

## Экспериментальное изучение поперечных колебаний твэла пульсирующего реактора

© А.Е. Верхоглядов

Объединенный институт ядерных исследований,  
141980 Дубна, Московская обл., Россия  
e-mail: verhoglyadov\_al@mail.ru

Поступило в Редакцию 13 августа 2025 г.

В окончательной редакции 21 октября 2025 г.

Принято к публикации 13 ноября 2025 г.

С целью уточнения параметров математической модели реактора периодического действия и разработки конструкции активной зоны нового источника нейтронов был изготовлен стенд вибродиагностики модельных твэлов. Описаны устройство стенда и задачи, которые планируется на нем решить. Результаты первых измерений сравнены с численным моделированием. Обсуждены перспективы дальнейших экспериментов и развития приборной базы стенда.

**Ключевые слова:** источник нейтронов, реактор периодического действия, активная зона, нитрид нептуния, твэл, вибродиагностика.

DOI: 10.61011/JTF.2026.03.62547.209-25

### Введение

В Лаборатории Нейтронной физики им. И.М. Франка ведется проектирование нового исследовательского источника нейтронов на основе импульсного реактора периодического действия [1,2]. Это реактор на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем (натрий), активная зона которого составлена из таблеток нитрида нептуния (делящийся изотоп  $^{237}\text{Np}$ ). В непосредственной близости от активной зоны расположен подвижный модулятор реактивности — вращающийся диск из материала, поглощающего нейтроны. Один из секторов диска имеет „окно“ — пустой участок без поглотителя. При прохождении окна рядом с активной зоной реактор переводится в надкритическое на мгновенных нейтронах состояние, и возникает вспышка нейтронов. Частота пульсаций реактора равна частоте вращения модулятора — 10 Hz. Продолжительность импульса составляет около  $200\text{ }\mu\text{s}$ , в течение которых выделяется 97 % средней мощности реактора. Между импульсами реактор находится в подкритическом состоянии. Планируемая средняя мощность 10–15 MW и компактная активная зона, необходимые для максимально возможного потока тепловых нейтронов на поверхности замедлителей (до  $10^{14}\text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), приводят к высокому удельному тепловыделению и сильным градиентам энергосодержания в объеме активной зоны (порядка  $0.01\text{ cm}^{-1}$ ). Вместе с сильно неравномерным энергосодержанием во времени это приводит к термоупругой деформации элементов конструкции и, как следствие, нестабильной динамике импульсов. Коэффициент размножения реактора очень чувствителен к изменению геометрии, так что поперечные смещения твэлов на десятки доли миллиметра могут приводить к изменению энергии импульса в несколько раз [3]. Проблема состоит

в том, что к моменту очередного импульса деформация элементов активной зоны не успевает вернуться к исходному состоянию (характерные времена тепловой релаксации составляют несколько секунд), а зависит от энергосодержания в предыдущих импульсах. В результате возникает обратная связь по реактивности, которая плохо поддается управлению.

В процессе выбора конструкции активной зоны нового реактора была предложена так называемая компоновка с потвальной загрузкой: несколько сотен цилиндрических твэлов установлены вертикально и закреплены непосредственно на корпусе активной зоны. Таким образом, механически твэлы изолированы друг от друга зазором около 1 mm, что позволяет упростить расчеты термоупругой деформации. В первом приближении, в пренебрежении взаимодействием соседних твэлов посредством жидкого теплоносителя, учет обратной связи сводится к решению нестационарного уравнения поперечной термоупругой деформации отдельных твэлов с последующим вычислением добавочной реактивности, возникающей при смещении топливных таблеток. Моделирование динамики импульсного реактора периодического действия с учетом обратной связи по деформации твэлов было реализовано в виде компьютерной программы [3]. Было показано, что наличие в активной зоне подвижных элементов конструкции может приводить к нестабильной динамике [4,5]. Результаты моделирования динамики реактора сильно зависят от времени затухания свободных колебаний и собственных частот твэлов, поскольку энергосодержание носит периодический характер и может вызывать резонансные явления. Эти механические параметры могут быть найдены путем численных и аналитических расчетов [6], однако точность таких оценок ставится под сомнение по причине сложности

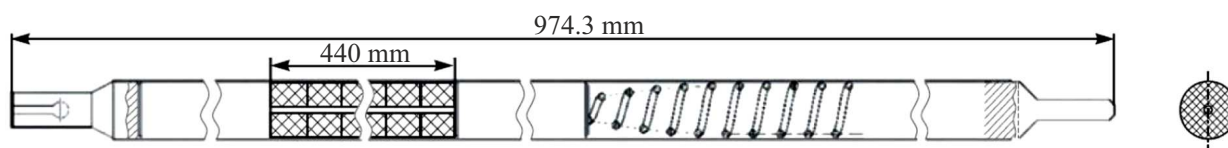


Рис. 1. Эскиз твэла реактора НЕПТУН.

конструкции твэла. Твэл состоит из множества деталей (рис. 1), которые имеют определенную свободу перемещения друг относительно друга. Основная часть массы приходится на топливные таблетки — около 66 %, которые, несмотря на давление поджимающей пружины, могут смещаться в поперечном направлении при колебании твэла в пределах зазора 0.2–0.4 mm от таблетки до стенки. Точное численное решение задачи колебаний такой системы многих взаимодействующих тел не представляется возможным вследствие сложности вычислений и задания граничных условий для таблеток. В предыдущих работах применялась модель присоединенной массы: вместо твэла рассматривается лишь его внешняя стенка, распределение массы в которой задается соответственно массе всего твэла. Целью настоящей работы является экспериментальная проверка указанных выше расчетов механических параметров (время затухания и собственные частоты) и применимости модели присоединенной массы к описанию движения твэлов.

В связи с этим был разработан стенд вибродиагностики для измерения указанных параметров на полномасштабных модельных твэлах. Помимо изучения свойств самого твэла и проверки расчетов, стенд может применяться для изучения гидродинамических эффектов, влияющих на работу импульсного реактора, а именно влияние жидкой среды теплоносителя на поперечные колебания твэла и взаимодействие группы твэлов в жидкости. Также планируются эксперименты по изучению влияния способа закрепления твэлов на динамические свойства импульсного реактора. Это позволит подтвердить или опровергнуть применимость конструкции активной зоны с потвэльной загрузкой, а также предложить новые варианты конструкции.

В настоящей работе ставится ряд задач по изучению твэла импульсного реактора, описывается устройство стенда, измерительной аппаратуры, а также приводятся результаты измерений. Измеренные значения сравниваются с результатами численного моделирования. Обсуждаются перспективы дальнейших экспериментов и развития приборной базы стенда.

## 1. Постановка задачи

В настоящей 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 время затухания свободных поперечных колебаний [3]. 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.

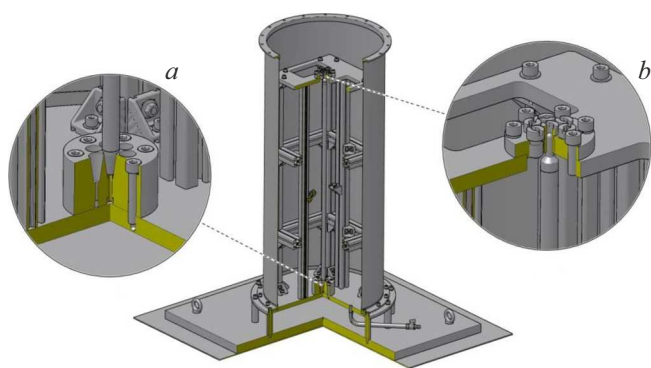
Модельный твэл представляет собой полномасштабный прототип проектного твэла реактора (рис. 1). В качестве имитаторов топливных таблеток применены цилиндры из сплава ВНЖ-7-3 идентичного размера. Поскольку плотность сплава больше плотности нитрида нептуния, в центре имитаторов имеются отверстия для обеспечения нужной массы. Остальные детали модельного твэла изготовлены из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т, в отличие от стали ЧС-68ИД, используемой для изготовления реальных твэлов. Поскольку значения плотности и модуля Юнга у разных сталей практически одинаковы, это не скажется на результатах экспериментов.

Твэл состоит из корпуса в виде стальной трубки  $18 \times 0.4$  mm с двумя заглушками, внутри находятся нижний отражатель, столб из 44 таблеток, верхний отражатель и поджимающая пружина. Все размеры и масса деталей, а также механические параметры материалов модельного твэла соответствуют проектному твэлу.

Задачи настоящей работы состоят в следующем: 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.

## 2. Описание стенда

При проектировании стенда ставились задачи воспроизведения условий крепления и расположения твэлов, наиболее близких к реальным. Поэтому твэлы в стенде располагаются вертикально, на заданном расстоянии друг от друга (при исследовании группы твэлов), узлы закрепления изготавливаются в соответствии с требованиями проекта и задачами конкретного эксперимента. Поскольку корпус активной зоны представляет собой массивную и жесткую конструкцию, конструкция стенда



**Рис. 2.** Эскиз стенда вибродиагностики твэлов: *a* — нижний узел крепления, *b* — верхний узел крепления.

также должна исключать посторонние вибрации в процессе измерений.

Моделирование движения твэлов в среде жидкого теплоносителя требует заполнения рабочего объема стенда жидкостью. Работа с жидким натрием не предполагается ввиду особой сложности работ с этим материалом, а также невозможностью проведения измерений. В качестве имитатора среды теплоносителя могут быть использованы некоторые жидкие углеводороды с похожими гидродинамическими свойствами (гексан, ацетон, пропаналь и др.), однако не все из них подходят для экспериментов по соображениям безопасности [7]. Вода заметно отличается от жидкого натрия по своим свойствам (плотность и вязкость), но является наиболее доступным и удобным материалом. По этой причине первые измерения на стенде были проведены в водной среде с последующим учетом высокой вязкости. Для предотвращения коррозии элементы стенда, контактирующие с жидкостью, изготовлены из нержавеющей стали и алюминиевого сплава.

Использование измерительной и прочей аппаратуры, которая будет расположена в разных местах вблизи модельных твэлов, требует значительного пространства и возможности быстрого доступа для снятия и установки приборов. С учетом этого внешний стальной кожух изготовлен с достаточной шириной (диаметр 550 мм), верхняя плита рамы имеет вырезы. Кожух является съемным.

На данном этапе стенд вибродиагностики (рис. 2) состоит из массивной стальной плиты, которая служит основанием и исключает посторонние вибрации, алюминиевой рамы для закрепления твэла и прочего оборудования. На раме параллельно твэлам расположены два алюминиевых профиля для установки датчиков.

Верхний и нижний узлы крепления имеют сменные крепежные втулки, что позволяет изучать разные способы закрепления твэлов, а также устанавливать до семи твэлов одновременно.

### 3. Измерительная аппаратура

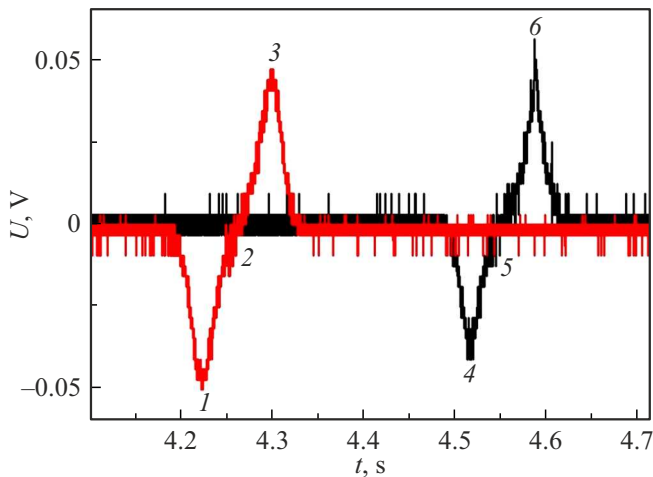
Выбор датчика для работы на стенде диктуется конкретной задачей, условиями измерения и удобством использования. Для регистрации поперечных колебаний стержня могут применяться датчики тензометрического, оптического, электромагнитного, пьезоэлектрического или емкостного типа [8]. С учетом того, что в настоящей работе предполагаются лишь относительные измерения амплитуды деформации и условия водной среды, был выбран датчик электромагнитного типа Corona-4SC фирмы Tesla, применяемый в музыкальных инструментах. Он имеет достаточную чувствительность к предметам из ферромагнитного материала на расстоянии в несколько миллиметров, герметичный корпус и низкую стоимость. Датчик является бесконтактным, что особенно важно при измерении колебаний твэлов. Присоединение к твэлу дополнительных устройств или проводов может исказить результаты измерений.

Электрический сигнал на выходе датчика регистрируется цифровым осциллографом Hantek 6022BL и передается на компьютер через USB-интерфейс. Осциллограф является двухканальным, что было использовано при калибровке датчиков.

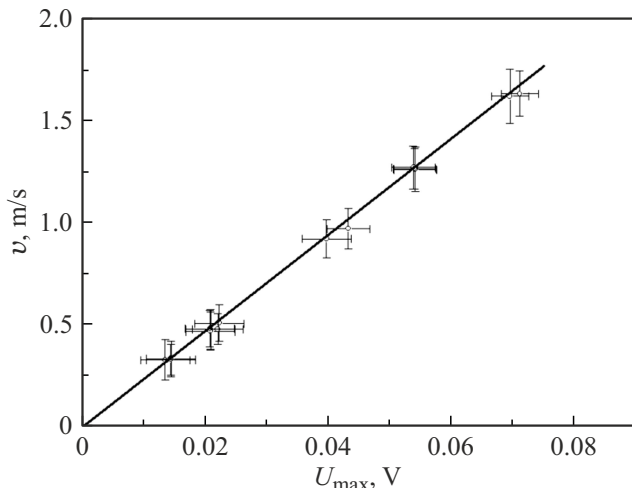
Датчик состоит из многовитковой обмотки, расположенной на сердечнике из постоянного магнита. При движении предмета из ферромагнитного материала вблизи разомкнутой части магнитопровода изменяется магнитный поток через обмотку, что создает ЭДС на ее концах. Из принципа действия датчика следует, что, в силу закона электромагнитной индукции, ЭДС на его выводах должна быть пропорциональна скорости перемещения измеряемого объекта. При экспоненциальном затухании синусоидальных колебаний постоянная времени затухания скорости и амплитуды равны

$$v(t) = \frac{\partial x}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} (e^{-t/\tau} \cos \omega t) = -e^{-t/\tau} \left( \frac{\cos \omega t}{\tau} + \omega \sin \omega t \right).$$

Поэтому датчик может применяться для измерения времени затухания свободных колебаний твэла при условии линейного отклика. Для проверки линейной связи скорости перемещения измеряемого объекта и ЭДС на выходе датчика была проведена калибровка. Она состояла в измерении амплитуды сигнала при перемещении рядом с датчиком предмета с известной скоростью. Металлический шарик, скатывающийся по наклонной поверхности, проходил мимо двух датчиков, расположенных на известном расстоянии друг от друга. Зарегистрированный сигнал ЭДС при этом выглядит, как показано на рис. 3. По интервалу времени между событиями 2 и 5 вычислялась средняя скорость  $\bar{v}$  — движения между датчиками. Также вычислялись интервал  $t_1$  между экстремумами 1–3 и интервал  $t_2$  между экстремумами 4–6. После этого мгновенная скорость шарика  $v$  при прохождении второго датчика вычисля-



**Рис. 3.** Сигнал с первого (красная линия) и второго (черная линия) датчика при прохождении металлического предмета. Цифрами отмечены экстремумы и точки пересечения нуля.



**Рис. 4.** Зависимость между скоростью движения объекта и ЭДС второго датчика. Точки — эксперимент, линия — линейная аппроксимация.

лась по формуле

$$v = \frac{2\bar{v}}{1 + t_2/t_1}.$$

Использование двух датчиков при калибровке указанным способом позволяет учесть неравномерный характер движения по наклонной. При этом первый датчик служит лишь для определения моментов времени 1–3.

Далее измерялась амплитуда ЭДС  $U_{\max}$  второго датчика между экстремумами 4–6. В результате была получена зависимость амплитуда–скорость для второго датчика, которая подчиняется линейному закону в пределах погрешностей (рис. 4). Основным источником погрешностей является неточность определения положения точек на графике сигнала вследствие шумов электроники.

Линейная зависимость ЭДС от скорости перемещения объекта позволяет использовать датчик для измерения времени затухания при постоянной частоте свободных колебаний (амплитудно-частотная характеристика датчика не измерялась), что вполне удовлетворяет задачам настоящей работы. Точность измерения частоты колебаний определяется чувствительностью датчика, уровнем шума и временным разрешением осциллографа.

#### 4. Измерение собственных частот поперечных колебаний твэла

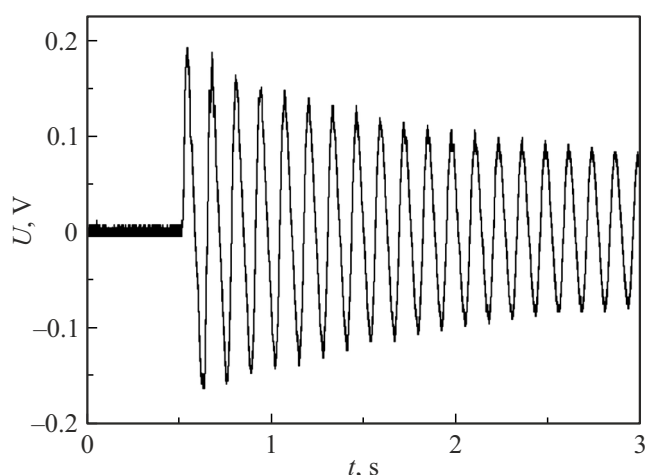
Одним из способов измерения собственных частот является регистрация свободных затухающих колебаний. Движение твэла при этом описывается следующим выражением [9]:

$$y(x, t) = e^{-t/\tau} \sum_{k=1}^{\infty} A_k W_k(x) \cos(2\pi\nu_k t + \varphi_k),$$

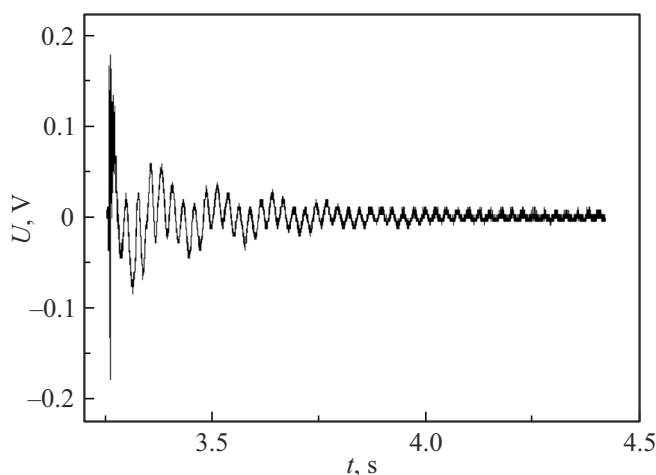
где  $y(x, t)$  — поперечное смещение оси твэла в точке  $x$  в момент времени  $t$ ,  $\tau$  — время затухания колебаний,  $k$  — номер гармоники,  $A_k$  — начальная амплитуда,  $W_k(x)$  — собственная (балочная) функция твэла,  $\nu_k$  — собственная частота,  $\varphi_k$  — начальная фаза. Параметры  $A_k$  и  $\varphi_k$  задаются как начальные условия в момент возбуждения колебаний: им соответствует форма и скорость твэла при  $t = 0$ . С точки зрения эксперимента, было бы желательно возбуждать свободные колебания лишь одной  $k$ -й гармоники, частоту которой требуется измерить ( $A_k \neq 0$ ,  $A_{i \neq k} = 0$ ). Технически это не представляется возможным. Однако знание вида функций  $W_k(x)$  позволяет выбрать наиболее подходящий способ возбуждения. Это может быть отклонение от положения равновесия или удар в определенной точке твэла.

Модельный твэл был установлен на стенд с жестким закреплением снизу и полной свободой сверху (верхний узел крепления снят). Датчик располагался в районе верхней заглушки твэла (рис. 2), что обеспечивало наибольшую амплитуду сигнала. Для измерения собственной частоты первой гармоники свободные колебания возбуждались механически путем отклонения верхнего конца твэла от положения равновесия. Это объясняется тем, что форма изгиба твэла в таком положении наиболее близка к собственной функции  $W_1(x)$  первой гармоники. Пример полученного сигнала приведен на рис. 5.

Измерить основную частоту полученного сигнала можно либо путем построения спектра сигнала, 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  $(8.07 \pm 0.04)$  Hz. При оценке погрешностей учитывались статистические ошибки (проводилась серия измерений с разным расположением датчика) и ошибки определения положения максимумов сигнала.



**Рис. 5.** Сигнал при свободных колебаниях на воздухе. Возбуждение путем отклонения от положения равновесия.



**Рис. 6.** Сигнал при свободных колебаниях на воздухе. Возбуждение путем удара по корпусу твэла.

Для преимущественного возбуждения второй гармоники применялся удар твердым предметом по твэлу на расстоянии одной трети высоты, считая от нижнего конца. В этой точке вторая собственная функция твэла  $W_2(x)$  имеет максимум. Пример полученного сигнала приведен на рис. 6.

Измерение частоты второй гармоники на воздухе дает значение  $(39.1 \pm 0.6)$  Hz. Способ вычисления частоты и погрешностей аналогичен предыдущему случаю. Погрешность определения второй собственной частоты выше, чем первой. Это объясняется низкой амплитудой колебаний и малым временем затухания, о чем будет сказано ниже. Измерить частоту третьей гармоники методом свободных колебаний на воздухе не удалось.

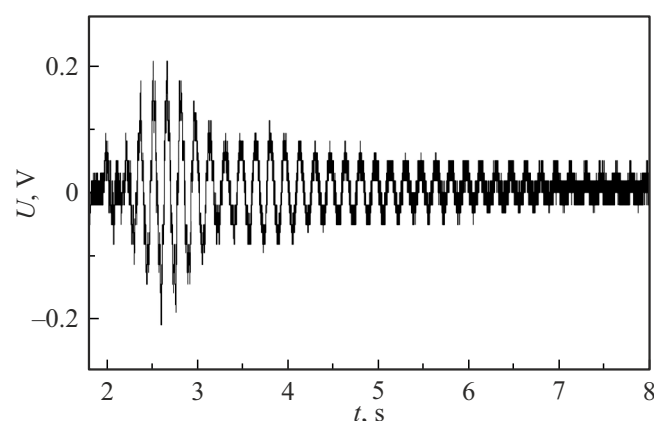
Для измерения в жидкости кожух стенда заполнялся водой. Измерения проводились аналогично измерениям на воздухе. Удалось измерить частоту только пер-

вой гармоники. Пример полученного сигнала приведен на рис. 7.

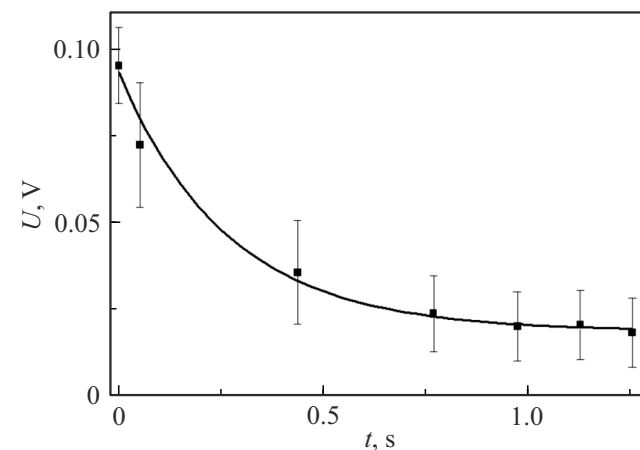
Измерение частоты первой гармоники в воде дает значение  $(6.3 \pm 0.1)$  Hz.

## 5. 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 (правомерность такого предположения обсуждается в разд. 7). Из графиков сигнала измерений второй гармоники (рис. 6) было найдено изменение амплитуды колебаний во времени, полученные точки аппроксимированы зависимостью вида  $\exp(-t/\tau_2)$  (рис. 8). Значение  $\tau_2$  составило  $(0.3 \pm 0.1)$  s.

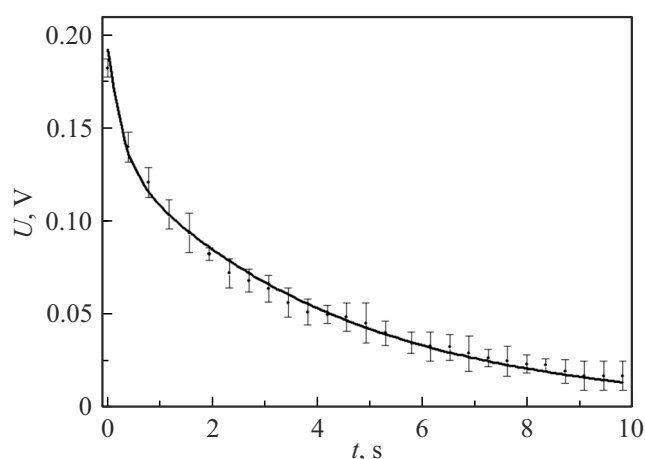


**Рис. 7.** Сигнал при свободных колебаниях в воде. Возбуждение путем отклонения от положения равновесия.

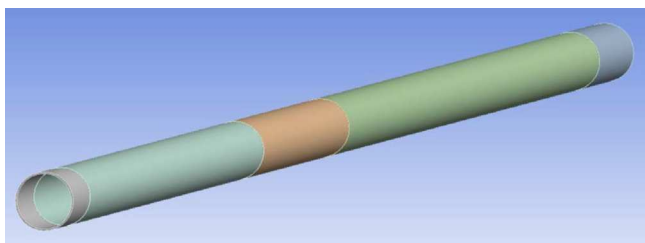


**Рис. 8.** Изменение во времени амплитуды второй гармоники на воздухе. Точки — эксперимент, линия — аппроксимация.





**Рис. 9.** Изменение во времени максимумов свободных колебаний твэла. Точки — эксперимент, линия — аппроксимация.



**Рис. 10.** Расчетная геометрия твэла.

После этого точки положений максимумов на графике рис. 5 были аппроксимированы зависимостью вида  $A_1 \cdot \exp(-t/\tau_1) + A_2 \cdot \exp(-t/\tau_2)$ , при этом было найдено значение времени затухания первой гармоники  $\tau_1$  (рис. 9). Оно составило  $(4.3 \pm 0.9)$  s.

Как показали измерения, колебания твэла в воде более сложны и требуют учета гидродинамических эффектов (волны жидкости в кожухе). Изменение амплитуды колебаний во времени (рис. 7) позволяет оценить время затухания в жидкости величиной  $(2.0 \pm 0.5)$  s.

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

## 6. Численное моделирование

В работах [6,10] приводятся три способа расчета собственных частот твэла НЕПТУН по модели присоединенной массы в упрощенной геометрии. Для моделирования эксперимента был выбран численный расчет методом конечных элементов в уточненной геометрии твэла (рис. 10). Расчетная модель представляет собой полую трубку диаметром 18 mm, 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.

В результате модального анализа были найдены частоты и формы первых двух гармоник. Расчеты показали, что собственные частоты сильно зависят от толщины стенки твэла. Поскольку допуски по толщине стенки трубы модельного твэла составляют  $\pm 0.07$  mm, в расчетной геометрии толщина стенки выбрана равной 0.45 mm исходя из равенства частоты первой гармоники экспериментально измеренному значению 8.07 Hz. При этом расчетное значение второй гармоники составило 35.87 Hz, что ниже экспериментального значения  $(39.1 \pm 0.6)$  Hz.

## 7. Обсуждение результатов

Выбранный тип датчика и способ измерения позволили определить первую и вторую собственные частоты модельного твэла с относительной погрешностью около  $\pm 1\%$ , а также времени затухания свободных колебаний относительной погрешностью  $\pm 20\% - 30\%$ . Этого достаточно для целей и задач, поставленных в настоящей работе. Численное моделирование выявило сильную зависимость собственной частоты от толщины стенки твэла. Можно предположить заметное различие частот отдельных экземпляров твэлов. Это обстоятельство, требующее подтверждения в эксперименте, может рассматриваться как положительное явление, поскольку снижает вероятность коллективных синхронных колебаний твэлов [3].

Несмотря на невысокую точность измерения времени затухания, 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 [11] (при сравнимой плотности), позволяет оценить время затухания колебаний одиночного твэла в натрии от 2 до 4 s. Очевидно, процессы диссипации энергии колебаний группы твэлов, погруженных в жидкость, более сложны и требуют дополнительных экспериментов.

Модель присоединенной массы, используемая в численных и аналитических расчетах [6,10], приводит к некоторым расхождениям теоретических и экспериментальных результатов: завышение теоретического значения частоты второй гармоники и равные теоретические времена затухания разных гармоник. Различие значений собственных частот можно объяснить движением таблеток внутри твэла относительно оболочки при больших скоростях, что снижает эффективное значение присоединенной массы. Различие времени затухания первой

и второй гармоник объясняется сложной природой трения (внутреннее трение при деформации твэла, трение отдельных частей конструкции, взаимодействие с жидкостью), а также упрощенным представлением силы трения в уравнениях движения [3,9]. Таким образом, модель присоединенной массы в ее изначальном виде не может применяться в дальнейших расчетах и нуждается в модификации. Измеренные значения параметров могут быть внесены в расчетную схему в виде поправок при математическом моделировании динамики реактора. При рассматриваемом типе закрепления твэлов (свободный верхний конец) первых двух гармоник достаточно для описания движения твэлов в активной зоне (частоты высших гармоник сильно отличаются от частоты пульсаций реактора и не влияют на динамику реактора).

Поскольку вибрации твэлов в импульсном реакторе являются негативным явлением, будущие работы на стенде вибродиагностики должны быть направлены на поиск оптимального способа закрепления твэла, при котором частота первой гармоники была бы по возможности далека от частоты пульсаций реактора, а время затухания и амплитуда свободных колебаний были бы наименьшими. При этом закрепление должно соответствовать основным требованиям активной зоны реактора: возможность извлечения твэла из активной зоны и свобода аксиального удлинения при нагреве. Измерения частот и времени затухания также предполагается провести для группы из семи твэлов, погруженных в жидкость.

Очевидно, дальнейшие эксперименты на стенде требуют использования датчиков другого типа. Исследования поведения группы твэлов предполагает измерения перемещения отдельных твэлов. Электромагнитные датчики не подходят ввиду высокой чувствительности к движению близлежащих предметов. Кроме того, измерение собственных частот с разными типами закрепления может потребовать иного метода, поскольку свободные колебания второй гармоники имеют малую амплитуду и плохо детектируются. Метод вынужденных колебаний, при котором на твэл действует внешняя периодическая сила (механическая или электромагнитная) также несовместим с данным типом датчиков, очень чувствительных к помехам.

Среди направлений будущей работы на экспериментальном стенде можно также отметить изучение влияния турбулентного потока жидкости на движение твэлов, моделирование теплого удара с помощью магнитного поля и стационарного изгиба при неравномерном нагреве твэла.

## Заключение

Первые измерения на стенде вибродиагностики твэлов позволили уточнить значения параметров, необходимые для модели динамики реактора периодического действия. Было показано, что модель присоединенной

массы неприменима для точного описания колебаний твэлов и нуждается в уточнении. Точность измерений и возможности установки позволяют использовать ее для проектирования оптимальной активной зоны нового источника нейтронов.

## Благодарности

Автор выражает благодарность К.В. Булатову, Ф.М. Котлыкову и сотрудникам ЦОЭП ЛНФ ОИЯИ за создание стенда, а также Д.Г. Черешкову за помощь в проведении экспериментов.

## Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] Е.П. Шабалин, В.Л. Аксенов, Г.Г. Комышев, А.Д. Рогов. Атомная энергия, **124** (6), 309 (2018). [E.P. Shabalin, V.L. Aksenov, G.G. Komyshev, A.D. Rogov. Atomic Energy, **124** (4), 364 (2018). DOI: 10.1007/s10512-018-0424-3]
- [2] В.Л. Аксенов, Е.П. Шабалин, М.В. Рзынин. Физика элементарных частиц и атомного ядра, **52** (6), 1349 (2021). [V.L. Aksenov, M.V. Rzyanin, E.P. Shabalin. Phys. Particles Nuclei, **52** (6), 1019 (2021). DOI: 10.1134/S1063779621060034]
- [3] А.Е. Верхоглядов, В.Н. Верхоглядова, Е.П. Шабалин. Атомная энергия, **138** (1), 10 (2025). [A.E. Verhoglyadov, V.N. Verhoglyadova, E.P. Shabalin. Atomic Energy, **138**, 11 (2025). DOI: 10.1007/s10512-025-01220-0]
- [4] Е.П. Шабалин. Атомная энергия, **133** (2), 76 (2022). [E.P. Shabalin. Atomic Energy, **133** (2), 79 (2022). DOI: 10.1007/s10512-023-00976-7]
- [5] Yu.N. Pepelyshev, D. Sumkhuu. Nuclear Eng. Technol., **55** (9), 3326 (2023). DOI: 10.1016/j.net.2023.04.039
- [6] Е.Е. Перепелкин, Н.Г. Иноземцева, М.В. Клименко, Р.В. Полякова, М.Б. Садовникова. Физика элементарных частиц и атомного ядра, **56** (1), 122 (2022). [E.E. Perepelkin, N.G. Inozemtseva, M.V. Klimenko, R.V. Polyakova, M.B. Sadovnikova. Phys. Particles Nuclei, **56** (1), 88 (2025). DOI: 10.1134/S1063779624701247]
- [7] А.А. Равдель, А.М. Пономарева. *Краткий справочник физико-химических величин* (Иван Федоров, СПб., 2002)
- [8] Дж. Фрайден. *Современные датчики*, справочник (Техносфера, М., 2005)
- [9] А.Е. Верхоглядов. Письма в ЭЧАЯ, **20** (4), 657 (2023). [A.E. Verhoglyadov. Phys. Particles Nuclei Lett., **20** (4), 656 (2023). DOI: 10.1134/S1547477123040660]
- [10] Д.В. Хмельницкий, И.С. Попов, С.А. Андреев, А.В. Луценко, В.В. Захаров, В.А. Силаев, А.С. Жиряков, М.Н. Белоногов, И.А. Волков, Н.А. Шуклин, Е.П. Шабалин, А.Е. Верхоглядов, М.В. Булавин, М.В. Рзынин. ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, **3**, 87 (2024).
- [11] В.С. Чиркин. *Теплофизические свойства материалов ядерной техники* (Атомиздат, М., 1968)