

Требуемая плотность потока тепловых нейтронов $8 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ для нового реактора, продиктованная перспективными направлениями исследований за пределами 2040 г., достигается в центральной ловушке активной зоны при эксплуатации на мощности 22 МВт.

Следует также отметить расширенный по сравнению с вариантом значительной модернизации исследовательский функционал нового реактора и возможность обеспечения непрерывности экспериментальных программ при условии его сооружения до окончания срока эксплуатации ИВВ-2М.

Предлагаемый к сооружению на новой экспериментальной базе АО «ИРМ» реактор УРАЛ

имеет технические параметры, которые позволят сохранить существующие направления деятельности по научным и производственным задачам, включая материаловедческие исследования топлива, поглощающих и конструкционных материалов, в том числе реакторные эксперименты в рамках специальных тематик и наработку радиоизотопов. Кроме того, будет обеспечено освоение прогрессивных направлений реакторных технологий, актуальных для развивающейся ядерной энергетики и наработки материалов с востребованными более высокими потребительскими характеристиками.

Поступила в Редакцию 27.02.24

УДК 621.039.51

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

Верхоглядов А.Е., Верхоглядова В.Н., Шабалин Е.П. (ОИЯИ, г. Дубна)

e-mail: verhoglyadov_al@mail.ru

Импульсные реакторы периодического действия работают в режиме коротких, часто повторяющихся импульсов мощности, с длительностью импульса намного меньше периода повторения [1]. 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, частоту импульсов 5 Гц, по своим характеристикам находится в числе мировых лидеров среди высокопоточных источников нейтронов.

Ресурс ИБР-2М заканчивается к середине 2030-х гг., поэтому проектируется более мощный импульсный источник нейтронов, основанный на том же принципе [2]. Надежная и безопасная эксплуатация будущего источника требует понимания особенностей его работы и протекающих в нем процессов. 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, что может приводить к значительным колебаниям средней мощности или срабатыванию аварийной защиты.

Физические причины появления неустойчивости, как и параметры реактора, приводящие к ней, полностью не изучены. Известны несколько явлений, вызывающих обратную связь и способных приводить к неустойчивой динамике: температурное расширение топлива, изгибы твэлов и ТВС, теплопередача в потоке теплоносителя [3—5]. Для анализа работы действующих ИБР-2 и ИБР-2М была разработана и широко применяется модель МОС, основанная на статистической обработке истории импульсов [6—8]. Это позволило определить общий вид обратной связи в реакторе (импульсную характеристику), что является важным экспериментальным результатом, с которым сопоставляются другие расчетные модели.

Для импульсных реакторов нет аттестованных программных комплексов, с помощью которых можно было бы рассчитывать динамику импульсов и проектировать новые источники с учетом особенностей импульсного режима. Известные инструменты моделирования стационарных реакторов позволяют рассчитать лишь некоторые характеристики импульсного реактора (критическую массу, среднее энерговыделение, среднюю температуру и др.) [9]. Поэтому

для исследования особенностей работающих реакторов и проектирования нового источника создается программно-расчетный комплекс, моделирующий их работу с учетом физических процессов, параметров конструкции и материалов активной зоны. В настоящей работе описываются математическая модель, структура программы и приводятся первые результаты расчетов. Кроме того, 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 импульсного реактора;

определение параметров устойчивой работы;

разработка оптимальной активной зоны;

проверка теоретических подходов к изучению динамики.

Математическая модель должна решать следующие задачи:

рассчитывать эволюцию импульсов мощности реактора в рамках одноточечной модели кинетики с учетом запаздывающих нейтронов;

учитывать влияние на реактивность теплового расширения топлива;

учитывать влияние на реактивность термоупругой поперечной деформации основных элементов активной зоны (ТВЭЛов, ТВС);

проводить расчеты с различной частотой модулятора реактивности;

проводить расчеты с разными вариантами компоновки активной зоны: одиночный ТВЭЛ, группа ТВЭЛов с разной массой, энерговыделением, полный набор ТВЭЛов (ТВС) активной зоны (в проекте);

рассчитывать по найденной энергии импульсов импульсную переходную характеристику обратной связи;

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

Описание модели и принятые допущения. Для данной модели выбрана модульная структура программы с алгоритмом расчета от импульса к импульсу. Это означает, что переменные, определяющие состояние реактора (энергия импульса, количество источников за-

паздывающих нейтронов, реактивность и др.), рассчитываются периодически, в моменты импульсов мощности, для определения переменных в очередном импульсе достаточно знать их значения в предыдущих импульсах. Такой подход основан на нескольких обоснованных допущениях.

Основная часть энергии выделяется во время импульсов, между которыми реактор находится в подкритическом состоянии [6]. Если допустить, что энерговыделение между импульсами равно нулю, то это позволит пользоваться простыми аналитическими решениями уравнений термоупругости, теплопроводности и радиоактивного распада.

Длительность импульса мощности (~200 мкс) мала по сравнению с временем жизни источников запаздывающих нейтронов и периодом механических колебаний основных элементов активной зоны (ТВЭЛов, ТВС). Исключение составляет тепловое расширение топлива. Это позволит рассчитывать энергию импульса, учитывая лишь изменение реактивности модулятора, зафиксировав остальные параметры.

Средняя мощность реактора и температура активной зоны изменяются в небольшом диапазоне в рамках изучения устойчивости динамики [6]. 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 изложенных допущений задача сводится к нахождению последовательности импульсов энергии Q_i путем решения системы рекуррентных уравнений. При учете влияния на реактивность только теплового расширения топлива и поперечной деформации ТВЭЛА эта система имеет вид

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

$$c_{ji} = (c_{ji-1} + Q_{i-1} \eta \beta_j) \exp(-\lambda_j / v); \quad (2)$$

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

$$\rho_i = \rho^0 + \rho_i^{\text{tr}} + \rho_i^{\text{ax}}; \quad (4)$$

$$y_{ki} = D(y_{ki+1}); \quad (5)$$

$$\rho_i^{\text{tr}} = \sum_k y_{ki} R_k; \quad (6)$$

$$T_i^f = (T_{i-1}^f + Q_i T^{f0}) \exp(-p/v); \quad (7)$$

$$\rho_i^{\text{ax}} = R^{\text{ax}} T_i^f. \quad (8)$$

Динамическими переменными (индекс i означает номер импульса) являются Q_i — энергия импульса, МДж; S_i — скорость генерации запаздывающих нейтронов перед импульсом, с^{-1} ; ρ_i — реактивность (максимальная надкритичность) в импульсе; c_{ji} — количество ядер источников запаздывающих нейтронов j -й группы перед импульсом; $\rho_i^{\text{tr}}, \rho_i^{\text{ax}}$ — вклад в реактивность поперечной деформации твэла и теплового расширения топлива соответственно; y_{ki} — амплитуда гармоник поперечной деформации твэла, м; T_i^f — температура топлива, К.

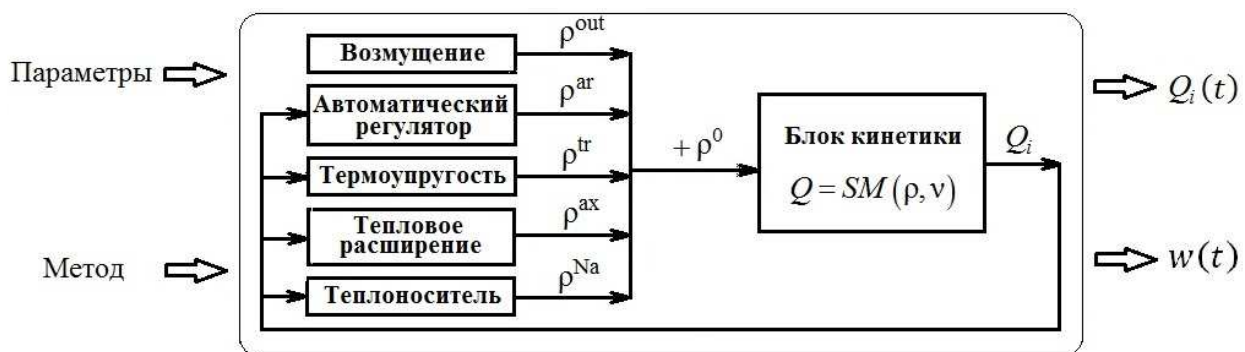
Параметрами модели (константами) являются v — частота импульсов, с^{-1} ; η — средний выход нейтронов при делении, МДж $^{-1}$; β_j — доля запаздывающих нейтронов j -й группы; λ_j — постоянная распада источников j -й группы, с^{-1} ; ρ^0 — равновесная надкритичность, соответствующая номинальной мощности импульсов; R_k — коэффициент реактивности гармоник поперечной деформации твэла, м^{-1} ; R^{ax} — коэффициент реактивности по тепловому расширению топлива, К^{-1} ; T^{f0} — нагрев топлива за импульс единичной мощности, К/МДж; p — средняя скорость остывания топлива, с^{-1} .

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

Структура программы. Блок-схема программы показана на рис. 1. Некоторые задаваемые параметры трудно поддаются оценке, поэтому необходимо иметь возможность изучать зависимость динамики реактора от их значений. Задание метода расчета подразумевает выбор способа определения реактивности ρ_i в очередном импульсе мощности. Каждый метод представлен в программе отдельным модулем, что позволяет вводить новые математические модели. Каждый блок программы может быть представлен в нескольких вариантах, что позволяет сравнивать разные способы описания тех или иных процессов. Каждый блок вычисления реактивности может включаться и выключаться как перед началом расчета, так и в его процессе, что позволяет изучить влияние тех или иных факторов на динамику работы реактора.

В качестве выходных данных программа строит график энергии импульсов Q_i , а также при необходимости вычисляет импульсную переходную характеристику $w(t)$. Кроме того, есть возможность построения графиков отдельных компонентов реактивности, температуры топлива и оболочки твэлов.

Блок возмущения. Он предназначен для внесения внешней, не зависящей от предыдущих импульсов реактивности ρ^{out} произвольной амплитуды и длительности. Назначение этого блока состоит в проверке устоявшегося режима работы на стабильность (реакция системы на одиночный импульс повышенной амплитуды), а также в расчете параметров импульсной переходной характеристики методом осцилляции реактивности. При включении этого блока слагаемое ρ_i^{out} добавляется в правую часть уравнения (4).



Р и с. 1. Блок-схема программы расчета динамики реактора

Блок автоматического регулятора (АР).

Алгоритм автоматического регулятора может быть реализован в программе в виде отдельных модулей. Принцип автоматического регулирования состоит в вычислении отклонения одного или нескольких последних импульсов мощности от номинального значения и введения соответствующей корректирующей реактивности $\rho^{\text{ар}}$ путем перемещения одного из управляющих стержней [10]. Пример простейшего алгоритма АР таков:

$$\rho_i^{\text{ар}} = \rho_{i-1}^{\text{ар}} + A \frac{Q_0 - Q_{i-1}}{Q_{i-1}},$$

где $\rho_i^{\text{ар}}$, $\rho_{i-1}^{\text{ар}}$ — реактивность, вносимая регулятором в настоящем и предыдущем импульсе соответственно; A — константа (определяется эмпирически); Q_0 — энергия импульса, соответствующая стабильной работе на заданной мощности. Для исследования влияния автоматического регулятора на динамику реактора в программе имеется возможность включать и выключать модуль АР в произвольный момент времени. При этом слагаемое $\rho_i^{\text{ар}}$ добавляется в правую часть уравнения (4).

Блок термоупругости. Учет эффектов термоупругости подразумевает выбор конструкции твэла или ТВС, способов их закрепления и вычисления реактивности $\rho^{\text{тр}}$, после чего программа использует тот или иной набор параметров и функций. Каждый вариант представлен в программе отдельным модулем, что позволит вводить новые модели активной зоны.

Для вычисления дополнительной реактивности $\rho^{\text{тр}}$, возникающей вследствие поперечной деформации твэлов, требуется найти форму (деформацию) этих элементов конструкции к очередному импульсу 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 как $y(x, t)$, где x — координата вдоль оси стержня, $x \in (0, L)$. Уравнение движения в таком слу-

чае может быть записано в виде набора из k одномерных дифференциальных уравнений второго порядка [5]:

$$a\ddot{y}_k(t) + b\dot{y}_k(t) + \alpha_k^4 y_k(t) + \varphi f_k T^s(t) = 0; \\ y(x, t) = \sum_k y_k(t) F_k(x), \quad (9)$$

где a — массовый параметр; b — параметр трения; α_k , $F_k(x)$ — собственные числа и собственные функции твэла с заданным типом закрепления; φ — градиент энерговыделения в активной зоне; f_k — коэффициент распределения температуры по оси твэла; $T^s(t)$ — средняя (по азимуту) температура оболочки твэла в момент времени t [11]. Точка над символом означает производную по времени. Все параметры определяются заранее из конструкции твэла и способа его закрепления, уравнение (9) интегрируется численно, в расчет берут первые пять гармоник разложения формы твэла $y(x, t)$.

Вычисление температуры оболочки твэла $T^s(t)$ предполагает суммирование вклада в температуру от всех предыдущих импульсов:

$$T^s(t) = \sum_{l=1}^0 \theta \left(\frac{i-l}{v} + t' \right) Q_l,$$

где i — номер импульса; $\theta(t)$ — рассчитанная численно зависимость температуры оболочки твэла от времени после импульса единичной мощности, К/МДж; t' — интервал времени между последним импульсом и текущим моментом t .

После определения гармоник y_k к моменту очередного импульса реактивность $\rho^{\text{тр}}$ рассчитывается следующим образом:

$$\rho^{\text{тр}} = \int_0^L y(x) \Phi(x) dx = \sum_k y_k \int_0^L F_k(x) \Phi(x) dx = \sum_k y_k R_k.$$

Это соответствует уравнению (6). 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 др. Предполагается, что все твэлы в активной зоне изгибаются синхронно и не взаимодействуют. Для изучения влияния на динамику реактора твэлов с разной массой и собственной частотой был создан соответствующий модуль. В нем параллельно рассчитывается движение группы из 12 твэлов с разной массой. 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 в уравнении (9) 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 числу твэлов в n -м слое.

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

Блок теплового расширения. Поскольку тепловое расширение топлива — процесс достаточно быстрый по сравнению с его охлаждением, а трение исключает аксиальные колебания и резкое перемещение таблеток к моменту следующего импульса [12], 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) — охлаждение по экспоненте. Параметры T^{f0} и p определяются заранее из теплофизических расчетов активной зоны. Коэффициент R^{ax} также определяется предварительно из нейтронно-физических расчетов Монте-Карло или измерений на действующем реакторе, он равен изменению реактивности при расширении топливных таблеток вследствие нагревания на 1 градус [13]. Более точный расчет реактивности требует учета распределения температуры по объему таблеток, определения их термоупругой деформации, учета распределения энерговыделения и ценности реактивно-

сти по активной зоне. Такие поправки будут внесены в модель в будущем.

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

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

Для расчета энергии импульса в односточной модели кинетики импульсного реактора необходимо знать интенсивность источников запаздывающих нейтронов S_i перед началом импульса, функцию реактивности модулятора $\varepsilon(t)$ и реактивность ρ . Функция $\varepsilon(t)$ определяется из частоты пульсаций ν , проектной документации и расчетов Монте-Карло для конкретного реактора. Допускается, что частота пульсаций ν может изменяться в интервале 5—15 Гц. Для вычисления энергии импульса Q_i численно решалась система уравнений [4, 14]

$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(n(t) [\varepsilon(t) + \rho] + \frac{S(t)}{\eta} \right);$$

$$S(t) = \sum_{j=1}^8 c_j(t) \lambda_j; \quad (10)$$

$$\frac{dc_j}{dt} = -\lambda_j c_j(t) + n(t) \eta \beta_j;$$

$$Q_i = \int_{-t_b}^{t_b} n(t) dt,$$

где τ — среднее время жизни мгновенных нейтронов, с; $n(t)$ — мгновенная мощность реактора, МВт; t_b — время снижения мощности реактора до фоновой после импульса, с. Более точный расчет энергии импульса требует учета теплового расширения топлива при формировании импульса [4]. Как показывают расчеты, об-

ратная связь по температуре заметна при мощности реактора 5—10 МВт и приводит к усилению отрицательной обратной связи, что повышает устойчивость динамики [15]. Поэтому, пренебрегая этим фактором на данном этапе, будем иметь более консервативные оценки стабильности реактора. В таком случае имеет место соотношение [4]

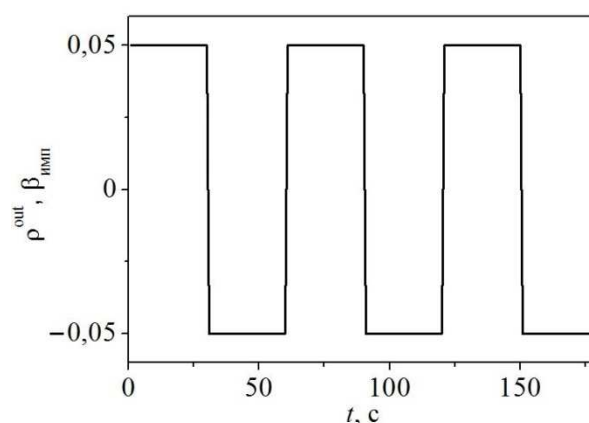
$$Q_i = S_i M(\rho, \nu).$$

Функция $M(\rho, \nu)$ найдена путем численного интегрирования уравнений (10) при разных реактивности ρ и частоте импульсов ν из области допустимых значений. Она вводится в код программы в виде двумерной таблицы. При вычислении функции $M(\rho, \nu)$ с произвольными значениями реактивности и частоты импульсов проводится билинейная интерполяция по соседним ячейкам таблицы.

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

Реактивность ρ на входе блока кинетики вычисляется как сумма вкладов [см. уравнение (4)] отдельных физических процессов, влияющих на нее. Каждый вклад рассчитывается в отдельном блоке программы.

Вычисление импульсной переходной характеристики. Импульсная переходная характеристика $w(t)$ — это изменение во времени реактивности, вызванное отдельным импульсом. Она является информативной характеристикой реактора для анализа устойчивости и моделирования переходных процессов. Для ее вычисления по известной энергии импульсов Q_i используется следующий алгоритм [7, 14]. После установления стабильной динамики на заданной мощности модуль возмущения начинает выдавать ненулевую реактивность ρ^{out} в виде прямоугольных импульсов длительностью $2m$ периодов пульсаций реактора (рис. 2).



Р и с. 2. Реактивность ρ^{out} при вычислении импульсной переходной характеристики

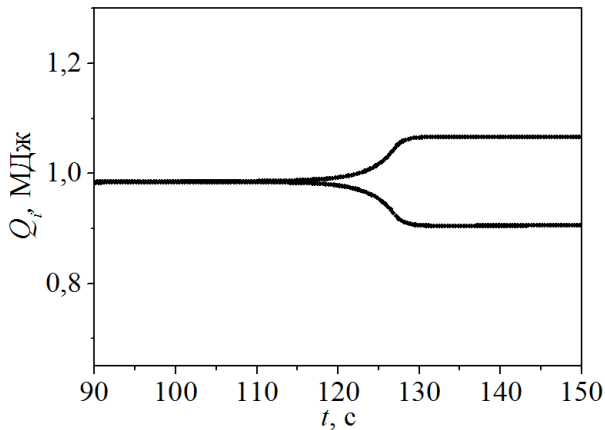
Программа набирает массив значений относительной энергии импульсов $\Delta e_k = Q_k / Q_0$, где $k = 1, \dots, m$ — порядковый номер импульса, считая от начала последнего увеличения реактивности ρ^{out} ; Q_0 — энергия импульса в стабильном режиме. Относительная энергия Δe_k усредняется по серии периодов изменения реактивности для снижения статистической погрешности. Далее из доступных динамических переменных создается массив Δr_k — отклонение реактивности от базовой. По полученным данным находится дискретная импульсная переходная характеристика

$$w_n = \frac{1}{Q_0} \sum_{k=1}^m \frac{\Delta r_k}{\Delta e_k^2} \sum_{l=k \pm n} \Delta e_l.$$

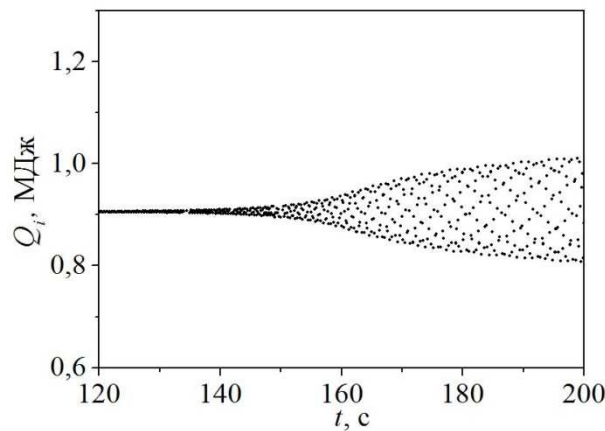
Искомая функция $w(t)$ находится путем интерполяции значений дискретной импульсной переходной характеристики.

Результаты расчетов. Первые расчеты с помощью новой модели импульсного реактора периодического действия позволили сделать некоторые выводы. Нестабильность реактора может быть вызвана, по крайней мере, двумя факторами: тепловое расширение топлива и динамический изгиб твэлов. Природа первого явления описана в работе [3] и подтверждается расчетами (рис. 3). Влияние второго фактора [1, 5] зависит от нескольких параметров (частота реактора, трение, конструкция твэлов и активной зоны) и также подтверждается расчетами (рис. 4).

При некоторых параметрах соударения твэлов могут стабилизировать динамику (происхо-



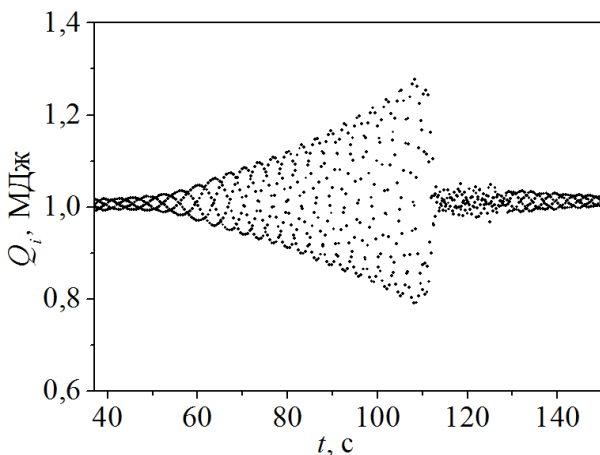
Р и с. 3. Энергия импульсов мощности — переход к стохастической динамике вследствие теплового расширения топлива (динамический изгиб и возмущения отключены)



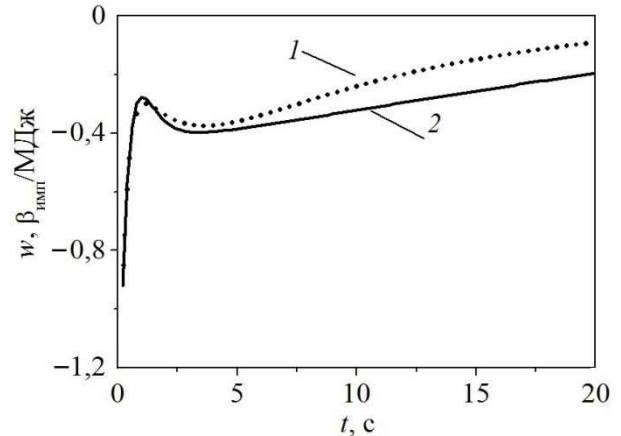
Р и с. 4. Энергия импульсов мощности — проявление неустойчивости вследствие динамического изгиба ТВЭлов

дит рассинхронизация изгибных колебаний). Пример такого расчета показан на рис. 5.

Другой способ подавления эффекта динамического изгиба заключается в изготовлении ТВЭлов с разной массой. Это приводит к различию собственных частот ТВЭлов и подавляет коллективные резонансы колебаний. Как пока-



Р и с. 5. Энергия импульсов мощности — стабилизация динамики вследствие неупругих соударений ТВЭлов



Р и с. 6. Измеренная на ИБР-2 (1) и расчетная (2) импульсная переходная характеристика

зывают предварительные расчеты с группой из 12 ТВЭлов, отличие ТВЭлов по массе должно составлять 15—20%.

Анализ расчетов в виде импульсной переходной характеристики расширяет возможности изучения динамики импульсных реакторов периодического действия, позволяя проводить сравнения с другими моделями и экспериментальными данными [6—8]. На рис. 6 показана измеренная на ИБР-2 на мощности 2 МВт и рассчитанная по рассматриваемой модели импульсная переходная характеристика [7]. Видно, что расчетная кривая качественно описывает данные экспериментальной работы. Расхождение может быть объяснено неточным учетом в модели конструкции активной зоны ИБР-2 (наличие ТВС).

Заключение. Созданная модель динамики импульсного реактора периодического действия применима как для разработки нового импульсного реактора, так и для анализа данных ИБР-2. Современное состояние модели динамики предполагает следующие методы повышения стабильности:

- изучение границы области стохастической неустойчивости (выбор частоты реактора и мощности);

- выбор оптимальной активной зоны, исходя из собственных частот поперечных колебаний ТВЭлов и частоты реактора;

- изучение трения при поперечных колебаниях ТВЭлов (размер трения до сих пор недостаточно точно определен, но сильно влияет на расчеты);

- создание ТВЭлов с разной массой или жесткостью.

Модель нельзя назвать завершенной, поскольку новые эффекты, влияющие на работу реактора, будут вводиться в программу по мере их изучения в виде отдельных блоков. Модульная структура программы предполагает дальнейшую разработку, добавление новых моделей расчета и уточнение параметров. После дополнительных расчетных и теоретических работ станет возможным учет течения 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. — Атомная энергия, 2022, т. 133, вып. 2, с. 76—81.
2. Шабалин Е.П., Аксенов В.Л., Комышев Г.Г., Рогов А.Д. Высокопоточный импульсный исследовательский реактор на основе нептуния. — Там же, 2018, т. 124, вып. 6, с. 309—314.
3. Шабалин Е.П. Стохастическая динамика импульсного реактора периодического действия. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 1991, вып. 4, с. 3—9.
4. Шабалин Е.П. Импульсные реакторы на быстрых нейтронах. М.: Атомиздат, 1976. 248 с.
5. 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.
6. Бондарченко Е.А., Пепельшев Ю.Н., Попов А.К. Экспериментальное и модельное исследование особенностей динамики импульсного реактора периодического действия ИБР-2. — Физика элементарных частиц и атомного ядра, 2004, т. 35, вып. 4, с. 928—983.
7. Шабалин Е.П., Анцупов Н.П., Злоказов В.Б. и др. Импульсная характеристика обратной связи в ИБР-2. — Атомная энергия, 1991, т. 70, вып. 5, с. 326—328.
8. Попов А.К. Частотная и импульсная переходная характеристики мощностной обратной связи импульсного реактора ИБР-2: Сообщение ОИЯИ Р13-90-203, 1990.
9. Третьякевич С.С., Сперанский Ф.А. Программные средства, применяемые для анализа и обоснования безопасности атомной электростанции в части нейтронно-физических вычислений. — Вестник Ун-та гражданской защиты МЧС Беларуси, 2017, т. 1, № 3, с. 361—372.
10. Попов А.К., Марачев А.А. О статистически оптимальных алгоритмах регулирования для различных режимов работы импульсного реактора: Сообщение ОИЯИ Р13-2002-277, 2002.
11. 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(253), с. 175—185.
12. 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: Сообщение ОИЯИ 3-11551, 1978.
13. Ли Ен Чхан, Пепельшев Ю.Н. Изменение быстрых эффектов реактивности в процессе работы реактора ИБР-2: Сообщение ОИЯИ Р13-2008-1, 2008.
14. Попов А.К. Основы управления ядерным реактором. М.: МГУ, 2012. 208 с.
15. Шабалин Е.П., Рзянин М.В. Динамика импульсов мощности в исследовательском реакторе с нептуниевым ядерным топливом. — Атомная энергия, 2018, т. 124, вып. 4, с. 193—197.

Поступила в Редакцию 7.12.24

УДК 621.039.515,004.032.26

УТОЧНЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕАКТОРА ПРИ СУТОЧНОМ ГРАФИКЕ НАГРУЗКИ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Дегтярев А.М. (НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва),

Серянина О.А. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва)

e-mail: degtyarev_am@nrcki.ru

В настоящее время нейронные сети благодаря универсализму и высокой адаптационной способности к моделированию рассматриваемых явлений находят все большее применение, в том числе в ядерной энергетике, например, для анализа безопасности [1—3]. Этому способствует в том числе относительная простота их реа-

лизации, при которой роль пользователя ограничивается подготовкой обучающих данных и подбором принципиальной схемы сети, параметры которой далее настраиваются ею самостоятельно в процессе обучения. По сравнению с традиционным математическим моделированием нейронные сети, подстраиваясь под