, “сжатая” из 256-мерного в 2-х мерное пространство, приведена на рис.34.

Таблица.16. Характеристики кластеров шумового состояния реактора в процессе работы реактора

| № кластера | Анализ по полным колебаниям энергии импульсов | | Анализ по колебаниям энергии импульсов, связанных с осевыми вибрациями лопастей ПО | |
|--------------|---|---|--|---|
| | Число спектров в кластере | Время жизни кластера после выхода на мощность 2 МВт | Число спектров в кластере | Время жизни кластера после выхода на мощность 2 МВт |
| 1 | 13 | 0-5 ч | 12 | 0-6 ч |
| 2 | 18 | 5-14 ч | 19 | 6-14 ч |
| 3 | 22 | 14-41 ч (1,2 сут) | 52 | 14-24 ч (1 сут) |
| 4 | 499 | 1,7-10,5 сут | 469 | 1-10,5 сут |
| Всего | 552 | 10,5 | 552 | 10,5 |

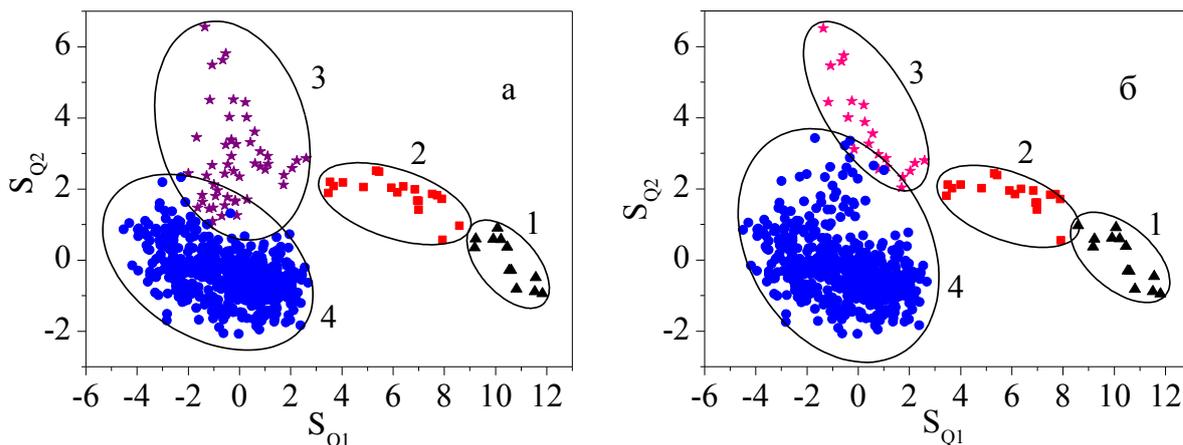


Рис.34. Структура кластеров, сжатая из 256-мерного в 2-х мерное пространство по полным колебаниям энергии импульсов (а) и по колебаниям, обусловленным осевыми колебаниями лопастей подвижных отражателей (б)

На рис.35 показано изменение кластерной структуры в 2-мерном представлении пространства реакторных шумов от времени работы реактора, как для полных колебаний мощности, так и колебаний, обусловленных вибрациями подвижных отражателей.

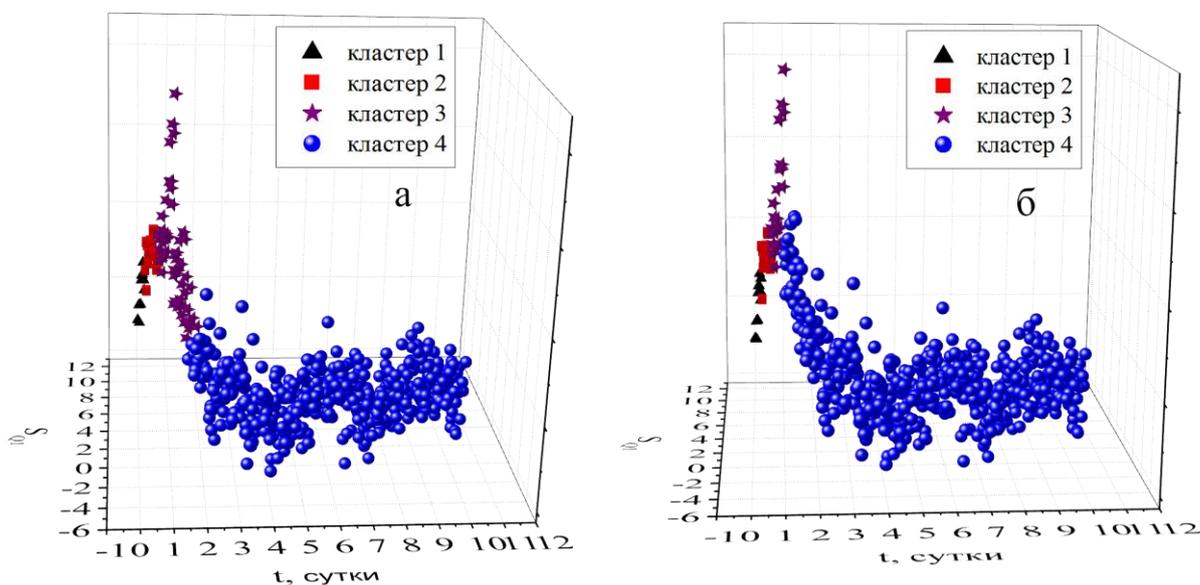


Рис.35. Изменение кластерной структуры колебаний энергии импульсов в зависимости от времени в 2-мерном представлении пространства шумов по полным (а) и по колебаниям, обусловленным вибрациями лопастей подвижных отражателей (б).

На рис.36 приведены центры кластеров с минимальным и максимальным значениями спектров, входящих в данный кластер. Из совокупности представленных выше рисунков видно следующее. Центры первого и второго кластеров сильно отличаются от третьего и четвертого. Центры третьего и четвертого кластеров близки друг к другу. Первые два кластера с резким изменением центров соответствуют переходной области шумов длительностью $\sim 0,5$ суток после выхода реактора на мощность. Третий кластер в диапазоне 14-41 часов (1,2 суток) после выхода на мощность представляет собой шумовое состояние реактора близкое по структуре к 4-му кластеру. Полное время стабилизации шумов составляет примерно 27 часов (1,7 суток). Кластерная структура в доминантных координатах спектра, т.е. для колебаний энергии импульсов, связанных с вибрациями подвижных отражателей, близка к структуре полных колебаний (см. рис.33, 34), поэтому весь предыдущий анализ можно отнести также и к этой структуре. Таким образом, динамическое изменение шумового состояния ИБР-2М после выхода реактора на мощность вызвано изменением вибрационного состояния подвижных отражателей.

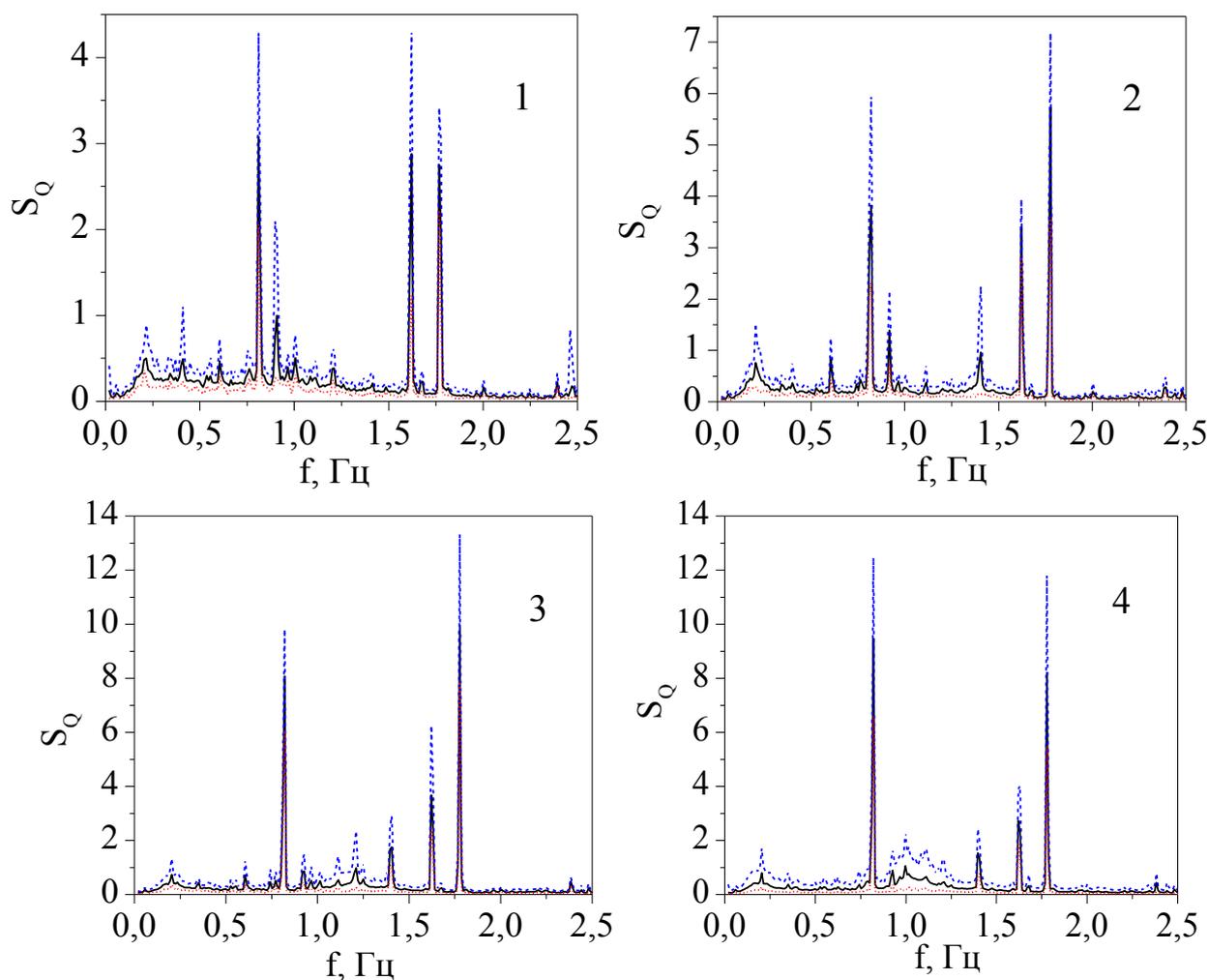


Рис.36. Спектральные плотности полных колебаний энергии импульсов, соответствующих центрам 4-х кластеров. Номер кластера указан на рис. Штриховыми линиями обозначен разброс спектров в кластерах.

Как видно из рис. 33 и 38, в начальной, переходной области изменения шумов, наибольшее изменение претерпевает амплитуда доминантных колебаний на частотах 0.82 и 1.63 Гц. Изменение амплитуды колебаний на этих частотах от времени работы реактора приведено на рис.37. За первые трое суток работы реактора амплитуда колебаний на частоте 0.82 Гц асимптотически увеличивается с константой ~ 1 суток от ~ 0 до 30 кВт. Эта компонента шумов мощности обусловлена колебаниями, как основного (ОПО), так и дополнительного (ДПО) подвижных отражателей (ПО) [28]. Вероятнее всего, такая особенность шумов в целом связана с термомеханическими деформациями привода ПО. На это указывает еще и

следующий факт. Для предыдущего варианта ПО, выполненного в виде: ДПО – трезубец, ОПО – лопасть, дисперсия, а значит и амплитуда, осевых колебаний ДПО, также как и для существующего варианта (ОПО – трезубец, ДПО – вилка) асимптотически возрастала со временем работы реактора [42]. Заметим, что наблюдаемые частоты в спектре колебаний мощности являются замаскированными аналогами некоторых реальных частот, свернутых в частотный диапазон ниже критической частоты Найквиста равной в нашем случае 2.5 Гц.

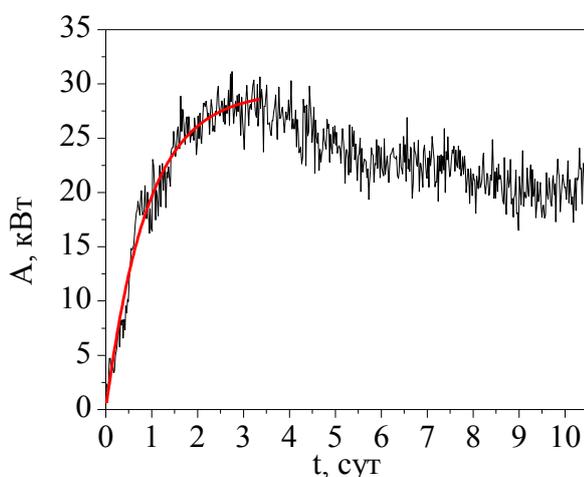


Рис.37. Изменение амплитуды колебаний энергии импульсов (А, кВт) на частоте 0,82 Гц в зависимости от времени работы ИБР-2М после выхода на номинальную мощность 2 МВт.

Идентификация доминантной частоты 0.82 Гц имеет большую степень неопределенности, поскольку характерные реальные частоты колебаний ОПО и ДПО явно выше критической частоты. Вероятным аналогом частоты 0.82 Гц может быть, согласно [43], частота одной из форм собственных колебаний ДПО равная ~85 Гц, а частота 1.63 Гц - с некоторым небольшим дефектом в поворотном редукторе подвижных отражателей.

Для сравнения с результатами кластеризации спектров, представленных на рис.38, был исследован еще один цикл работы реактора в

том же 2013 г. Этот цикл отличался от предыдущего наличием сброса мощности.

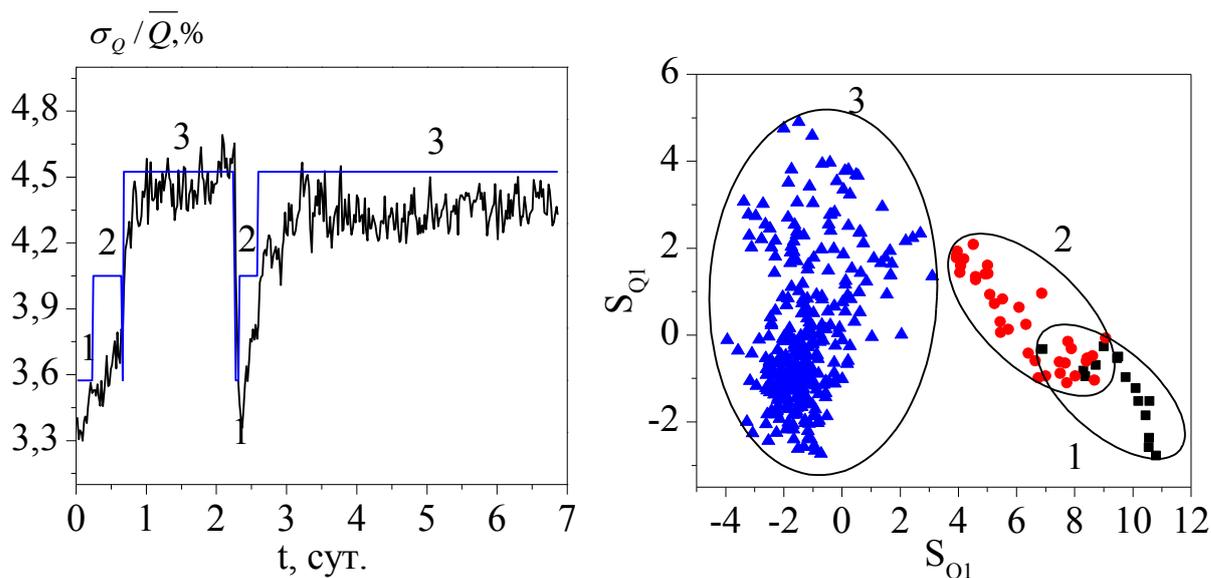


Рис.38. Изменение величины относительного среднеквадратического отклонения полных колебаний энергии импульсов и смены кластерной структуры от времени работы реактора в цикле со сбросом мощности (слева) и структура кластеров, сжатая из 256 - в 2-х мерное пространство шумов энергии импульсов (справа). Цифрами отмечены номера кластеров.

3.3. Диагностика состояния реактора по шумам

термодинамических параметров системы охлаждения активной зоны

Реактор ИБР-2М работает в циклах: две недели на мощности 2 МВт, затем останов реактора около недели при мощности близкой к нулевой. Циклы периодически повторяются. Исходный временной ряд представляет собой массив последовательных значений расхода натрия, температуры натрия на входе в АЗ, тепловой мощности (W_T) и величины пропорциональной подогреву (W_T/G_Σ). В течение нескольких реакторных циклов в 2014 г. измерялись следующие параметры:

- температура натрия на входе ($T_{\text{вх}}$) и выходе из АЗ ($T_{\text{вых}}$),
- расход натрия в петлях А (G_A) и Б (G_B) первого контура с суммарным расходом $G_\Sigma = G_A + G_B$.

Тепловая мощность (W_T) оценивалась в виде $W_T = G_{\Sigma} \cdot (\Delta T - 0,252)/3,15$, $\Delta T = (T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}})$ - подогрев натрия в активной зоне. Указанная выше выборка значений параметров представлял собой основу для прогнозирования.

На рис.33 приведены результаты прогнозирования. Там же на рис.33 представлено изменение прогнозируемой тепловой мощности и отношения тепловой мощности к расходу натрия через АЗ, т.е. величины пропорциональной изменению подогрева натрия в АЗ.

Как показал анализ результатов прогнозирования, медленное поведение (на уровне суточных колебаний) основных параметров первого контура системы охлаждения АЗ ИБР-2М можно предсказать с вполне удовлетворительной погрешностью (~5%) на интервалах времени работы реактора вплоть до 5-7 суток. Чтобы предсказать более тонкие детали изменения параметров, т.е. использовать более высокочастотные колебания температуры и расхода использовали следующий алгоритм обучения и предсказания. На основе выборки за весь предыдущий реакторный цикл, т.е. за приблизительно десять дней 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. Результаты приведены на рис.39, на котором для наглядности прогнозирование и обучение выполнялось в одном (текущем) цикле. Видно вполне приемлемое прогнозирование температуры, расхода натрия и тепловой мощности реактора. Характерной особенностью изменения тепловой мощности ИБР-2М в процессе реакторного цикла – “деградация” мощности на 50-100 кВт.

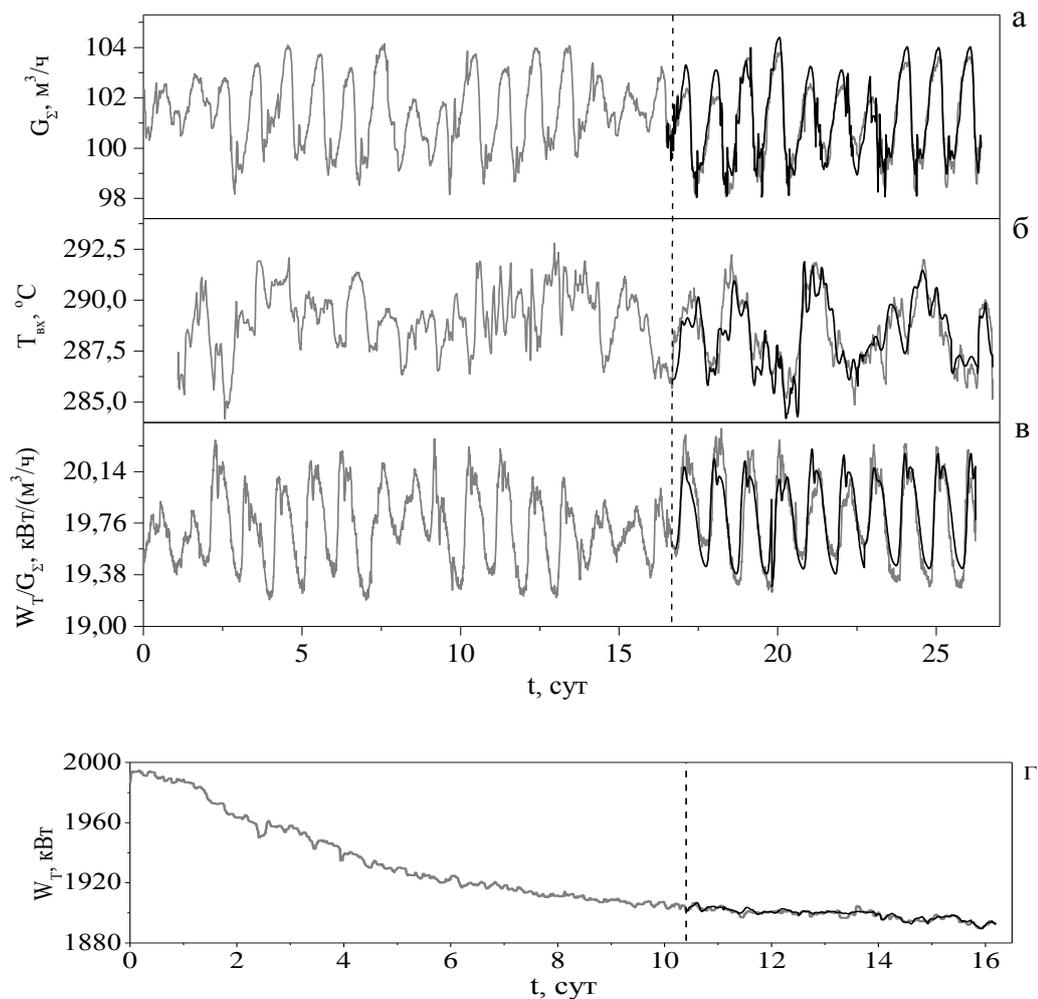


Рис.39. Прогноз изменения расхода натрия через АЗ (G_{Σ}) (а), величины пропорциональной подогреву (W_T/G_{Σ}) (б), температура натрия на входе в АЗ ($T_{вх}$) (в) и тепловой мощности (W_T) (г). Пунктирной линией разделены обучающая выборка и результат прогноза, t - время работы реактора, — эксперимент — прогноз.

Рассмотрим случайное изменение реактивности, действующее со стороны системы охлаждения АЗ, ее прогноз и возможность на основе прогноза уменьшения ее колебаний.

Изменение реактивности при отклонении температуры $\rho_T(t)$ и расхода натрия $\rho_{G_{\Sigma}}(t)$ от их средних значений G_0 , T_0 определяется следующим образом

$$\rho_{G_{\Sigma}}(t) = \frac{\partial K}{\partial G_{\Sigma}} \cdot [G_{\Sigma}(t) - G_0], \quad \rho_{T_{вх}}(t) = \frac{\partial K}{\partial T} \cdot [T_{вх}(t) - T_0],$$

где $\frac{\partial K}{\partial G_{\Sigma}}$, $\frac{\partial K}{\partial T}$ – расходный и изотермический коэффициент реактивности соответственно. Изотермический коэффициент реактивности есть изменение коэффициента размножения при медленном (квазистатическом) изменении температуры натрия на входе в активную зону 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 $-(1,19 \pm 0,10) \cdot 10^{-2} \beta_{\text{эф}} / ^{\circ}\text{C}$. 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 $-0,7 \cdot 10^{-2} \beta_{\text{эф}} / \text{M}^3/\text{ч}$ [78].

Поскольку в первом приближении процессы $\rho_{G_{\Sigma}}(t)$ и $\rho_T(t)$ независимы, то суммарное воздействие расхода и температуры натрия на реактивность определяется их суммой

$$\rho_{\Sigma}(t) = \rho_{G_{\Sigma}}(t) + \rho_{T_{\text{вх}}}(t) \quad (15)$$

Аналогично (15), суммарная реактивность прогнозируемых процессов $\rho_{G_{\Sigma}}^*(t)$ и $\rho_{T_{\text{вх}}}^*(t)$ будет равна выражению

$$\rho_{\Sigma}^*(t) = \rho_{G_{\Sigma}}^*(t) + \rho_{T_{\text{вх}}}^*(t).$$

Прогнозируемая реактивность $\rho_{\Sigma}^*(t)$ есть уже заранее известный процесс, который в принципе может быть исключен из общего изменения реактивности (см. рис.40). Способ исключения может быть разным, например, введение реактивности $\rho_{\Sigma}^*(t)$ с обратным знаком с помощью дополнительного органа регулирования. В данном случае это не принципиально, поскольку изучается только сама возможность компенсации реактивности, а не способ ее реализации. Тогда остаточная реактивность

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

фактически определяется ошибкой прогноза и, как видно из рис.41, более чем в три раза меньше колебаний исходной реактивности. Параметры распределения колебаний реактивности и тепловой мощности до и после прогноза приведены в табл.17.

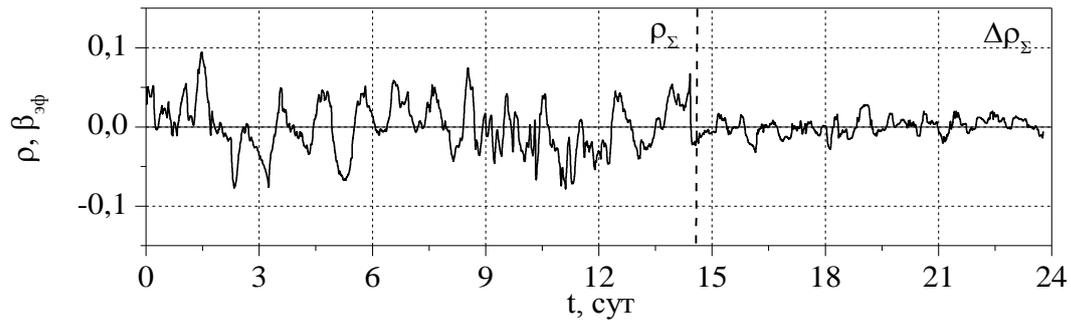


Рис.40. Изменение колебаний реактивности $\rho_{\Sigma}(t)$, обусловленной нестабильностью термодинамических параметров первого контура системы охлаждения АЗ, и остаточная реактивность $\Delta\rho_{\Sigma}$, полученная на основе прогноза

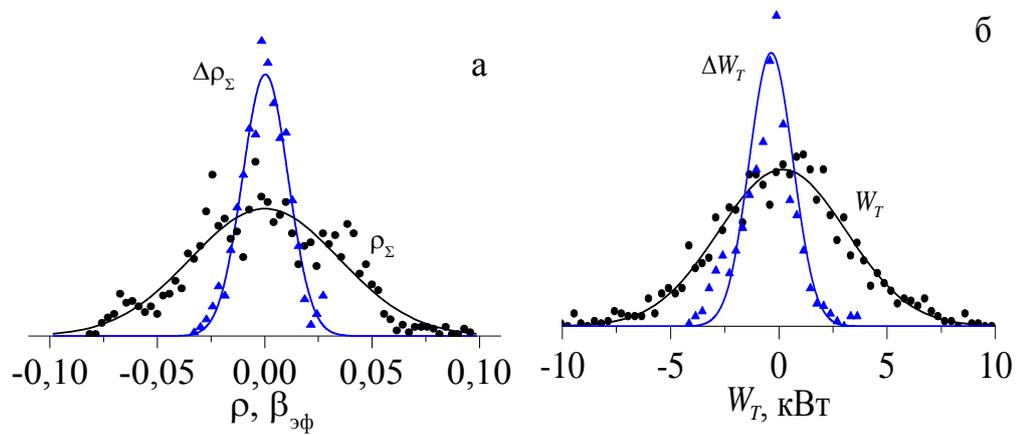


Рис.41. Плотность распределения колебаний реактивности, действующей со стороны системы охлаждения АЗ, до ρ_{Σ} и после прогноза $\Delta\rho_{\Sigma}$ (а); распределение колебаний тепловой мощности до W_T и после прогноза ΔW_T (б)

Таблица.17. Параметры распределения реактивности до (ρ_{Σ}) и после ($\Delta\rho_{\Sigma}$) прогноза: стандартное отклонение (σ) и размах колебаний ($\Delta\rho_{\max}$)

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

3.4. Выводы

В результате статистического и кластерного анализа шумов энергии импульсов ИБР-2М получены данные о динамике изменения шумового состояния реактора в цикле. Шумовое состояние ИБР-2М, представленное в виде спектральной плотности колебаний энергии импульсов за цикл (~11 суток), имеет переходную область, появляющуюся после выхода реактора на номинальный уровень мощности 2 МВт. Шумы мощности последовательно разделяются на три-четыре устойчивые структуры (кластеры). Первые два кластера наблюдаются в диапазоне 0-14 часов после выхода на мощность. Затем еще через 1.2 суток переходная область заканчивается и через 1,7 суток после выхода на мощность шумовое состояние реактора стабилизируется. В этом состоянии реактор работает до конца цикла. Показано, что переходная область реакторных шумов вызвана изменением вибрационного состояния подвижных отражателей, а именно осевых колебаний лопастей отражателей на частотах 0.82, 1.40 и в диапазоне 1.55-1.80 Гц. Основной компонентой в переходной области изменения шумов является изменение амплитуды осевых колебаний дополнительного подвижного отражателя на частоте 0.82 и 1.63 Гц. За трое суток работы реактора амплитуда гармонических колебаний энергии импульсов на частоте 0.82 Гц асимптотически увеличивается с константой ~1 сут. от ~ 0 до ~30 кВт. Указанные выше частоты энергии импульсов есть “скрытые” частоты, аналогами которых являются более высокие частоты собственных колебаний

подвижных отражателей. Переходная область реакторных шумов, вероятнее всего, связана с появлением изгибных деформаций подвижных отражателей в процессе их прогрева после выхода на мощность. Нужно также отметить, что динамика изменения шумового состояния реактора слабо меняется от цикла к циклу и от сбросов мощности. Как показывает анализ, указанные изменения малы и в целом не вносят ограничений на безопасную работу реактора.

Разработан алгоритм прогнозирования колебания основных термодинамических параметров первого контура системы охлаждения АЗ ИБР-2М на основе авторегрессионных нейронных сетей. В результате прогнозирования показано, что нелинейная авторегрессионная нейронная сеть с погрешностью $\sim 5\%$ позволяет предсказывать изменение термодинамических параметров первого контура в текущем реакторном цикле с использованием данных за предыдущий цикл. На основе прогнозируемых параметров первого контура может быть определена прогнозируемая реактивность, которую можно исключить из воздействия на систему стабилизации мощности. Разброс колебаний реактивности и мощности при этом может быть уменьшен в три раза. В целом, это повышает надежность и безопасность работы реактора.

ГЛАВА 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная диссертационная работа посвящена исследованиям случайных возмущений реактивности реактора ИБР-2М.

Основными результатами работы являются следующие:

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 шумы 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.

В заключении автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю Ю.Н. Пепельшеву за выбор интересных и важных задач, а также за помощь и поддержку в работе. Отдельную благодарность автор выражает своему коллеге и соавтору А.Д. Рогову, Г.А. Ососкову, А.К. Попову, за переданные знания о опыт решения задач экспериментальной физики. Автор бесконечно благодарен моему учителю профессору Б. Чадраа, а также своей семье за неоценимую поддержку и мотивацию на протяжении всего периода работы над диссертацией.

Список литературы

1. Франк И.М. Развитие и применение в научных исследованиях импульсного реактора. Проблемы физики элементарных частиц и атомного ядра (ЭЧАЯ). М., 806: Атомиздат, 1976 г., т. 2, вып. 4.
2. Ананьев В. Д. и др., Опыт эксплуатации и развитие импульсных периодических реакторов в Дубне. Препринт ОИЯИ 13-4395. Дубна, 1969
3. Голиков В. В., Козлов Ж. А., Кулькин Л. К. и др. Параметры нейтронных пучков ИБР-30. Сообщение ОИЯИ 3-5736. Дубна, 1971 г.
4. 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.
5. 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
6. 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.
7. 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.
8. Ю.Н. Пепельшев, А.Д. Рогов, Ц.Цогтсайхан “Статистический анализ флуктуаций энергии импульсов реактора ИБР-2М” Р13-2012-131, Дубна, ОИЯИ. 2012
9. Ю.Н. Пепельшев, Ц. Цогтсайхан “Влияние шумов натриевой системы охлаждения активной зоны ИБР-2М на колебания реактивности ” Р13-2014-61, Дубна, ОИЯИ. 2014

10. Пепелышев Ю.Н., Цогтсайхан Ц. Исследование динамики шумов энергии импульсов реактора ИБР-2М в процессе выгорания топлива. Препринт ОИЯИ Р13-2017-4. Дубна, 2017.
11. А. Адамантиадес, Дж. Кентон, Ч. Браун. Справочник по ядерной энерготехнологии, Энергоатомиздат, 1989.
12. Вейнберг А., Вигнер Е., Физическая теория ядерных реакторов, пер. с англ., М., 1961;
13. Крамеров А. Я., Щевелев Я. В., Инженерные расчеты ядерных реакторов, М., 1964;
14. Бать Г. А., Коченов А. С., Кабанов Л. П., Исследовательские ядерные реакторы, М., 1972;
15. Белл Д., Глесстон С., Теория ядерных реакторов, пер. с англ., М., 1974.
16. Г. Кеселер Ядерная энергетика М., "Энергоиздат", 1986
17. Compton, Arthur H., Atomic Quest, New York: Oxford University Press, 1956.
18. Fermi, Laura, Atoms in the Family, Chicago: University of Chicago Press, 1954.
19. E. Fermi, Collected Papers, edited by E. Amaldi et al., The University of Chicago Press - Accademia Nazionale dei Lincei, Chicago - Rome, 1962-1965, 2 volumes (1962).
20. Emilio Segrè, Enrico Fermi, physicist (The University of Chicago Press, Chicago, 1970).
21. R.G. Sachs (ed.), The Nuclear Chain Reaction - Forty Years Later (The University of Chicago Press, Chicago, 1984).
22. Р.Г.Муранака., Перевод исследовательских реакторов на низкообогащенное урановое топливо, БЮЛЛЕТЕНЬ МАГАТЭ, ТОМ 25 № 1, pp. 20–24
23. Nuclear Research Reactors in the World, Dec. 1996 Edition, Reference Data Series No. 3, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1996.

24. Safety Issues at the DOE Test and Research Reactors, National Academy Press, Washington, D.C., 1988.
25. A. Axmann, "Upgrading of the Reactor BER-11," Proceedings of the 10th Meeting of the International Collaboration on Advanced Neutron Sources, Los Alamos, NM, Oct. 3-7, 1988.
26. Ананаев В.Д., Виноградов А.В., Долгих А.В. Реактор ИБР-2 — эксплуатации и перспективы развития. — В сб.: 11-е ежегодное рос. сов. по безопасности исследовательских ядерных установок. Димитровград, 2009, с. 69 —77.
27. Шабалин Е.П. Методы расчета и оптимизация импульсного реактора периодического действия как источника нейтронов для физических исследований / Препринт ОИЯИ 11-5663. Дубна, 1971.
28. В.Д. Ананьев и др. "Первый в мире шариковой холодной замедлитель нейтронов" Препринт Р13-2012-113, Дубна, ОИЯИ, 2012
29. Е.П. Шабалин, С.А. Куликов; Холодный замедлитель нейтронов на основе ароматических углеводородов, Сообщения ОИЯИ, Е13-2004-73, 2004
30. И. М. Баранов и др., Изучение процесса выхода радиолитического водорода из экспериментального элемента холодного замедлителя на твердом мезитиле. Р3-2004-212, Сообщения ОИЯИ, 2004
31. S. A. Kulikov, и др., Measurement of Cold Neutron Spectra at a Model of Cryogenic Moderator of the IBR-2M Reactor. Physics of Particles and Nuclei Letters, v. 7, №7, 57-60, 2010
32. С.А. Куликов, Е.П. Шабалин; Сравнение эффективности материалов холодных замедлителей нейтронов для реактора ИБР-2М. Сообщение ОИЯИ, Р17-2005- 222, 2005
33. С.А. Куликов, Е.П.Шабалин. Оптимизация замедлителей ИБР-2. Журнал Атомная энергия, т. 115, №7, стр. 41-44, 2013

34. В.Д. Ананьев и др., Холодный замедлитель нейтронов на модернизированном реакторе ИБР-2. Первые результаты пуска. Журнал технической физики, т. 84, вып. 2, стр. 131-134, 2014
35. E. Shabalin, S. Kulikov; The World's First Pelletized Cold Neutron Moderator Began its Operation. Taylor & Francis group, Vol.24, pp. 27, 2013
36. S. Kulikov и др., Current status of advanced pelletized cold moderators development for IBR-2M research reactor. Physics of Particles and Nuclei, Letters, v.10, 2, pp. 230-235, 2013
37. В. Д. Ананьев и др., Испытательный стенд шарикового криогенного замедлителя нейтронов реактора ИБР- 2. Приборы и техника эксперимента, №1, стр. 128-134, 2013
38. В. Кожевников и др., Использование криогенного замедлителя на нейтронном рефлектометре РЕМУР. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. №1, стр. 1–11, 2016
39. Ананьев В.Д., Блохинцев Д.Н., Бондаренко В.В., и др. Особенности конструкции и оптимизация модулятора реактивности реактора ИБР-2// Атомная энергия, 1972, т.31, №4, стр. 352.
40. Бондарченко Е.А., Пепельшев Ю.Н., Попов А.К. Модель импульсного реактора периодического действия ИБР-2 для исследования переходных процессов. Препринт ОИЯИ Р13-99-127. Дубна, 1999.
41. Погосов А. Ю., Диагностика скрытой динамики процессов в реакторных установках АЭС: Одесса, Наук и техник, 2012
42. Ананьев В. Д. и др., Физический пуск модернизированного реактора ИБР-2 (ИБР-2М), Препринт ОИЯИ Р13-2012-41. Дубна, 2012
43. Драгунов Ю.Г. и др, Модернизация импульсного реактора ИБР-2. Атомная энергия, 2012 г., т. 113, вып. 1, стр. 29-34.
44. Международное Агентство по Атомной Энергии, Оценка безопасности исследовательских реакторов и подготовка документации по техническому обоснованию безопасности, Серия изданий по безопасности, № 35-G1, МАГАТЭ, Вена (2003).

45. Международное Агентство по Атомной Энергии, Юридическая и государственная инфраструктура ядерной безопасности, радиационной безопасности, безопасности радиоактивных отходов и безопасности перевозки, Серия норм безопасности МАГАТЭ, № GS-R-1, МАГАТЭ, Вена (2003).
46. Ли Ен Чхан, Ю. Н. Пепельшев, Изменение быстрых эффектов реактивности в процессе работы реактора ИБР-2 / Препринт ОИЯИ Р13-2008-1. Дубна, 2008
47. Ю. Н. Пепельшев, А. Д. Рогов, Медленные эффекты мощностной обратной связи реактора ИБР-2М/ Препринт ОИЯИ Р13-2013-7. Дубна, 2013
48. Ю. Н. Пепельшев, А. Д. Рогов, Энергетический пуск реактора ИБР-2М. Параметры быстрой мощностной обратной связи/ Препринт ОИЯИ Р13-2013-4. Дубна, 2013
49. Ю. Н. Пепельшев, А. Д. Рогов, Энергетический пуск реактора ИБР-2М. Параметры расходного эффекта реактивности обратной связи / Препринт ОИЯИ Р13-2013-6. Дубна, 2013
50. Энергетический пуск реактора ИБР-2. Второй этап. Промежуточный отчет. Дубна, 1982
51. Хэррис Ф.Дж. ТИИЭР, 1978, 66, с.60
52. DSP Committee, ed., Programs for Digital Signal Processing II, New York: IEEE Press, 1979.
53. Пепельшев Ю.Н., Китовски Я. Применение метода распознавания образов для исследования статических параметров реактора ИБР-2. Сообщения ОИЯИ, Р13-85-657. Дубна, 1985.
54. Болдак А.А., Сухарев Д.Л. Определение количества кластеров в статистических данных, Вісник НТУУ «КПІ» Інформатика, управління та обчислювальна техніка №53, УДК 004.023
55. Goujun Gan., Chaogun Ma., Jianhong Wu. Data Clustering: Theory, Algorithms, and Applications. V.2. P. 109-137. V.4. P. 354-362. 2007.

56. Tan P.N., Steinbach M., Kumar V. Introduction to Data Mining // Addison-Wesley. – 2005. – 769 с.
57. Tibshirani R., Walther G., Hastie T. Estimating the number of clusters in a dataset via the Gap statistic. // Technical Report. Stanford. – 2000. – pp. 412-423.
58. Hamerly G., Elkan C. Learning the k in k-means. // NIPS. – 2003.
59. Pelleg D., Moore A. X-means: Extending K-means with Efficient Estimation of the Number of Clusters. // Morgan Kaufmann. – 2000.
60. Dunn J. Well separated clusters and optimal fuzzy partitions // Journal of Cybernetics. – 1974. – 4, pp. 95-104
61. Lawrence Hubert J., Hans-Friedrich Köhn, Douglas Steinley.L.20 Cluster Analysis: A Toolbox for MATLAB. 2009
62. Ю.Н.Пепелышев, Ц. Цогтсайхан, Г.А. Ососков, “Использование метод кластерного анализа и авторегрессионных нейронных сетей для диагностики шумов реактора ИБР-2М” Препринт ОИЯИ, P13-2015-47. Дубна, 2015.
63. Ахтёров А.В., Кирильченко А.А. Основы теоретической робототехники. Искусственные нейронные сети. (Обзор) ИМП им. М.В.Келдыша РАН, Москва 2008.
64. Anil K., Jain, Jianchang Mao, K.M. Mohiuddin. Artificial Neural Networks: A Tutorial, IEEE Computer, Vol.29, No.3, March 1996, pp. 31-44.
65. Ю.Н.Пепелышев, Ц. Цогтсайхан, Г.А. Ососков, “Использование метод кластерного анализа и авторегрессионных нейронных сетей для диагностики шумов реактора ИБР-2М” Препринт ОИЯИ, P13-2015-47. Дубна, 2015
66. Huang J, Korolkiewicz M, Agrawal M, Boland J. Forecasting solar radiation on an hourly time scale using a Coupled Autoregressive and Dynamical System (CARDS) model. Sol Energy 2013; 87:136–49.
67. Haykin S. Neural networks: a comprehensive foundation. 2nd ed. Prentice Hall; 1998.

68. Ljung L. System identification: theory for the user. 2nd ed. Prentice Hall PTR; 1998.].
69. Lee Giles C., Steve Lawrence, Ah Chung Tsoi. Noisy Time Series Prediction Using Recurrent Neural Networks and Grammatical Inference. Machine Learning, 44, pp. 161-183, 2001
70. Arce G.R., "Nonlinear Signal Processing: A Statistical Approach", Wiley: New Jersey, USA, 2005.
71. Huang T., Yang G., and Tang G., "A fast two-dimensional median filtering algorithm", IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, vol. 27, no. 1, pp. 13–18, 1979.
72. Пепельшев Ю. Н., Рогов А. Д. Спектральный анализ статистических параметров импульсного реактора ИБР-2 (методика обработки). ОИЯИ, P13-84-73, Дубна, 1984.
73. Пепельшев Ю.Н., Временные характеристики параметров шумов мощности и колебаний подвижных отражателей реактора ИБР-2. Сообщения ОИЯИ, P13-88-59. Дубна, 1988.
74. Пепельшев Ю.Н., Исследование колебаний подвижных отражателей (Энергетический пуск реактора ИБР-2). Сообщения ОИЯИ, 13-87-564. Дубна, 1987
75. А.А.Марачев, Ю.Н.Пепельшев, А.К.Попов, Д.Сумхуу, Анализ динамики импульсного реактора ИБР-2М при статистически оптимальном автоматическом регуляторе. Препринт ОИЯИ, P13-2016-65, Дубна, 2016
76. Е.А. Бондарченко, Ю.Н. Пепельшев, А.К. Попов, Экспериментальное и модельное исследование особенностей динамики импульсного реактора периодического действия ИБР-2. Физика элементарных частиц и атомного ядра (ЭЧАЯ). 2004, т. 35, вып. 4.
77. Ананьев В.Д и др. Физический пуск импульсного исследовательского реактора ИБР-2. Сообщения ОИЯИ, P13-12482. Дубна, 1979.

78. Ананьев В.Д., Виноградов А.В., Долгих А.В., Едунов Л.В., Пепельшев Ю.Н., Рогов А.Д., Заикин А.А. Энергетический пуск модернизированного реактора ИБР-2, Препринт ОИЯИ, Р13-2012-42, Дубна, 2012.