

P13-2025-30

А. Е. Верхоглядов

ИЗМЕРЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЭЛА
ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА
НА СТЕНДЕ ВИБРОДИАГНОСТИКИ

Направлено в «Журнал технической физики»

Измерения механических свойств твэла импульсного реактора на стенде вибродиагностики

С целью уточнения параметров математической модели реактора периодического действия и разработки конструкции активной зоны нового источника нейтронов был изготовлен стенд вибродиагностики модельных твэлов. Описываются устройство стенда и задачи, которые планируется на нем решать. Результаты первых измерений сравниваются с данными численного моделирования. Обсуждаются перспективы дальнейших экспериментов и развития приборной базы стенда.

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

Measurements of Mechanical Properties of Fuel Elements of a Pulsed Reactor on a Vibration Diagnostics Stand

In order to verify the parameters of the mathematical model of a periodic pulsed reactor and to develop the design of the active zone of a new neutron source, a vibration diagnostics stand for model fuel elements was manufactured. The work describes the structure of the stand and the tasks that are planned to be solved on it. The results of the first measurements are compared with numerical simulations. Prospects for further experiments and development of the stand's instrumentation are discussed.

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

ВВЕДЕНИЕ

В Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ведется проектирование нового исследовательского источника нейтронов на основе импульсного реактора периодического действия [1]. В процессе выбора конструкции активной зоны возникла задача моделирования динамики импульсного реактора периодического действия с учетом термоупругих деформаций твэлов и тепловыделяющих сборок [2]. Было показано, что наличие в активной зоне подвижных элементов конструкции может приводить к нестабильной динамике [3]. Результаты математического моделирования нестационарной термоупругой деформации, а также динамики реактора сильно зависят от параметров трения и собственных частот твэлов. Эти механические параметры могут быть найдены путем численных и аналитических расчетов [4], однако их точность сложно оценить по причине сложности конструкции твэла. В связи с этим был разработан стенд вибродиагностики для измерения указанных параметров на полномасштабных модельных твэлах. Помимо изучения свойств самого твэла и проверки расчетов целью создания стенда является изучение гидродинамических эффектов, влияющих на работу импульсного реактора, а именно влияние жидкой среды теплоносителя на поперечные колебания твэла и взаимодействие группы твэлов в жидкости.

В работе описываются устройство стенда, ряд задач, которые планируются на нем решать, а также результаты первых измерений. Приводится сравнение измеренных значений с данными численного моделирования. Обсуждаются перспективы дальнейших экспериментов и развития приборной базы стенда.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В данной работе изучаются механические свойства отдельного одиночного твэла для проектируемого реактора «Нептун» [1]. Для математического описания поперечных термоупругих деформаций требуются значения собственных частот первых 2–3 гармоник, а также времени затухания свободных поперечных колебаний [5]. Одному из вариантов компоновки активной зоны проектируемого реактора соответствует жесткое закрепление твэла с одного конца и свобода перемещения на втором конце. В настоящей работе применялся только этот тип закрепления.

Модельный твэл представляет собой полномасштабный прототип проектного твэла реактора (рис. 1). Отличия заключаются в замене топливных таблеток на имитаторы из сплава ВНЖ-7-3 идентичной массы, а также в марке стали корпуса твэла.

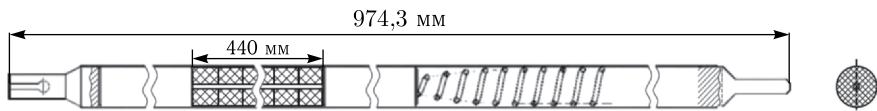


Рис. 1. Эскиз твэла реактора «Нептун»

Твэл состоит из корпуса в виде стальной трубки диаметром 18 мм с двумя заглушками, внутри находятся нижний отражатель, столб из 44 таблеток, верхний отражатель и поджимающая пружина. Все размеры, масса деталей, а также механические параметры материалов модельного твэла соответствуют проектному твэлу.

Были поставлены следующие задачи:

- измерить частоту свободных колебаний модельного твэла «Нептун» на воздухе и в жидкости (воде) при комнатной температуре;
- измерить время затухания свободных колебаний модельного твэла «Нептун» при тех же условиях;
- определить погрешности;
- сравнить результаты измерений с численным расчетом по модели присоединенной массы.

ОПИСАНИЕ СТЕНДА

Стенд вибродиагностики (рис. 2) состоит из массивной стальной плиты, которая служит основанием и исключает посторонние вибрации, алюминиевой рамы для закрепления твэла и стального кожуха для проведения измерений в жидкости.

Верхний и нижний узлы крепления имеют сменные крепежные втулки, что позволяет изучать разные способы закрепления твэлов, а также устанавливать до семи твэлов одновременно. На раме параллельно твэлам расположены два алюминиевых профиля для установки датчиков.

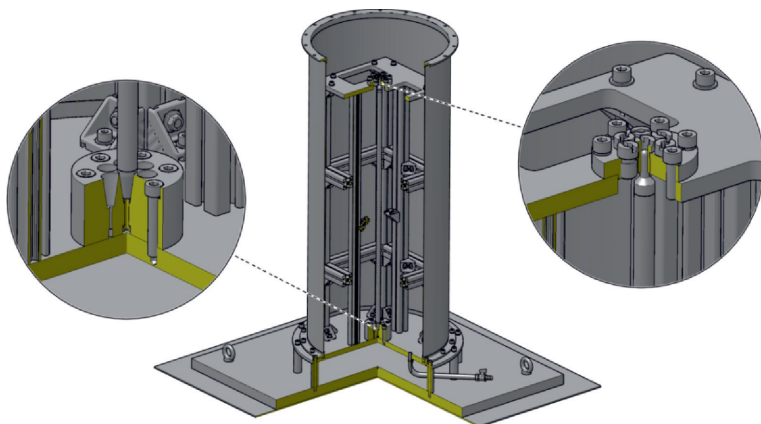


Рис. 2. Эскиз стенда вибродиагностики твэлов

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА

Выбор датчика для работы на стенде диктуется конкретной задачей, условиями измерения и удобством использования. Для регистрации поперечных колебаний стержня могут применяться датчики тензометрического, оптического, электромагнитного, пьезоэлектрического или емкостного типа. С учетом того, что в данной работе предполагаются лишь относительные измерения амплитуды деформации и условия водной среды, был выбран датчик электромагнитного типа Corona-4SC фирмы Tesla, применяемый в музыкальных инструментах (рис. 3). Он имеет достаточную чувствительность на расстоянии в несколько миллиметров, герметичный корпус и низкую стоимость. Датчик является бесконтактным.



Рис. 3. Электромагнитный датчик Corona-4SC

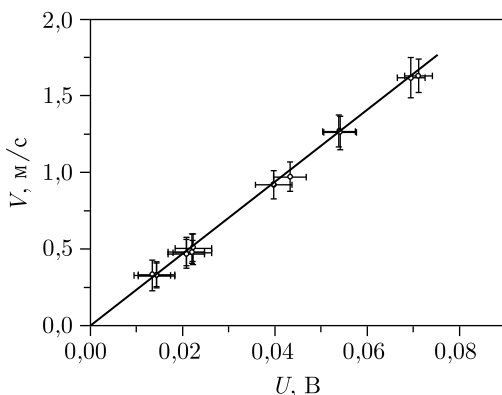


Рис. 4. Зависимость скорости движения объекта от напряжения датчика: точки — эксперимент; линия — линейная аппроксимация

Электрический сигнал на выходе датчика регистрируется цифровым осциллографом Nantek 6022BL и передается на компьютер через usb-интерфейс.

Из принципа действия датчика следует, что амплитуда напряжения на его выводах должна быть пропорциональна скорости перемещения измеряемого объекта. Поскольку выбранный датчик изначально не предназначался для физических измерений и его точное внутреннее устройство неизвестно, была проведена калибровка. Она состояла в измерении амплитуды сигнала при перемещении рядом с датчиком металлического предмета с известной скоростью. В результате была получена зависимость напряжение–скорость, которая подчиняется линейному закону в пределах погрешностей (рис. 4).

ИЗМЕРЕНИЕ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ ПОПЕРЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ ТВЭЛА

Модельный твэл был установлен на стенд с жестким закреплением снизу и полной свободой сверху (верхний узел крепления снят). Датчик располагался в области верхней заглушки твэла (см. рис. 2). Свободные колебания возбуждались механически путем отклонения верхнего конца твэла от положения равновесия. Пример полученного сигнала приведен на рис. 5.

Измерить частоту полученного сигнала можно путем построения спектра сигнала (FFT) либо простым пересчетом количества колебаний за достаточно большой промежуток времени. Последний способ в данном случае более точен и дает значение частоты первой гармоники на воздухе ($8,07 \pm 0,04$) Гц.

Для преимущественного возбуждения второй гармоники применялся удар твердым предметом по твэлу на расстоянии одной трети высоты, считая от нижнего конца. Пример полученного сигнала приведен на рис. 6.

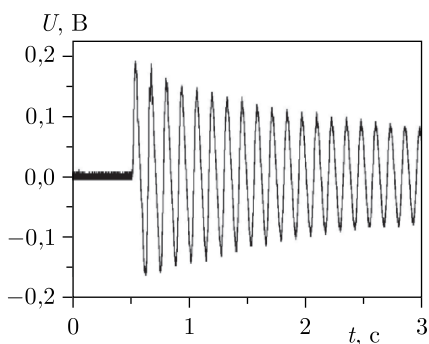


Рис. 5. Сигнал при свободных колебаниях на воздухе. Первая гармоника

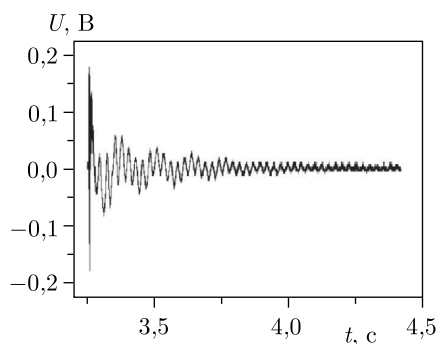


Рис. 6. Сигнал при свободных колебаниях на воздухе. Вторая гармоника

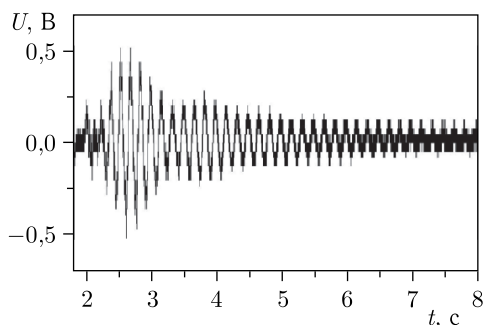


Рис. 7. Сигнал при свободных колебаниях в воде. Первая гармоника

Измерение частоты второй гармоники на воздухе дает значение $(39,1 \pm 0,6)$ Гц.

Для измерения в жидкости кожух стенда заполнялся водой. Колебания возбуждались путем отклонения верхнего конца твэла от положения равновесия. Пример полученного сигнала приведен на рис. 7.

Измерение частоты первой гармоники в воде дает значение $(6,3 \pm 0,1)$ Гц.

ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ ЗАТУХАНИЯ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Для определения времени затухания свободных колебаний твэла на воздухе были определены положения максимумов кривой на графике рис. 5. Поскольку полученные точки плохо аппроксимируются зависимостью вида $\exp(-t/\tau)$, высказано предположение о наличии собственного времени затухания у каждой гармоники. Из графиков сигнала измерений второй гармоники (см. рис. 6) было найдено изменение амплитуды колебаний во времени, полученные точки аппроксимированы зависимостью вида $\exp(-t/\tau_2)$ (рис. 8). Значение τ_2 составило $(0,3 \pm 0,1)$ с.

После этого точки положений максимумов на графике рис. 5 были аппроксимированы зависимостью вида $A_1 \exp(-t/\tau_1) + A_2 \exp(-t/\tau_2)$, при этом было найдено значение времени затухания первой гармоники τ_1 (рис. 9). Оно составило $(4,3 \pm 0,9)$ с.

Как показали измерения, колебания твэла в воде более сложны и требуют учета гидродинамических эффектов (волны жидкости в кожухе). Визуальный анализ графика на рис. 7 позволяет грубо оценить время затухания в 2 с.

Анализ погрешностей показал, что основными источниками ошибок являются шум электроники и случайные ошибки.

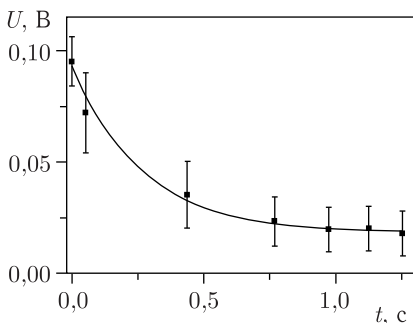


Рис. 8. Изменение во времени амплитуды второй гармоники: точки — эксперимент; линия — аппроксимация

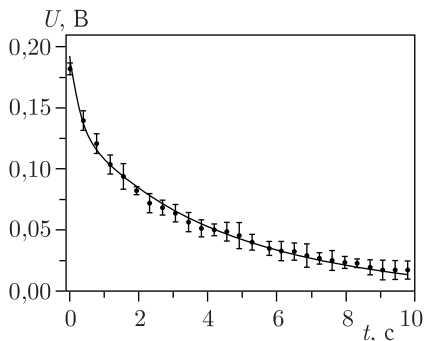


Рис. 9. Изменение во времени максимумов свободных колебаний твэла: точки — эксперимент; линия — аппроксимация

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В работах [4,6] приводятся три способа расчета собственных частот твэла «Нептун» по модели присоединенной массы. Для моделирования эксперимента был выбран численный расчет методом конечных элементов в уточненной геометрии твэла (рис. 10). Расчетная модель представляет собой полую трубку диаметром 18 мм, состоящую из пяти участков разной плотности, которые соответствуют области нижнего отражателя, топливных таблеток, верхнего отражателя, пружины и верхней заглушки. Граничное условие состояло в жесткой фиксации нижнего торца трубки.

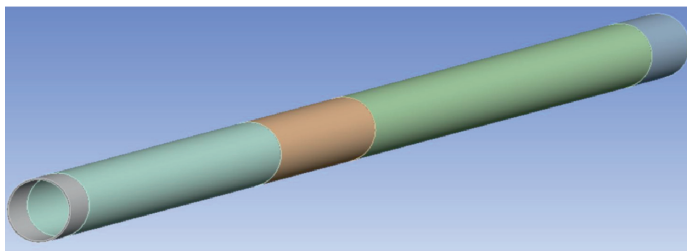


Рис. 10. Расчетная геометрия твэла

В результате модального анализа были найдены частоты и формы первых двух гармоник (рис. 11).

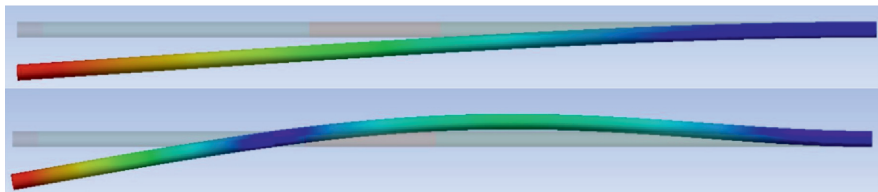


Рис. 11. Первая (сверху) и вторая (снизу) формы изгиба твэла. Численный расчет

Расчеты показали, что собственные частоты сильно зависят от толщины стенки твэла. Поскольку допуски по толщине стенки трубы модельного твэла составляют до 10%, в расчетной геометрии толщина стенки выбрана исходя из равенства частоты первой гармоники экспериментально измеренному значению 8,07 Гц. При этом расчетное значение второй гармоники составило 35,87 Гц, что ниже экспериментального значения ($39,1 \pm 0,6$) Гц.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Выбранный тип датчика и способ измерения позволяют определить первую и вторую собственную частоту модельного твэла с относительной погрешностью около $\pm 1\%$. Этого достаточно для математического моде-

лирования динамики реактора. Сильная зависимость собственной частоты от толщины стенки твэла позволяет предположить заметное различие частот отдельных экземпляров твэлов. Это обстоятельство, требующее подтверждения на стенде, может рассматриваться как положительное явление, поскольку снижает вероятность коллективных синхронных колебаний [2].

Несмотря на невысокую точность измерения времени затухания ($\pm (20-30)\%$), проведенные эксперименты дают существенную информацию для изучения динамики реактора, поскольку эффекты трения в сложных механических системах плохо поддаются численному и аналитическому расчету. На воздухе колебания затухают вследствие внутреннего трения элементов конструкции твэла, в воде механическая энергия рассеивается также при взаимодействии с жидкостью. Тот факт, что вода имеет вдвое большую вязкость по сравнению с жидким натрием [7] (при сравнимой плотности), позволяет оценить время затухания колебаний одиночного твэла в натрии от 2 до 4 с. Очевидно, процессы диссипации энергии колебаний группы твэлов, погруженных в жидкость, более сложны и требуют дополнительных экспериментов. При этом, возможно, придется использовать датчики другого типа ввиду высокой чувствительности электромагнитных датчиков к помехам и движению близлежащих предметов.

Модель присоединенной массы, а также упрощенное представление силы трения в уравнениях движения [5] приводит к некоторым расхождениям теоретических и экспериментальных результатов: завышение теоретического значения частоты второй гармоники и равные теоретические времена затухания разных гармоник. Тем не менее измеренные значения параметров могут быть внесены в расчетную схему при математическом моделировании в виде поправок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Первые измерения на стенде вибродиагностики твэлов дали значения параметров, необходимые для модели динамики реактора периодического действия. Точность измерений и возможности установки позволяют решать задачи проектирования оптимальной активной зоны нового источника нейтронов. Помимо измерения механических свойств отдельного твэла с разными способами закрепления на стенде планируется проведение исследований коллективного движения группы твэлов. Для этого предполагается усложнить устройство стенда и расширить приборную базу.

Благодарности. Автор выражает благодарность К. В. Булатову, Ф. М. Котлыкову и сотрудникам цеха опытно-экспериментального производства ЛНФ ОИЯИ за создание стенда, а также Д. Г. Черешкову за помощь в проведении экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шабалин Е. П., Аксёнов В. Л., Комышев Г. Г., Рогов А. Д.* Высокоточный импульсный исследовательский реактор на основе нептуния // АЭ. 2018. Т. 124, вып. 6. С. 309–314.
2. *Верхоглядов А. Е., Верхоглядова В. Н., Шабалин Е. П.* Математическая модель импульсного реактора периодического действия // АЭ. 2025. Т. 138, вып. 1–2.
3. *Шабалин Е. П.* Три особенности динамики пульсирующего реактора // АЭ. 2022. Т. 133, вып. 2. С. 76–81.
4. *Перепёлкин 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.
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. *Хмельницкий Д. В., Попов И. С., Андреев С. А. и др.* Обоснование постановки экспериментов по исследованию динамического изгиба твэла пульсирующего реактора «Нептун» // Вопр. атом. науки и техники. Сер. «Физ. ядер. реакторов». 2024. Вып. 3. С. 87–97.
7. *Чиркин В. С.* Теплофизические свойства материалов ядерной техники. М.: Атомиздат, 1968. 484 с.

Получено 25 июня 2025 г.

Редактор *Е. В. Григорьева*

Подписано в печать 15.07.2025.

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

Усл. печ. л. 0,5. Уч.-изд. л. 0,52. Тираж 110 экз. Заказ № 61137.

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

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/