

P13-2026-20

А. Е. Верхоглядов

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ
ПОТОКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ
НА ПОПЕРЕЧНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ТВЭЛА
ПУЛЬСИРУЮЩЕГО РЕАКТОРА

Направлено в журнал «Ядерная физика и инжиниринг»

Верхоглядыв А. Е.

P13-2026-20

Изучение влияния потока теплоносителя
на поперечные колебания твэла пульсирующего реактора

В работе проводится экспериментальное изучение поперечных колебаний модельного твэла реактора ИБР-2 в потоке жидкости. Исследуется влияние направления и скорости жидкости, а также способа закрепления твэла на его собственные частоты, декремент затухания и амплитуду колебаний в турбулентном потоке. Полученные результаты необходимы для построения модели динамики импульсного реактора периодического действия и разработки конструкции нового источника нейтронов.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2026

Verhoglyadov A. E.

P13-2026-20

Study of the Influence of Coolant Flow
on Transverse Vibrations of a Fuel Rod of a Pulsed Reactor

The work presents an experimental study of transverse vibrations of a model fuel rod of the IBR-2 reactor in a liquid flow. The influence of the direction and velocity of the fluid, as well as the method of fixing the fuel rod on its natural frequencies, damping decrement and oscillation amplitude in a turbulent flow is investigated. The obtained results are necessary for constructing a model of the dynamics of a periodic pulsed reactor and developing the design of a new neutron source.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2026

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных проблем современной теории импульсных реакторов периодического действия (ИРПД) является построение адекватной модели динамики конкретного реактора. Потребность в модели диктуется не столько научным интересом, сколько необходимостью обоснования безопасной эксплуатации имеющейся установки ИБР-2, а также проектированием нового источника нейтронов на основе импульсного реактора. Модель динамики создается под отдельный реактор, она должна включать в себя все значимые параметры, расчет всех существенных процессов в реакторе и описывать его поведение (показания приборов), подтверждающееся на опыте. В этом случае модель может быть использована для прогнозирования работы имеющейся установки, а также для разработки конструкции нового реактора.

Попытки построить модель динамики реактора ИБР-2 сталкиваются с рядом трудностей, одна из которых — описание поперечных колебаний стержневых тепловыделяющих элементов (ТВЭлов). Поперечное смещение топливных таблеток, находящихся внутри ТВЭлов, оказывает заметное влияние на реактивность, что может приводить к флуктуациям энергии импульсов реактора. ТВЭлы реактора ИБР-2 находятся внутри тепловыделяющей сборки (ТВС), через которую протекает теплоноситель в виде жидкого натрия. Скорость потока натрия в районе размещения ТВЭлов достигает 2–3 м/с, течение носит турбулентный характер. Помимо гидродинамических сил на ТВЭл воздействуют силы термоупругости, возникающие вследствие периодического импульсного энерговыделения в топливных таблетках и приводящие к динамическому изгибу. В работах [1, 2], посвященных изучению динамического изгиба ТВЭлов, поперечные колебания рассчитывались без учета гидродинамических эффектов. Экспериментальное измерение механических параметров модельного ТВЭла в работе [3] также проведено в неподвижной жидкости. Вопрос о применимости имеющихся результатов по динамическому изгибу в условиях турбулентного течения теплоносителя остается открытым. Изучение вибраций ТВЭлов на гидродинамических стендах широко применяется для обоснования конструкций ТВС реакторов стационарного действия [4].

Цель данной работы — изучить влияние потока теплоносителя на свойства поперечных колебаний ТВЭла (собственные частоты, декремент затухания, амплитуду смещений), а также предложить наиболее выгодный способ закрепления ТВЭлов в активной зоне с точки зрения стабильности реактора. Для этого был собран стенд, на котором массогабаритный мо-

дельный твэл ИБР-2 находился в потоке жидкости, моделирующей течение теплоносителя в активной зоне. Измерялись поперечные смещения твэла на воздухе, в неподвижной жидкости, при разных скоростях и направлениях потока. Применялись разные типы закрепления твэла. Поперечные колебания возбуждались механически и за счет потока жидкости.

В работе приводится описание экспериментального оборудования, результаты измерений и их анализ. Делаются выводы по оптимизации конструкции активной зоны ИРПД, а также по дальнейшему развитию экспериментальной базы.

ОПИСАНИЕ СТЕНДА

Измерительный стенд (рис. 1, *a*) представляет собой полипропиленовую трубку с внутренним диаметром 18 мм, внутри которой коаксиально установлен имитатор твэла ИБР-2. Верхний конец имитатора жестко заделан в заглушку трубки. Для нижнего конца предусмотрено два типа закрепления: со свободным концом (соответствует способу закрепления твэла в реакторе ИБР-2) и упругое закрепление с возможностью аксиального перемещения. Во втором случае на нижнем конце имитатора крепилась пружинная проволока диаметром 0,5 мм (рис. 1, *б*).

Имитатор твэла изготовлен из круглого стального прутка диаметром 8 мм и длиной 800 мм. По своим размерам, массе и основной собственной частоте колебаний на воздухе имитатор соответствует твэлу ИБР-2 (рис. 2) с достаточной точностью (собственная частота твэла рассчитана численно).

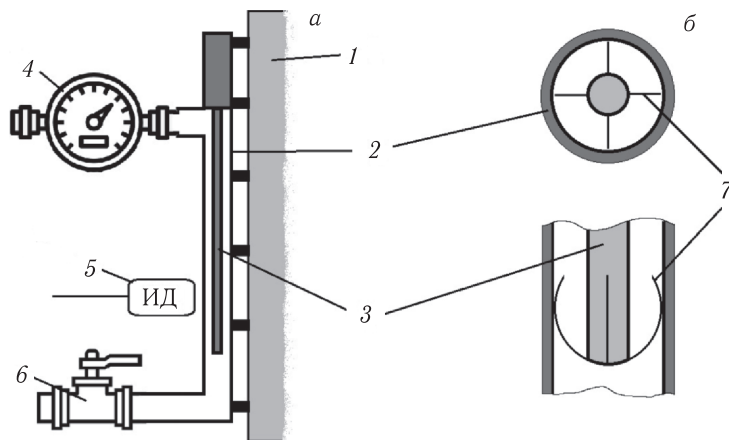


Рис. 1. Эскиз измерительного стенда: 1 — основание; 2 — трубка; 3 — имитатор твэла; 4 — расходомер; 5 — датчик смещения твэла (ИД — индуктивный датчик); 6 — вентиль; 7 — пружинная проволока. *a* — общий вид стенда; *б* — иллюстрация упругого закрепления нижнего конца имитатора

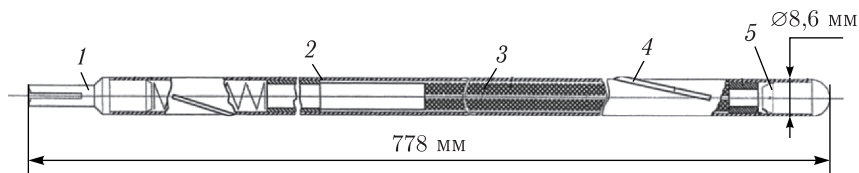


Рис. 2. Конструкция твэла ИБР-2: 1 — верхний наконечник; 2 — оболочка; 3 — топливные таблетки; 4 — дистанцирующая проволока; 5 — нижний наконечник

Трубка закреплена на прочном основании во избежание деформаций. Вода подводится к нижнему и верхнему концам трубки. Скорость жидкости (расход) устанавливается с помощью вентиля, направление потока можно менять. В качестве расходомера использовался поверенный счетчик воды СВУ-15 с относительной погрешностью $\pm 2\%$.

Поперечное смещение имитатора твэла регистрировалось с помощью индуктивного датчика SICN5-M3040G фирмы MSA, измеряющего расстояние до металлического предмета в диапазоне 17–40 мм с частотой опроса 500 Гц (рис. 3). Аналоговый сигнал с датчика поступал на цифровой осциллограф 6022BL фирмы «Nantek». Результаты калибровки измерительного канала показали погрешность измерения положения имитатора $\pm 0,15$ мм.



Рис. 3. Индуктивный датчик расстояния SICN5-M3040G

Датчик установлен на основании так, что исключается его поперечное смещение относительно трубки. При этом место установки датчика (расстояние от нижнего конца имитатора) можно выбирать, исходя из типа закрепления имитатора и наибольшей амплитуды колебаний.

Возбуждение свободных колебаний имитатора создается кратковременным отклонением основания от начального положения.

ВОДА В КАЧЕСТВЕ ИМИТАТОРА ЖИДКОГО НАТРИЯ

Жидкий натрий в активной зоне ИБР-2 имеет среднюю температуру 325°C , плотность 875 кг/м^3 и динамическую вязкость $3,23 \cdot 10^{-4} \text{ кг/(м} \times \text{с)}$ [5]. Средняя скорость потока натрия внутри ТВС в районе расположения твэлов составляет $2,7 \text{ м/с}$ при расходе теплоносителя через активную зону $90 \text{ м}^3/\text{ч}$. В измерениях на стенде использовалась вода при температуре 12°C , плотности 999 кг/м^3 и динамической вязкости $1,23 \cdot 10^{-3} \text{ кг/(м} \times \text{с)}$ [6]. Скорость потока воды изменялась от 0 до $2,5 \text{ м/с}$.

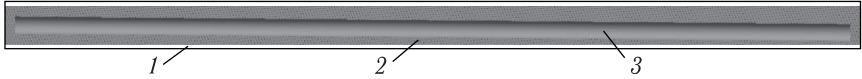


Рис. 4. Расчетная модель в Ansys CFX: 1 — трубка; 2 — жидкость; 3 — имитатор твэла

Для обоснования применимости воды в экспериментах по изучению гидродинамического воздействия жидкого натрия на поперечные колебания твэла были проведены сравнительные численные расчеты давления на боковую стенку имитатора твэла со стороны потока жидкости. Расчеты гидродинамики (CFD) проводились в модуле Ansys CFX в модели измерительного стенда (рис. 4). Имитатор твэла в расчетах был отклонен от оси трубки на 2° .

Вычислялись среднее и максимальное давление на боковую стенку имитатора при разных скоростях потока (от 0,6 до 3,7 м/с) и разных параметрах жидкости (натрий при 325°C и вода при 12°C). Результаты расчетов показывают, что максимальное давление на стенку имитатора для воды на 5% больше, чем для натрия, независимо от скорости потока. Среднее давление на стенку для воды, соответственно, выше на 3%.

Можно сделать вывод о том, что воздействие потока на боковую стенку имитатора сопоставимо для воды и жидкого натрия, т. е. применение воды для целей данной работы адекватно. С другой стороны, вязкость воды при указанных условиях в несколько раз выше вязкости жидкого натрия, что приводит к снижению времени затухания свободных поперечных колебаний в воде. Оценки времени затухания для натрия можно сделать, проводя измерения в воде и на воздухе [3].

Более точная имитация жидкого натрия может быть достигнута при повышении температуры воды до 85°C . Вязкость обоих материалов при этом станет одинаковой (рис. 5), отличие останется лишь в плотности (вода плотнее на 10%).

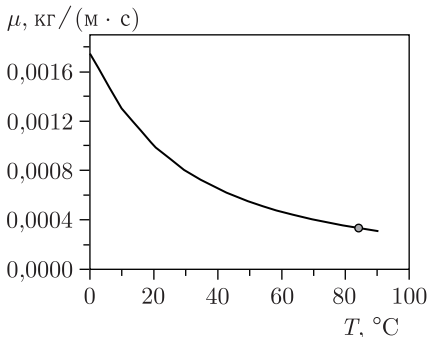


Рис. 5. Динамическая вязкость воды μ в зависимости от температуры T [6]. Кругиком обозначено значение, соответствующее вязкости жидкого натрия

СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Метод измерения собственной частоты и времени затухания описан в работе [3]. Учитывались приборные и статистические погрешности. Измерения на воздухе для свободного нижнего конца имитатора дают значения собственной частоты $(8,1 \pm 0,4)$ Гц и времени затухания $(3,7 \pm 0,5)$ с. Для упругого закрепления эти величины соответственно равны (36 ± 2) Гц и $(0,07 \pm 0,01)$ с.

На рис. 6 приведены результаты измерений при свободном нижнем конце для разных скоростей и направлений потока воды.

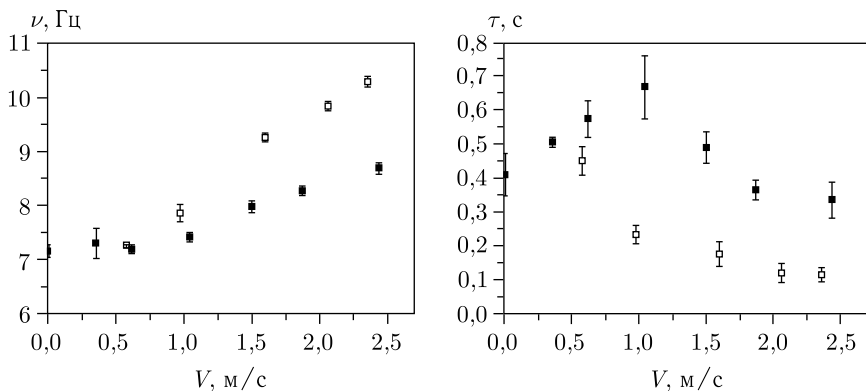


Рис. 6. Собственная частота ν и время затухания τ свободных колебаний имитатора в зависимости от скорости потока V (свободный нижний конец). Черные точки — поток сверху вниз; белые точки — поток снизу вверх

Для упругого закрепления нижнего конца измерения собственной частоты дают значение (31 ± 2) Гц независимо от скорости и направления потока воды. Время затухания при этом не отличается от измеренного на воздухе — $(0,07 \pm 0,01)$ с.

ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ (ФЛУКТУАЦИИ В ПОТОКЕ ЖИДКОСТИ)

Для измерений амплитуды вынужденных колебаний в турбулентном потоке жидкости сигнал с датчика записывался в течение 1 мин, после чего вычислялось среднеквадратичное отклонение положения имитатора σ_x . При упругом закреплении нижнего конца имитатора величина σ_x оказалась меньше погрешности измерения (0,15 мм). Результаты измерений при свободном нижнем конце приведены на рис. 7.

Движение имитатора преимущественно носит случайный характер. Также присутствуют колебания на собственной частоте (рис. 8, а). Если поток направлен снизу вверх (рис. 8, б), то при скоростях выше 2 м/с

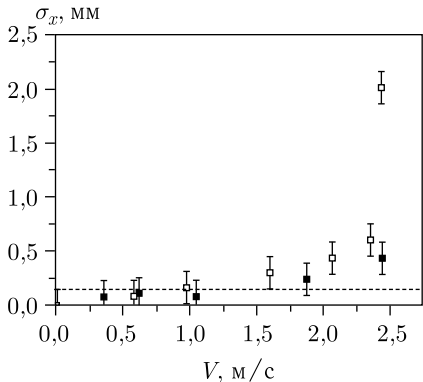


Рис. 7. Среднеквадратичное отклонение σ_x положения имитатора твэла в зависимости от скорости потока V (свободный нижний конец). Черные точки — поток сверху вниз; белые точки — поток снизу вверх. Пунктирная линия — граница приборной погрешности

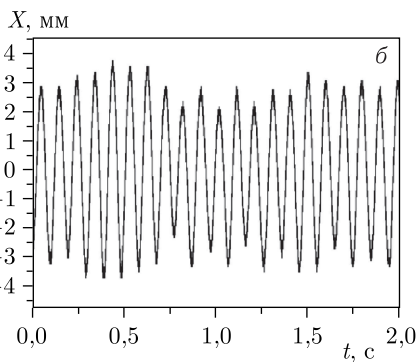
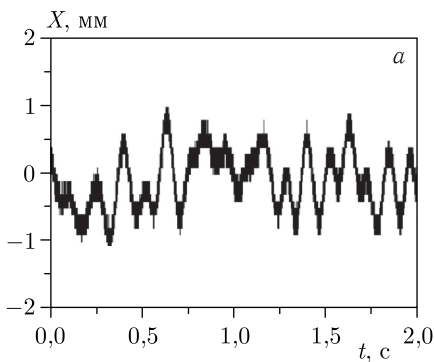


Рис. 8. Смещение имитатора твэла от положения равновесия X в зависимости от времени при скорости потока 2,5 м/с: *а* — поток сверху вниз; *б* — поток снизу вверх

имитатор переходит в режим регулярных автоколебаний с максимальной амплитудой, так как имеют место удары о стенку трубки.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты говорят о том, что продольный поток теплоносителя влияет на поперечные колебания твэла пульсирующего реактора, в частности, изменяет параметры свободных колебаний, используемые в модели динамического изгиба. Это влияние сильнее при одностороннем закреплении твэла: собственная частота увеличивается на 30–40% по сравнению с неподвижной жидкостью, время затухания несколько снижается. Тип закрепления твэла с фиксацией обоих концов более удобен с точки зрения моделирования динамического изгиба, поскольку поток жидкости практически не влияет на параметры твэла, измеренные в неподвижной жидкости. В целом модель динамического изгиба применима в случае потока теплоносителя при условии корректного измерения параметров твэла.

Значительные флуктуации модельного твэла (более 1 мм), вызванные турбулентным потоком, наблюдаются при одностороннем закреплении твэла. Можно предположить, что в реакторе ИБР-2 поперечные смещения твэлов и соответствующие эффекты реактивности полностью определяются гидродинамическими силами со стороны теплоносителя. Смещения твэлов могут носить случайный или автоколебательный характер в пределах технологических зазоров. Изменение направления потока (или закрепление твэла снизу при свободном верхнем конце) ситуации не изменит: флуктуации превышают размер зазоров (доли миллиметра). Учет динамического изгиба в этих условиях не имеет смысла, так как его эффект на порядки меньше флуктуаций, а частые соударения твэлов исключают синхронность коллективных колебаний твэлов, вызванных тепловым ударом от импульса реактора. Это противоречит гипотезе о динамическом изгибе как о возможной причине шумов энергии импульсов ИБР-2, высказанной в работе [7]. При других параметрах твэла и типах закрепления динамический изгиб вполне может проявляться и требует особого рассмотрения.

С точки зрения выбора оптимальной конструкции пульсирующего реактора полученные результаты однозначно указывают на преимущество двустороннего закрепления твэлов. Несмотря на то, что погрешность приборов не позволила провести измерения на уровне масштабов динамического изгиба (сотые доли миллиметра), стало ясно, что это явление не будет представлять опасности для динамики реактора. Это связано с высокой собственной частотой твэлов (30 Гц и более), а также с низким временем затухания: колебания твэлов после импульса реактора успеют затухнуть к следующему импульсу.

Более надежные выводы можно сделать только после стендовых измерений с полномасштабными ТВС и датчиками повышенной точности. Показано, что вода соответствующей температуры вполне подходит для имитации жидкого натрия. Следующим этапом в анализе динамики ИБР-2 и в проектировании нового реактора может стать гидродинамический стенд соответствующей конструкции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате экспериментов с модельным твэлом в потоке жидкости было показано сильное влияние турбулентного потока теплоносителя на поперечные колебания твэлов реактора ИБР-2. Для снижения негативного влияния поперечных колебаний твэлов в конструкции нового пульсирующего реактора требуется новый тип закрепления твэлов, а также гидродинамические испытания с полномасштабными ТВС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Верхоглядов А. Е., Верхоглядова В. Н., Шабалин Е. П.* Математическая модель импульсного реактора периодического действия // Атомная энергия. 2025. Т. 138, вып. 1–2. С. 10–17.

2. *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.
3. *Верхоглядов А. Е.* Экспериментальное изучение поперечных колебаний твэла пульсирующего реактора // Журнал технической физики. 2026. Т. 96, вып. 3. С. 624–630.
4. *Драгунов Ю. Г., Солонин В. И., Перевезенцев В. В., Петров И. В.* Экспериментальные исследования динамических характеристик пучков твэлов ТВС ВВЭР в турбулентном потоке теплоносителя // Атомная энергия. 2012. Т. 113, вып. 4. С. 237–240.
5. *Чиркин В. С.* Теплофизические свойства материалов ядерной техники. М.: Атомиздат, 1968. 484 с.
6. *Равдель А. А., Пономарева А. М.* Краткий справочник физико-химических величин. СПб.: Иван Фёдоров, 2003. 240 с.
7. *Верхоглядов А. Е.* О влиянии динамического изгиба твэлов на динамику пульсирующего реактора. Препринт ОИЯИ Р13-2025-64. Дубна, 2025.

Получено 6 апреля 2026 г.

Редактор *А. И. Семенова*

Подписано в печать 24.04.2026.

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

Усл. печ. л. 0,75. Уч.-изд. л. 0,63. Тираж 110 экз. Заказ № 61300.

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

E-mail: publish@jinr.ru
publish.jinr.ru