

РЗ-2025-6

А. Е. Верхоглядов *, В. Н. Верхоглядова, Е. П. Шабалин

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

Направлено в журнал «Атомная энергия»

* E-mail: verhoglyadov_al@mail.ru

Математическая модель импульсного реактора периодического действия

Импульсные реакторы периодического действия — это уникальные исследовательские источники нейтронов, применяемые для экспериментов в области физики твердого тела, ядерной физики и радиационных исследований. Реактор такого типа — сложная динамическая система с множеством обратных связей. Многолетняя работа реактора ИБР-2М и его предшественников (ИБР-2, ИБР-30) показала, что при некоторых условиях наблюдается нестабильная динамика импульсов. Обнаружены и описаны несколько физических явлений, вызывающих обратную связь и способных приводить к неустойчивой динамике. Для исследования особенностей работающего реактора периодического действия и проектирования нового источника создается программно-расчетный комплекс, моделирующий работу реактора с учетом известных физических процессов, параметров конструкции и материалов активной зоны. Представлены описание модели и результаты расчетов динамики реактора.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2025

Mathematical Model of a Periodic Pulsed Reactor

Periodic pulsed reactors are unique research neutron sources. They are used for research in solid state physics, nuclear physics and radiation research. A reactor of this type is a complex dynamic system with many feedbacks. The operating experience of the IBR-2M reactor and its predecessors (IBR-2, IBR-30) shows that in periodic pulsed reactors, under certain conditions, unstable dynamics of power pulses is observed. Several physical phenomena that cause feedback and can lead to unstable dynamics were discovered and described. To study the features of a periodic reactor and to design a new source, a software and calculation complex is created. It simulates the operation of the reactor taking into account known physical processes, design parameters and properties of core materials. This work presents a description of the model and the results of calculations of reactor dynamics.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2025

ВВЕДЕНИЕ

В Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ (Дубна) с 1960 г. работают уникальные установки для получения и научного применения нейтронов — импульсные реакторы периодического действия (ИРПД). Такие реакторы работают в режиме коротких, часто повторяющихся импульсов мощности, при этом длительность импульса намного меньше периода их повторения [1]. Исследовательские реакторы этого типа используются для экспериментов в области физики твердого тела, ядерной физики и радиационных исследований. Действующий в настоящее время реактор ИБР-2М имеет среднюю мощность 2 МВт и частоту импульсов 5 Гц, по своим характеристикам находится в числе мировых лидеров среди высокопоточных источников нейтронов.

Поскольку технический ресурс установки ИБР-2М заканчивается к середине 2030-х гг., ведется проектирование нового, более мощного импульсного источника нейтронов, основанного на том же принципе [2]. Надежная и безопасная конструкция будущего источника требует достаточно полного понимания всех особенностей работы и процессов, протекающих в реакторе такого типа. ИРПД — сложная динамическая система с множеством обратных связей. Как показал опыт эксплуатации ИБР-2М и его предшественников (ИБР-2, ИБР-30), в периодических импульсных реакторах при некоторых условиях наблюдается нестабильная динамика импульсов мощности. Проблема неустойчивой динамики ИРПД должна быть решена при создании нового источника.

Физические причины появления неустойчивости, как и параметры реактора, приводящие к ней, до сих пор не изучены полностью. Обнаружены и описаны несколько явлений, вызывающих обратную связь и способных приводить к неустойчивой динамике: температурное расширение топливных таблеток [3–7], изгибы твэлов и тепловыделяющих сборок [8], теплопередача в потоке теплоносителя. Также для анализа работы действующих реакторов ИБР-2 и ИБР-2М была разработана и широко применяется модель мощностной обратной связи (МОС) [10–18], основанная на статистической обработке истории мощности импульсов. Это позволило определить общий вид обратной связи в реакторе (импульсную характеристику), что является важным экспериментальным результатом, с которым сопоставляются другие расчетные модели.

Поскольку ИРПД являются уникальными исследовательскими установками, для них не существует аттестованных программных комплексов, которые можно было бы применить для изучения динамики импульсов и проектирования новых источников с учетом особенностей импульсного режима работы. Известные инструменты моделирования [19] стационарных реакторов позволяют рассчитать лишь некоторые характеристики импульсного реактора (критическую массу, среднее энерговыделение, средние температуры и т.п.). Поэтому для исследования особенностей работающих ИРПД и проектирования нового источника создается программно-расчетный комплекс, моделирующий работу реактора с учетом известных физических процессов, параметров конструкции и материалов активной зоны. В настоящей работе приводятся описание математической модели, структура программы и первые результаты расчетов. Обсуждаются перспективы данного подхода к изучению динамики реактора, а также планы дальнейшего развития модели.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

Основными целями математической модели являются:

- изучение причин неустойчивости динамики ИРПД;
- определение параметров устойчивой работы реактора;
- разработка оптимальной конструкции активной зоны нового источника;

- проверка теоретических подходов к изучению динамики ИРПД.

При этом математическая модель в виде компьютерной программы должна решать следующие задачи:

- рассчитывать эволюцию импульсов мощности реактора в рамках одноточечной модели кинетики с учетом запаздывающих нейтронов;
- учитывать влияние на реактивность теплового расширения ядерного топлива;
- учитывать влияние на реактивность термоупругой поперечной деформации основных элементов активной зоны (твэлов, тепловыделяющих сборок — ТВС);
- проводить расчеты с различными значениями частоты модулятора реактивности;
- проводить расчеты с различными вариантами компоновки активной зоны: одиночным твэлом, ансамблем твэлов разной массы, ансамблем твэлов с градиентом энерговыделения, полным набором твэлов (ТВС) активной зоны (в проекте);
- по рассчитанным значениям энергии импульсов вычислять импульсную переходную характеристику обратной связи.

Модель должна иметь возможность введения в рассмотрение и иных механизмов и процессов, влияющих на динамику реактора (движение теплоносителя, автоматический регулятор мощности и др.).

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ И ПРИНЯТЫЕ ДОПУЩЕНИЯ

По аналогии с работами [10–12] для данной модели была выбрана модульная структура программы с алгоритмом расчета «от импульса к импульсу». Это значит, что значения всех переменных, определяющих состояние реактора (энергия импульса, количество источников запаздывающих нейтронов, реактивность и др.), рассчитываются лишь периодически, в моменты импульсов мощности, причем для определения значений переменных в очередном импульсе достаточно знать их значения в предыдущих импульсах. Такой подход основан на ряде обоснованных допущений. Во-первых, подавляющая часть энергии деления выделяется во время импульсов, между которыми реактор находится в подкритическом состоянии (фоновая мощность составляет несколько процентов от средней [2, 7]). Если допустить, что энерговыделение между импульсами равно нулю, то это позволяет пользоваться простыми аналитическими решениями уравнений термоупругости, теплопроводности и радиоактивного распада. Во-вторых, длительность импульса мощности (порядка 200 мкс) мала по сравнению со временем жизни источников запаздывающих нейтронов и периодом механических колебаний основных элементов активной зоны (твэлов, ТВС). Исключение составляет лишь процесс расширения топливных таблеток, о котором будет сказано ниже. Это позволяет рассчитать энергию импульса, учитывая лишь изменение реактивности модулятора, зафиксировав остальные параметры. И, в-третьих, средняя мощность реактора и температура активной зоны меняются в достаточно небольшом диапазоне в рамках задачи изучения устойчивости динамики [12, с. 964]. Допускается независимость всех параметров и свойств материалов от температуры. Благодаря этому допущению уравнения становятся линейными по температуре, что значительно упрощает вычисления.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

С учетом вышеизложенных допущений задача сводится к нахождению последовательности Q_i путем решения системы рекуррентных уравнений. При учете влияния на реактивность только теплового расширения топлива и поперечной деформации твэла эта система выглядит следующим образом:

$$Q_i = S_i M(\rho_i, \nu), \quad (1)$$

$$c_{ji} = (c_{ji-1} + Q_{i-1} \eta \beta_j) e^{-\frac{\lambda_j}{\nu}}, \quad (2)$$

$$S_i = \sum_{j=1}^8 c_{ji} \lambda_j, \quad (3)$$

$$\rho_i = \rho_0 + \rho_{tri} + \rho_{axi}, \quad (4)$$

$$y_{ki} = D(y_{ki-1}), \quad (5)$$

$$\rho_{tri} = \sum_k y_{ki} R_k, \quad (6)$$

$$T_{fi} = (T_{fi-1} + Q_i T_{0f}) e^{-\frac{p}{\nu}}, \quad (7)$$

$$\rho_{axi} = R_{ax} T_{fi}. \quad (8)$$

Динамическими переменными (индекс i означает номер импульса) являются: Q — энергия импульса (МДж), S — скорость генерации запаздывающих нейтронов перед импульсом (нейтронов/с), ρ — реактивность (максимальная надкритичность) в импульсе, c_{ji} — количество источников запаздывающих нейтронов j -й группы перед импульсом (нейтронов), ρ_{tri} — вклад в реактивность от поперечной деформации твэла, ρ_{axi} — вклад в реактивность от расширения топлива, y_k — амплитуды гармоник поперечной деформации твэла (м), T_f — температура топлива (К).

Параметры модели (константы), которые задаются перед началом расчета: ν — частота импульсов (с^{-1}), η — средний выход нейтронов при делении (нейтронов/МДж), β_j — доля запаздывающих нейтронов j -й группы, λ_j — постоянная распада источников j -й группы (с^{-1}), ρ_0 — равновесная надкритичность, соответствующая номинальной мощности импульсов, R_k — коэффициенты реактивности гармоник поперечной деформации твэла (м^{-1}), R_{ax} — коэффициент реактивности по расширению топлива (К^{-1}), T_{0f} — нагрев топлива за импульс единичной мощности (К/МДж), p — средняя скорость остывания топлива (с^{-1}).

Начальными условиями являются значения динамических переменных на первом шаге ($i = 0$), которые приравниваются к средним значениям соответствующих величин при стабильной работе на номинальной мощности.

Физический смысл уравнений (1)–(8), значения констант, а также описание вида оператора D и функции M приводятся ниже.

СТРУКТУРА ПРОГРАММЫ

Блок-схема программы приведена на рис. 1.

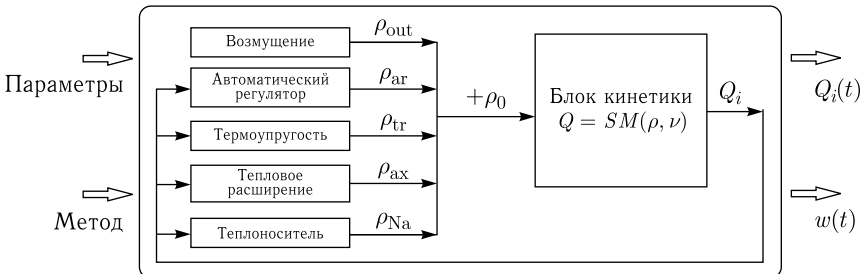


Рис. 1. Блок-схема программы расчета динамики реактора

Перед началом основного цикла расчетов (внешний прямоугольник на блок-схеме) в программу заносятся необходимые параметры и метод расчета. Некоторые из параметров с трудом поддаются оценке, поэтому необходимо иметь возможность изучать зависимость динамики реактора от их значений. Задание *метода* расчета подразумевает выбор способа расчета реактивности ρ в очередном импульсе мощности. Каждый метод представлен в программе отдельным модулем, что позволяет добавлять новые математические модели.

Каждый из блоков программы может быть представлен в нескольких вариантах, что позволяет сравнивать разные способы описания тех или иных процессов. Каждый из блоков вычисления реактивности может включаться и выключаться как перед началом расчета, так и в процессе расчета, это позволяет изучать влияние тех или иных факторов на динамику работы реактора.

В качестве выходных данных программа строит график энергии импульсов Q_i , вычисляет относительную амплитуду колебаний мощности импульсов $\frac{\langle Q_i \rangle}{Q_0} = \max_i \frac{|Q_i - Q_0|}{Q_0}$, а также при необходимости рассчитывает импульсную переходную характеристику. Кроме того, есть возможность построения графиков отдельных компонент реактивности, температуры топлива и стенок твэлов.

Блок кинетики нейтронов. Центральным модулем программы является *блок кинетики*, в котором решаются уравнения (1)–(3) нейтронной кинетики, вычисляются источники запаздывающих нейтронов и энергия очередного импульса Q_i . Используется 8-групповое приближение источников запаздывающих нейтронов [9]. Поскольку модель предназначена для исследования динамики реакторов с разным типом топлива, в программу занесены параметры λ_j и β_j для Pu^{239} и Np^{237} .

Для расчета энергии импульса в одноточечной модели кинетики импульсного реактора [3, 7] необходимо знать интенсивность источников запаздывающих нейтронов S_i перед началом импульса, функцию реактивности модулятора $\varepsilon(t)$ (зависит от конструкции и частоты пульсаций ν) и реактивность ρ .

Размеры модулятора реактивности и вид кривой реактивности известны из проектной документации и расчетов методом Монте-Карло для конкретного реактора. Допускается, что частота пульсаций ν может меняться в интервале от 5 до 15 Гц.

Для вычисления энергии импульса $Q_i = \int_{-t_b}^{t_b} n(t) dt$ численно решалась система уравнений [3]:

$$\dot{n}(t) = \frac{1}{\tau_{\text{in}}} \left(n(t)[\varepsilon(t) + \rho] + \frac{S(t)}{\eta} \right),$$

$$S(t) = \sum_{j=1}^8 c_j(t) \lambda_j, \quad (9)$$

$$\dot{c}_j(t) = -\lambda_j c_j(t) + n(t) \eta \beta_j,$$

где $n(t)$ — мгновенное значение мощности реактора, МВт; t_b — время снижения мощности реактора до фоновое значение после импульса, с; τ_{in} — среднее время жизни мгновенных нейтронов, с. Более точный расчет энергии импульса требует учета теплового расширения топлива в процессе формирования импульса [3]. Как показывают расчеты [4], обратная связь по температуре заметна при достаточно высокой мощности реактора (5–10 МВт) и приводит к усилению отрицательной обратной связи, что повышает устойчивость динамики. Поэтому, пренебрегая этим фактором на данном этапе, мы будем иметь более консервативные оценки стабильности реактора. В таком случае имеет место следующее соотношение [7, с. 113–121]:

$$Q_i = S_i M(\rho, \nu).$$

Функция $M(\rho, \nu)$ найдена путем численного интегрирования уравнений (9) при различных ρ и ν из области допустимых значений. Она вводится в код программы в виде двумерной таблицы. При вычислении функции $M(\rho, \nu)$ с произвольными значениями ρ и ν производится билинейная интерполяция по соседним ячейкам таблицы.

Поскольку длительность импульса (200 мкс) намного меньше периода источников запаздывающих нейтронов (0,1–100 с), количество новых источников вследствие импульса увеличится на $Q\eta\beta_j$. Поскольку мощность $n(t)$ между импульсами близка к нулю, то можно пренебречь генерацией этих источников между импульсами и вычислить их количество по закону радиоактивного распада. Эти рассуждения приводят к уравнению (2).

Величина реактивности ρ , которая поступает на вход блока кинетики, вычисляется как сумма вкладов (4) от отдельных факторов (физических процессов), влияющих на реактивность реактора. Каждый из этих вкладов рассчитывается в отдельном блоке программы, ниже приводится их описание.

Блок теплового расширения. Поскольку тепловое расширение топливных таблеток — процесс достаточно быстрый по сравнению с процессом охлаждения топлива, а величина трения исключает аксиальные колебания и подскоки столба таблеток к моменту следующего импульса [21], то в первом приближении можно вычислять ρ_{ax} как величину, прямо пропорциональную температуре таблеток T_f в момент очередного импульса мощности (8). Температуру таблеток можно рассчитать разными способами, и достаточно точно она описывается соотношением (7) — охлаждением по экспоненте. Параметры T_{0f} и p определяются заранее из теплофизических расчетов активной зоны [22]. Коэффициент R_{ax} также определяется предварительно из нейтронно-физических расчетов методом Монте-Карло или измерений на действующем реакторе [23], он равен из-

менению реактивности при расширении топлива активной зоны вследствие нагревания на 1 К. Разумеется, более точный расчет реактивности по температуре топлива требует учета распределения температуры по объему топливных таблеток, решения задачи термоупругой деформации таблеток, учета градиента энерговыделения и ценности реактивности по активной зоне. Такие поправки будут внесены в модель в будущем.

Блок термоупругости. Учет эффектов термоупругости подразумевает выбор конструкции, способа закрепления отдельного твэла (или ТВС) и способа вычисления реактивности ρ_{tr} , после чего программа использует тот или иной набор параметров и функций. Каждый из вариантов представлен в программе отдельным модулем, что позволяет добавлять новые модели конструкции активной зоны.

Для вычисления добавочной реактивности ρ_{tr} , возникающей вследствие поперечных деформаций твэлов, требуется найти форму (деформацию) этих элементов конструкции к моменту очередного импульса реактора, после чего пересчитать деформацию в реактивность. Вычисление формы твэла обозначено уравнением (5), в котором оператор деформации D переопределяет динамические переменные y_k от импульса к импульсу. В качестве простого примера рассмотрим модуль термоупругости, в котором динамический изгиб рассчитывается для одиночного твэла. Обозначим поперечное смещение твэла относительно исходного состояния покоя через $y(x, t)$, где x — координата вдоль оси стержня, $x \in (0, L)$. Уравнение движения в таком случае может быть записано в виде набора из k одномерных дифференциальных уравнений второго порядка [8]:

$$a\ddot{y}_k + b\dot{y}_k + \alpha_k^4 y_k + \varphi f_k T_s(t) = 0, \quad (10)$$

$$y(x, t) = \sum_k y_k(t) F_k(x).$$

Здесь a — параметр массы твэла, b — параметр трения, φ — параметр градиента энерговыделения в активной зоне, $T_s(t)$ — средняя (по азимуту) температура оболочки твэла в момент времени t , f_k — параметр распределения температуры по оси твэла, α_k и $F_k(x)$ — собственные числа и собственные функции твэла с заданным типом закрепления [20]. Точка означает производную по времени. Все параметры и функции в (10), кроме $T_s(t)$, определяются заранее из конструкции твэла и способа его закрепления. Уравнение (10) интегрируется численно, в расчет берутся первые пять гармоник разложения формы твэла $y(x, t)$.

Вычисление температуры стенок твэла $T_s(t)$ предполагает суммирование вкладов в температуру от всех предыдущих импульсов:

$$T_s(t) = \sum_{l=i-1}^0 \Theta\left(\frac{1}{\nu}(i-l) + t'\right) Q_l, \quad (11)$$

где i — номер импульса, $\Theta(t)$ — рассчитанная численно температура оболочки твэла после одиночного импульса единичной мощности (К/МДж),

t' — интервал времени между последним импульсом и текущим моментом t .

После того, как определены значения y_k к моменту очередного импульса, реактивность ρ_{tr} рассчитывается по форме твэла следующим образом:

$$\rho_{tr} = \int_0^L y(x) \Phi(x) dx = \sum_k y_k \int_0^L F_k(x) \Phi(x) dx = \sum_k y_k R_k.$$

Коэффициенты R_k рассчитываются заранее. Функция $\Phi(x)$, имеющая смысл распределения ценности реактивности по высоте активной зоны, вычисляется с помощью метода Монте-Карло или теоретических оценок.

Модуль *термоупругости* в виде расчета одиночного твэла может быть использован для изучения эффекта динамического изгиба как такового, влияния собственной частоты колебаний твэлов на устойчивость динамики и т. д. Предполагается, что все твэлы в активной зоне движутся синхронно и не взаимодействуют. Для изучения вопроса о влиянии на динамику реактора твэлов с разной массой (и собственной частотой) был создан соответствующий модуль. В нем параллельно рассчитывается движение ансамбля из 12 твэлов разной массы. Реактивность ρ_{tr} вычисляется путем усреднения по твэлам.

Также был создан другой вариант модуля *термоупругости*, в котором каждому из 12 твэлов соответствует определенный градиент энерговыделения φ_n (коэффициент φ из (10)) и вес N_n . Этот метод расчета имитирует расположение 397 твэлов в активной зоне в виде правильного шестигранника, градиент φ_n зависит от расстояния до центра активной зоны, вес N_n равен количеству твэлов в n -м слое.

Кроме того, создавались версии модуля *термоупругости*, в которых учитывалось взаимодействие твэлов (упругие связи, соударения). Эти модели могут быть применены при выборе конструкции активной зоны проектируемого реактора.

Блок автоматического регулятора. Алгоритму автоматического регулятора (АР) реактора ИБР-2 посвящен ряд работ [10, 15–17], в которых решается задача обеспечения наиболее стабильной работы реактора на заданном уровне мощности. Эти алгоритмы могут быть реализованы в программе в виде отдельных модулей АР. Принцип автоматического регулирования состоит в вычислении отклонения одного или нескольких последних импульсов мощности от номинального значения и введения соответствующей корректирующей реактивности ρ_{ar} путем перемещения одного из управляющих стержней. Пример простейшего алгоритма АР:

$$\rho_{ar i} = \rho_{ar i-1} + A \frac{Q_0 - Q_{i-1}}{Q_{i-1}},$$

где $\rho_{ar i}$ и $\rho_{ar i-1}$ — реактивности, вносимые регулятором в настоящем и предыдущем импульсе соответственно, Q_0 — энергия импульса, соот-

ветствующая стабильной работе на заданной мощности, A — константа (определяется эмпирически). Для исследования влияния АР на динамику реактора в программе имеется возможность включать и выключать модуль АР в произвольный момент времени. При этом слагаемое $\rho_{ar\ i}$ добавляется в правую часть уравнения (4).

Блок теплоносителя. Блок *теплоносителя*, находящийся на стадии разработки, создается для учета таких эффектов, как вибрация твэлов в турбулентном потоке жидкого натрия или гидроудар вследствие мгновенного нагрева теплоносителя гамма-квантами. Возможно, для изучения гидродинамических эффектов потребуются эксперименты на стендах.

Блок возмущения. Блок *возмущения* предназначен для внесения внешней (не зависящей от Q_i) реактивности ρ_{out} произвольной амплитуды и длительности. Назначение этого блока состоит в проверке устоявшегося режима работы на стабильность (реакции системы на одиночный импульс повышенной амплитуды), а также в получении параметров импульсной переходной характеристики методом осцилляции реактивности, описанным в следующем пункте. При включении блока *возмущения* слагаемое $\rho_{out\ i}$ добавляется в правую часть уравнения (4).

Вычисление импульсной переходной характеристики. Импульсная переходная характеристика $w(t)$ — это изменение во времени реактивности, вызванное отдельным импульсом. Она является информативной характеристикой реактора, применяемой для анализа устойчивости и моделирования переходных процессов [10–14]. Для ее вычисления по известным значениям Q_i используется алгоритм, описанный в работах [13, 14] по исследованию динамики ИБР-2. После установления стабильной динамики на заданной мощности модуль *возмущения* начинает выдавать ненулевую реактивность ρ_{out} в виде прямоугольных импульсов длиной $2m$ периодов пульсаций реактора (рис. 2).

Программа набирает массив Δe_k из значений относительной мощности импульсов Q_k/Q_0 , где $k = 1, \dots, m$ — порядковый номер импульса, если считать от начала последнего увеличения ρ_{out} . Значения Δe_k усредняются по серии периодов изменения ρ_{out} для снижения статистической погрешности. Далее из доступных динамических переменных создается массив

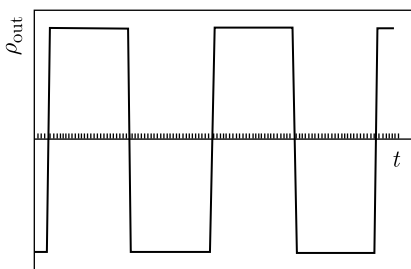


Рис. 2. График ρ_{out} при вычислении импульсной переходной характеристики [13]

Δr_k — отклонение реактивности от базового значения. Используя значения Δe_k и Δr_k , находится дискретная импульсная переходная характеристика МОС w_n :

$$\Delta e^*(i\bar{\omega}) = \sum_{k=1}^m \Delta e_k e^{-i\bar{\omega}k},$$

$$\Delta r^*(i\bar{\omega}) = \sum_{k=1}^m \Delta r_k e^{-i\bar{\omega}k},$$

$$W^*(i\bar{\omega}) = \frac{\Delta r^*(i\bar{\omega})}{\Delta e^*(i\bar{\omega})},$$

$$\begin{aligned} w_n &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} \operatorname{Re} W^*(i\bar{\omega}) \cos(\bar{\omega}n) d\bar{\omega} = \\ &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} \sum_{k=1}^M \frac{\sum_{l=1}^M \Delta r_k \Delta e_l \cos(\bar{\omega}(l-k))}{\Delta e_k^2} \cos(\bar{\omega}n) d\bar{\omega} = \sum_{k=1}^M \frac{\Delta r_k}{\Delta e_k^2} \sum_{l=k \pm n} \Delta e_l, \end{aligned}$$

где $\bar{\omega} = \frac{\omega}{\nu}$, ω — частота, меняющаяся от 0 до π .

Искомая функция $w(t)$ находится путем интерполяции значений w_n .

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Первые расчеты на новой модели ИРПД позволили обнаружить следующее. Нестабильность реактора может быть вызвана, по крайней мере, двумя факторами: температурным расширением топлива и динамическим изгибом твэлов. Природа первого фактора описана в работах [5, 6] и подтверждается расчетами (рис. 3). Влияние второго фактора [1, 8] зависит от нескольких параметров (частоты реактора, величины трения, конструкции твэлов и АЗ) и также подтверждается расчетами (рис. 4).

При некоторых параметрах соударения твэлов друг с другом могут стабилизировать динамику (происходит рассинхронизация изгибных колебаний), пример такого расчета приведен на рис. 5.

Другой способ подавления эффекта динамического изгиба заключается в изготовлении твэлов разной массы. Это приводит к различию собственных частот твэлов и, как следствие, подавлению коллективных резонансных колебаний. Как показывают предварительные расчеты с ансамблем из 12 твэлов, различие твэлов по массе должно составлять 15–20 %.

Анализ результатов расчетов в виде импульсной переходной характеристики расширяет возможности изучения динамики ИРПД, что позволяет проводить сравнения с другими моделями и экспериментальными данными [11–14]. На рис. 6 приведены графики $w(t)$, полученные при измерениях

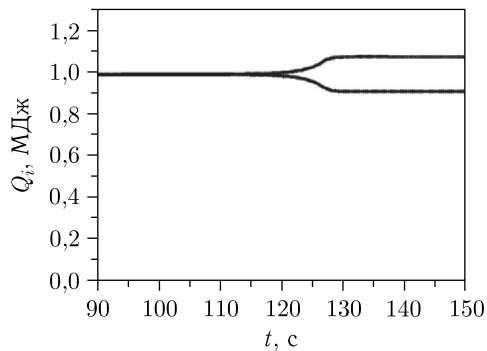


Рис. 3. Энергия импульсов мощности ИРПД. Переход к стохастической динамике вследствие температурного расширения топлива (динамический изгиб и возмущения отключены)

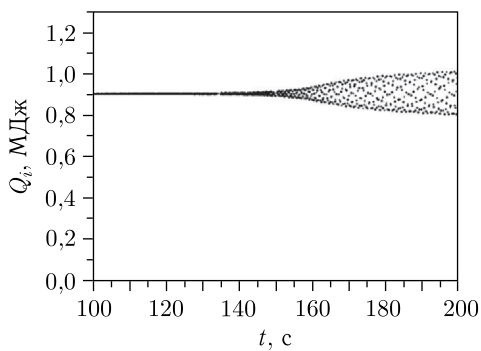


Рис. 4. Энергия импульсов мощности ИРПД. Проявление неустойчивости вследствие динамического изгиба твэлов

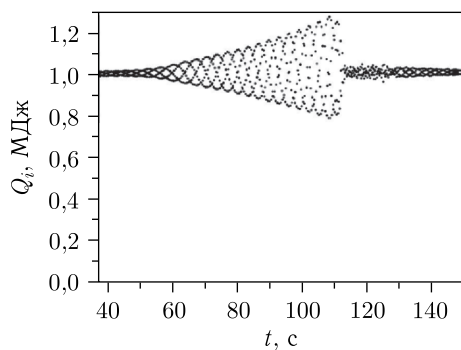


Рис. 5. Энергия импульсов мощности ИРПД. Стабилизация динамики вследствие неупругих соударений твэлов

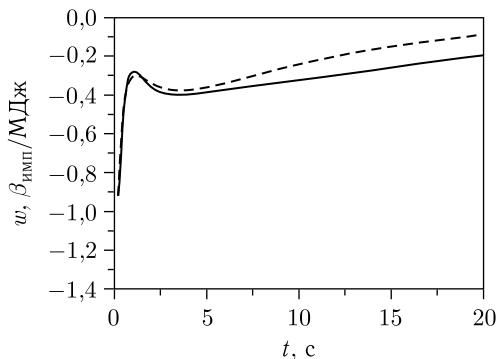


Рис. 6. Импульсная переходная характеристика: результат обработки расчетных данных (сплошная линия) и экспериментальных данных [13] (пунктирная линия)

на реакторе ИБР-2 на мощности 2 МВт [13], а также при расчетах по модели. Видно, что расчетная кривая качественно описывает данные экспериментальной работы. Расхождение может быть объяснено неточным учетом в модели конструкции активной зоны ИБР-2 (наличием ТВС).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданная модель динамики ИРПД позволяет решать возложенные на нее задачи. Модель применима как для разработки конструкции нового импульсного реактора, так и для анализа данных по реактору ИБР-2. Современное состояние модели динамики ИРПД предполагает следующие методы борьбы с нестабильностью:

- изучение границы области стохастической неустойчивости (выбор частоты реактора и мощности);
- выбор оптимальной конструкции активной зоны исходя из собственных частот поперечных колебаний твэлов и частоты реактора;
- изучение величины трения поперечных колебаний (эта величина до сих пор плохо определена, но сильно влияет на результаты расчетов);
- создание твэлов разной массы или жесткости.

Разумеется, модель нельзя назвать завершенной, поскольку новые эффекты, влияющие на работу реактора, будут добавляться в программу по мере их изучения в виде отдельных блоков. Модульная структура программы предполагает дальнейшую разработку, добавление новых моделей расчета и уточнение параметров. После проведения дополнительных расчетных и теоретических работ станет возможным учет эффектов движения теплоносителя, конструкции ТВС и точного распределения температуры. Это потребует значительной переработки модели и решения нелинейных уравнений теплопередачи, но позволит предложить иные методы повышения стабильности реактора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шабалин Е. П.* Три особенности динамики пульсирующего реактора. Сообщ. ОИЯИ Р13-2022-36. 2022.
2. *Шабалин Е. П., Аксенов В. Л., Комышев Г. Г., Рогов А. Д.* Высокопоточный импульсный исследовательский реактор на основе нептуния // АЭ. 2018. Т. 124, вып. 6.
3. *Рзянин М. В., Шабалин Е. П.* К вопросу динамики импульса мощности реактора «НЕПТУН» — сравнение моделей расчета // Вопр. атом. науки и техники. 2021. Вып. 1.
4. *Шабалин Е. П., Рзянин М. В.* Динамика импульсов мощности в исследовательском реакторе с нептуниевым ядерным топливом // АЭ. 2018. Т. 124, вып. 4.
5. *Шабалин Е. П.* О колебаниях мощности и пределе устойчивости импульсных реакторов // АЭ. 1986. Т. 61, вып. 6.
6. *Шабалин Е. П.* Стохастическая динамика импульсного реактора периодического действия. Сообщ. ОИЯИ Р11-90-219. 1990.
7. *Шабалин Е. П.* Импульсные реакторы на быстрых нейтронах. М.: Атомиздат, 1976.
8. *Верхоглядов А. Е.* Уравнение плоских вынужденных поперечных колебаний стержня под действием температуры. Численно-аналитическое решение // Письма в ЭЧАЯ. 2023. Т. 20, № 4(249). С. 657–668.
9. *Springs G. D., Campbell J. M., Piksaikin V. M.* An 8-Group Delayed Neutron Model Based on a Consistent Set of Half-Lives // Prog. Nucl. Energy. 2002. V. 41, No. 1–4. V. 223–251.
10. *Пепельшев Ю. Н., Сумхуу Д.* Оптимизация автоматического регулирования мощности импульсного реактора ИБР-2М при наличии неустойчивости. Сообщ. ОИЯИ Р13-2021-30. 2021.
11. *Пепельшев Ю. Н., Попов А. К.* Оценка параметров мощностной обратной связи и устойчивости импульсного реактора ИБР-2 при разных уровнях средней мощности. Сообщ. ОИЯИ Р13-2006-101. 2006.
12. *Бондарченко Е. А., Пепельшев Ю. Н., Попов А. К.* Экспериментальное и модельное исследование особенностей динамики импульсного реактора периодического действия ИБР-2 // ЭЧАЯ. 2004. Т. 35, вып. 4. С. 928–983.
13. *Шабалин Е. П., Анципов Н. П., Злоказов В. Б., Мельников В. Н., Пепельшев Ю. Н., Попов А. К., Рогов А. Д.* Импульсная характеристика обратной связи в ИБР-2 // АЭ. 1991. Т. 70, вып. 5. С. 326–328.
14. *Попов А. К.* Частотная и импульсная переходная характеристики мощностной обратной связи импульсного реактора ИБР-2. Сообщ. ОИЯИ Р13-90-203. 1990.
15. *Попов А. К., Марачев А. А.* О статистически оптимальных алгоритмах регулирования для различных режимов работы импульсного реактора. Сообщ. ОИЯИ Р13-2002-277. 2002.
16. *Марачев А. А., Пепельшев Ю. Н., Попов А. К., Сумхуу Д.* Анализ динамики импульсного реактора ИБР-2М при статистически оптимальном автоматическом регуляторе // АЭ. 2007. Т. 123, вып. 3. С. 172–176.
17. *Бондарченко Е. А., Пепельшев Ю. Н., Попов А. К.* Влияние параметров автоматического регулятора на переходные процессы мощности реактора ИБР-2. Сообщ. ОИЯИ Р13-99-200. 1999.
18. *Попов А. К.* Основы управления ядерным реактором. М.: МГУ, 2012.

19. *Третьякевич С. С., Сперанский Ф. А.* Программные средства, применяемые для анализа и обоснования безопасности атомной электростанции в части нейтронно-физических вычислений // Вестн. Ун-та гражд. защиты МЧС Беларуси. 2017. Т. 1, № 3.
20. *Перепелкин Е. Е., Верхоглядов А. Е., Кушнир И. В., Клименко М. В.* Собственные частоты и собственные функции составного стержня // Письма в ЭЧАЯ. 2024. Т. 21. № 2. С. 175–185.
21. *Ломидзе В. Л., Мелихов В. В., Рогов А. Д., Шабалин Е. П.* Экспериментальное исследование эффектов теплового удара в твэле импульсного реактора периодического действия ИБР-2. Сообщ. ОИЯИ. 1978.
22. *Ким Тхэ Гюн, Пепельшев Ю. Н., Рогов А. Д.* Методика теплофизического анализа твэла реактора ИБР-2. Сообщ. ОИЯИ. 2010.
23. *Ли Ен Чхан, Пепельшев Ю. Н.* Изменение быстрых эффектов реактивности в процессе работы реактора ИБР-2. Сообщ. ОИЯИ. 2008.

Получено 14 февраля 2025 г.

Редактор *Е. В. Григорьева*

Подписано в печать 28.03.2025.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 105 экз. Заказ № 61068.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/