
МЕХАНИКА МАШИН

УДК 621.039.524

**О ВЛИЯНИИ ДИСТАНЦИОНИРУЮЩИХ РЕШЕТОК НА ФОРМИРОВАНИЕ
ПРИСОЕДИНЕННОЙ МАССЫ ПРИ ИЗГИБНЫХ КОЛЕБАНИЯХ
ПУЧКА ТВЭЛОВ В ЧЕХЛОВОЙ ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКЕ ВВЭР-440****© 2019 г. Ф. Д. Сорокин^{1,*}, В. В. Перевезенцев¹, Е. С. Крутько²**¹ *Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия*² *НИИ “Курчатовский институт”, Москва, Россия*** e-mail: sorokin_fd@mail.ru*

Поступила в редакцию 19.06.2017 г.

Принята к публикации 24.12.2018 г.

В работе показано существенное влияние дистанционирующих решеток на динамические характеристики чехловых тепловыделяющих сборок. Расчетные и экспериментальные значения присоединенной массы при изгибных колебаниях пучка тепловыделяющих элементов (ТВЭлов) хорошо согласуются только при учете течения жидкости в узком зазоре между шестигранной поверхностью дистанционирующих решеток и шестигранной границей чехла тепловыделяющих сборок. Малые размеры дистанционирующих решеток в осевом направлении тепловыделяющих сборок приводят к неравномерному распределению присоединенной массы по длине тепловыделяющих сборок, что является существенным фактором при исследовании изгибных колебаний пучка ТВЭлов в жидкости.

Ключевые слова: ВВЭР, тепловыделяющая сборка, гидроупругие колебания, дистанционирующие решетки, присоединенная масса

DOI: 10.1134/S0235711919020147

При исследованиях вибрационных процессов в тепловыделяющих сборках (ТВС) ядерных реакторов значительное внимание уделяется вопросам корректного определения динамических характеристик (собственные частоты, присоединенные массы, коэффициенты демпфирования колебаний) механической системы — пучка тепловыделяющих элементов (ТВЭлов) в продольном турбулентном потоке теплоносителя [1]. Исследование динамики пучков ТВЭлов имеет большое значение в связи с тем, что интенсивные вибрации в ТВС могут приводить к проскальзываниям ТВЭлов в ячейках дистанционирующих решеток [2], и как следствие, к интенсивному фреттинг-износу оболочек ТВЭлов.

В данной работе основное внимание уделено присоединенной массе пучка ТВЭлов, которая определялась известным в гидроупругости методом сопоставления экспериментально наблюдаемых частот колебаний конструкции в воздухе и воде.

Экспериментальное определение присоединенной массы пучка ТВЭлов. Пучок ТВЭлов ТВС ВВЭР-440 представляет собой механическую колебательную систему, состоящую из 126 цилиндрических ТВЭльных оболочек с загруженными в них таблетками ядерного топлива и центральной трубки, объединенными в пучок нижней опорной и одиннадцатью дистанционирующими решетками ячеистого типа. Нижняя опорная решетка жестко связана с хвостовиком и шестигранным чехлом ТВС. В верхней части



Рис. 1. Общий вид гидродинамического стенда с колонкой для размещения полномасштабных макетов ТВС ВВЭР-440.

пучок твэлов в области верхней решетки связан с чехлом через упругие опоры — пуклевки на гранях чехла [3].

Стендовые вибрационные испытания полномасштабных макетов ТВС ВВЭР-440 проводились на гидродинамическом стенде (рис. 1) с вынужденной циркуляцией воды с температурой 10...50°C и давлением до 0.3 МПа при объемных расходах до 223 м³/ч (скорости течения в пучке твэлов до 7 м/с, числа Рейнольдса до 7.1×10^4). Циркуляция воды через макеты осуществлялась с помощью электронасосного агрегата с оборотной частотой 24.4 Гц. Жесткая система закрепления колонки для размещения макетов ТВС относительно строительных конструкций экспериментального зала позволила снизить влияние механических колебаний электронасосного агрегата на измеряемые вибрационные характеристики макета ТВС. С той же целью на напорной линии подвода теплоносителя к макету имеется гибкий резиновый шланг большой длины (около 16 м), который, кроме того, позволяет уменьшить амплитуды давлений за счет акустических стоячих волн в замкнутом контуре. Отвод теплоносителя из приемного устройства колонки осуществляется по трубопроводу, имеющему также вставку из резинового шланга. Таким образом, колонка стенда с размещенным в ней макетом оказывается практически изолированной от общеконтурных механических колебаний.

Динамические характеристики пучка твэлов ТВС ВВЭР-440 определялись в воздухе, в неподвижной воде и при течении воды со скоростями до 7 м/с. Аналогичные испытания для моделей ТВС других типов описаны в [1]. Крепления хвостовика и головки макетов ТВС в колонке гидродинамического стенда соответствовали штатным, реализованным в реакторе ВВЭР-440. Хвостовик ТВС имел опору “шар — по конусу” аналогично установке рабочей ТВС в днище корзины активной зоны. Головка макета ТВС фиксировалась нажимным устройством через верхние торцы подпружиненных пальцев, имитирующим поджатие ТВС плитой блока защитных труб (БЗТ) (рис. 2). При этом усилие P поджатия подпружиненных пальцев головки макета ТВС может изменяться вплоть до исчерпания их хода ~22 мм и составляет около 300 Н [3].

Достаточно простым и наиболее надежным способом определения динамических характеристик (присоединенной массы и коэффициента демпфирования) является анализ затухающих процессов свободных колебаний выведенной из состояния равновесия механической системы. Для возбуждения свободных колебаний начальный прогиб пучка твэлов создавался за счет усилия штока электромагнита в области шестой дистанционирующей решетки, т.е. практически в середине пучка твэлов. При от-

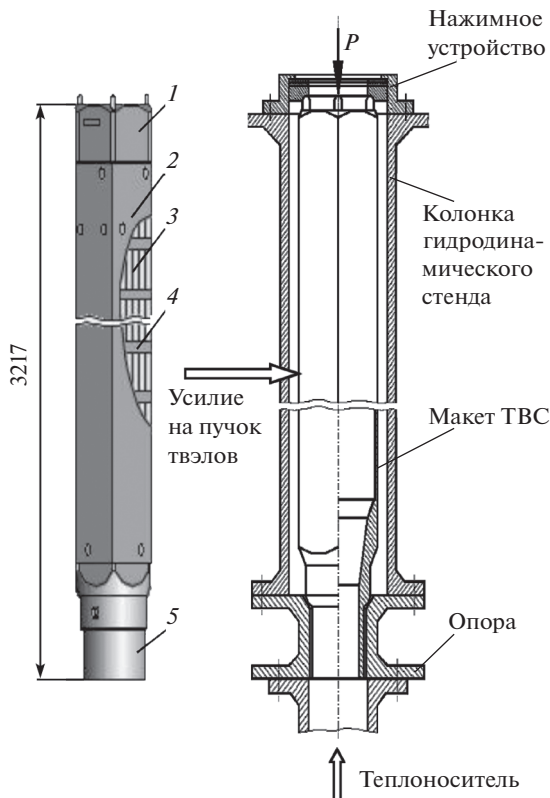


Рис. 2. ТВС ВВЭР-440 и схема ее закрепления в колонке гидродинамического стенда: 1 – головка ТВС; 2 – шестигранный чехол; 3 – тепловыделяющий элемент; 4 – дистанционирующая решетка; 5 – хвостовик.

ключении питания электромагнита прекращалось силовое воздействие штока на пучок твэлов и он совершал свободные колебательные движения, которые фиксировались в виде сигналов установленных в твэлах пьезорезистивных виброакселерометров в составе измерительных каналов с интегрирующими усилителями (рис. 3). Включенные в измерительные каналы с интегрирующими усилителями виброакселерометры позволяли измерять непосредственно виброперемещения [4–6]. При усилении вертикального поджатия с исчерпанием хода подпружиненных пальцев реализуются условия закрепления верхней части пучка твэлов типа “заделка”. В этом случае собственная частота изгибных колебаний пучка твэлов составляет 6 Гц. При частичном поджатии подпружиненных пальцев головки ТВС частота колебаний пучка твэлов оказывается несколько меньше ~5.1 Гц.

Собственные частоты колебаний пучка твэлов в неподвижной воде по сравнению с воздухом существенно снижаются из-за эффектов присоединенной массы (рис. 4) и составляют около 3.9...4.2 Гц. Присоединенная масса оценивалась по данным о собственных частотах изгибных колебаний пучка твэлов в воздухе $f_0 \sim 1/l^2 \sqrt{EI/m_0}$ и в неподвижной воде $f_w \sim 1/l^2 \sqrt{EI/(m_0 + m_w)}$ по соотношению

$$m_w/m_0 = (f_0/f_w)^2 - 1, \quad (1)$$

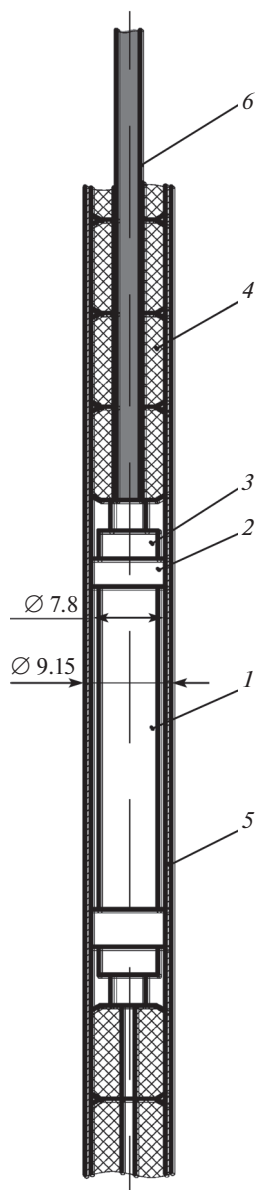


Рис. 3. Схема размещения пьезорезистивного виброакселерометра в твэльной трубке макета ТВС: 1 – пьезорезистивный виброакселерометр; 2 – фторопластовые кольца; 3 – гайка; 4 – имитаторы топливных таблеток; 5 – твэльная трубка; 6 – кабель пьезорезистивного виброакселерометра.

где m_o , m_w – массы пучка твэлов и присоединенной жидкости соответственно; E, I – модуль упругости и момент инерции пучка твэлов; l – длина пучка твэлов.

Удельная масса единичного твэла (твэльная оболочка и имитаторы ядерного топлива) известна и составляет $m_{\text{ТВ}} = 0.622 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$. Удельная масса пучка в целом определяется суммированием удельных масс всех твэлов и центральной трубки

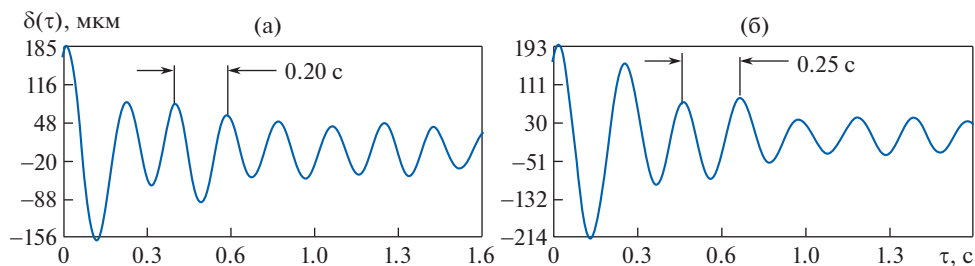


Рис. 4. Затухающие гармонические колебания пучка твэлов в воздухе (а) и в неподвижной воде (б) в сечении ($z = 1365$ мм) при начальном отклонении $\Delta = 600$ мкм в направлении перпендикулярно грани пучка при частичном поджатии подпружиненных пальцев головки макета ТВС в колонке гидродинамического стенда.

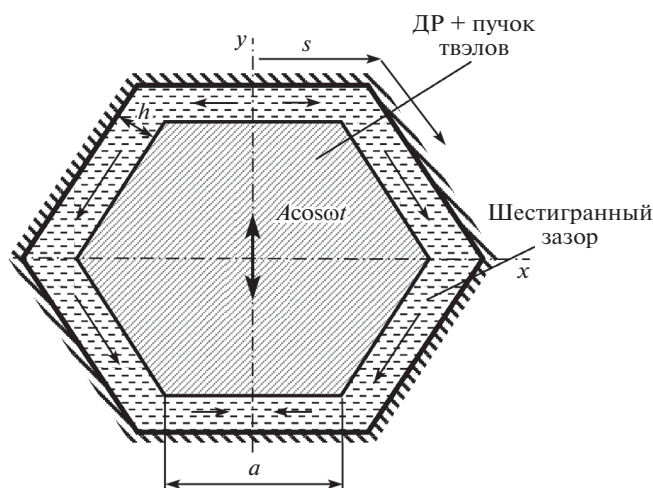


Рис. 5. Виброперемещения ДР в заполненном жидкостью шестигранном зазоре между ДР и чехлом.

$$m_0 = nm_{\text{ТВ}} + m_{\text{ЦТ}} = 78.6 \frac{\text{КГ}}{\text{М}}, \quad (2)$$

где $n = 126$ – количество твэлов; $m_{\text{ТВ}}$, $m_{\text{ЦТ}}$ – погонные массы твэла и центральной трубки ($m_{\text{ЦТ}} = 0.22 \text{ кг/м}$).

Тогда из (1) с учетом (2) получается значение присоединенной массы пучка твэлов

$$m_w = \left(\left(\frac{f_0}{f_w} \right)^2 - 1 \right) m_0 = 50.6 \frac{\text{КГ}}{\text{М}} \quad (3)$$

При вычислении m_w по выражению (3) были приняты значения частот $f_0 = 5.0$ Гц, $f_w = 3.9$ Гц, которые наблюдались на диаграммах спектральных плотностей виброперемещений.

Расчетное определение удельной присоединенной массы пучка твэлов методом конечных объемов. Расчет присоединенной массы при колебаниях пучка в неподвижной воде можно выполнить с помощью прямого численного моделирования методом конечных объемов (МКО), как это было показано в [7, 8]. В работе [7] МКО тестировался на

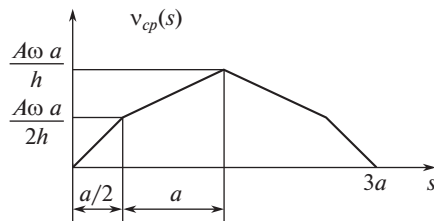


Рис. 6. Распределение амплитуды средней скорости потока по периметру шестигранного зазора.

задаче о вибрациях трубки в цилиндрическом канале, для которой предварительно было построено решение на основе численного интегрирования уравнений Навье–Стокса. В работе [8] МКО был непосредственно применен для определения присоединенной массы пучка твэлов в предположении, что задачу гидромеханики можно рассматривать как плоскую и влияние дистанционирующих решеток (ДР) несущественно. Отметим, что как в [7], так и в [8] не рассматривалось течение жидкости, а сечения элементов конструкции принимались жесткими. Близкая задача о вибрациях двух упругих цилиндрических оболочек, между которыми течет поток пульсирующей жидкости рассматривалась в [9] на основе совместного решения уравнений Навье–Стокса и уравнений механики упругих оболочек. Колебания цилиндрической оболочки конечной длины в жидкости рассмотрены в работе [10].

Для численного определения присоединенной массы применялся компьютерный пакет решения задач гидродинамики OpenFOAM [8, 11]. Рассматривалось плоское течение воды между твэлами, а также между твэлами и чехлом с учетом неподвижных границ чехла. Пучку твэлов сообщались гармонические колебания с амплитудой $A = 100$ мкм и частотой $f = 3.9$ Гц. После установления гармонического режима колебаний жидкости вычислялось максимальное за период колебаний значение удельной (на единицу длины пучка) кинетической энергии жидкости $T_{\max}$. По величине кинетической энергии находилась присоединенная масса [8]

$$m_{\text{wMCO}} = \frac{2T_{\max}}{(A2\pi f)^2} = 30.7 \frac{\text{кг}}{\text{м}}. \quad (4)$$

Этот результат существенно меньше, чем определенное в эксперименте по формуле (3) значение $m_w = 50.6$ кг/м. Полученное расхождение значений значительное и поэтому не может быть связано с возможными ошибками численного метода.

Учет влияния дистанционирующих решеток на формирование присоединенной массы. Существенное расхождение расчетных и экспериментальных результатов говорит о наличии неучтенных элементов конструкции, которые также формируют присоединенную массу. По мнению авторов, такими неучтенными элементами конструкции пучка являются дистанционирующие решетки. Шестигранный наружный контур ДР образует с шестигранной внутренней границей чехла узкий зазор. Поперечные колебания ДР вместе с пучком твэлов вызывают в узком канале течение жидкости, скорость которого намного выше, чем скорость движения ДР.

Виброперемещения дистанционирующих решеток вместе с пучком твэлов приводят к возникновению периодических перемещений жидкости в шестигранном зазоре между ДР и чехлом (рис. 5). При колебаниях пучка в направлении оси y в шестигранном зазоре возникает движение жидкости с распределением скорости симметричным относительно оси y . Распределение амплитуды средней скорости по периметру зазора определялось из условия неразрывности (рис. 6), аналогично работе [12].

Распределение средней скорости по периметру зазора на рис. 6 было получено из элементарных геометрических соображений. Аналитическая зависимость средней скорости на одной четверти шестиугольного контура имеет вид

$$v_{cp}(s) = \begin{cases} \frac{A\omega}{h}s, & s < \frac{a}{2} \\ \frac{A\omega a}{2h} + \frac{A\omega}{2h}\left(s - \frac{a}{2}\right), & \frac{a}{2} \leq s \leq \frac{3a}{2}, \end{cases} \quad (5)$$

где h — ширина зазора между ДР и чехлом; a — сторона шестиугольного контура ДР (рис. 5).

Удельная присоединенная масса для ДР определялась по величине кинетической энергии жидкости, протекающей в зазоре

$$m_{wDP} = \frac{2T_{max}}{(A\omega)^2} = \frac{2}{(A\omega)^2} \int_0^{6a} \frac{\rho v_{cp}^2(s)}{2} h ds = \frac{4\rho h}{(A\omega)^2} \int_0^{3a/2} v_{cp}^2(s) ds, \quad (6)$$

где ρ — плотность воды.

При преобразованиях в (6) учтена симметрия потока относительно двух осей.

Интеграл в (6) с учетом зависимостей (5) вычисляется аналитически, что приводит к формуле для присоединенной массы шестиугольника, вибрирующего в шестиугольном канале, заполненном жидкостью

$$m_{wDP} = \frac{5\rho a^3}{2h}. \quad (7)$$

Подстановка значений $a = 80.5$ мм; $h = 3$ мм дает для удельной присоединенной массы ДР весьма большое значение, что обусловлено малой шириной зазора h

$$m_{wDP} = \frac{5 \times 1000 \times (0.0804)^3}{2 \times 0.003} = 435 \frac{\text{кг}}{\text{м}}. \quad (8)$$

Расчетная присоединенная масса пучка твэлов с учетом ДР была найдена комбинацией (4) и (8)

$$m_{w,расч} = \frac{l - kb}{l} m_{wMCO} + \frac{kb}{l} m_{wDP} = 50.1 \frac{\text{кг}}{\text{м}}, \quad (9)$$

где $l = 2520$ мм — длина пучка твэлов; $b = 11$ мм — высота ДР; $k = 11$ — количество ДР в пучке твэлов.

Полученное значение отличается от экспериментального (для частоты колебаний в воде 3.9 Гц) всего на 1%, что по мнению авторов подтверждает предположение о существенном влиянии ДР на присоединенную массу пучка твэлов в чехловых ТВС.

Следует отметить, что учет влияния дистанционирующих решеток приводит к весьма неоднородному распределению интенсивности присоединенной массы по длине пучка. Фактически ДР создают сосредоточенные присоединенные массы величиной 4.8 кг в местах их расположения. Такая неравномерность в распределении присоединенной массы мало сказывается на низших частотах пучка, но она неизбежно будет искажать результаты расчета собственных частот тем сильнее, чем выше номер разыскиваемой формы колебаний. Очевидно, что обнаруженный эффект необходимо учитывать при расчете частот и форм колебаний пучка твэлов в чехловых ТВС.

ВЫВОДЫ

1. Кажущееся несовпадение экспериментально найденной и расчетной величины присоединенной массы для пучка твэлов реактора ВВЭР-440 удалось объяснить не учитываемым ранее влиянием ДР.

2. Учет ДР при вычислении присоединенной массы позволяет получить ее значение, практически совпадающее с найденным в эксперименте (расхождение составляет единицы процентов).

3. Малые размеры ДР приводят к крайне неравномерному распределению присоединенной массы по длине пучка, что необходимо иметь в виду при расчете частот и форм колебаний пучка твэлов в чехловых ТВС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дроздов Ю.Н., Макаров В.В., Афанасьев А.В., Матвиенко И.В., Осипова Е.П., Назарова Т.И. Динамические характеристики макета тепловыделяющей сборки в потоке теплоносителя // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2012. № 2. С. 85–90.
2. Дроздов Ю.Н., Макаров В.В., Афанасьев А.В., Пучков В.Н., Осипова Е.П. Процесс трения образцов оболочек твэл и ячеек дистанционирующих решеток тепловыделяющей сборки реактора ВВЭР // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2012. № 5. С. 47–52.
3. Активные зоны ВВЭР для атомных электростанций / В.Д. Шмелев и др. М.: ИКЦ Академкнига, 2004. 220 с.
4. Гетья С.И., Солонин В.И., Перевезенцев В.В. и др. Опыт разработки и использования пьезорезистивных виброакселерометров для измерения вибрационных характеристик тепловыделяющих сборок водоохлаждаемых ядерных реакторов // Датчики и системы. 2006. № 10. С. 25–29.
5. 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. № 4. С. 237–240.
6. Солонин В.И., Перевезенцев В.В. Влияние гидродинамических нагрузок на вибрации пучков твэлов тепловыделяющих сборок реакторов типа ВВЭР // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2009. № 4. С. 92–97.
7. Крутько Е.С., Сорокин Ф.Д. Расчет присоединенной массы и коэффициента демпфирования для вибрирующего в цилиндрическом канале жесткого цилиндра на основе численного интегрирования уравнений движения вязкой жидкости // Изв. вузов. Машиностроение. 2012. № 10. С. 46–51.
8. Крутько Е.С., Сорокин Ф.Д. Расчет присоединенной массы и коэффициента демпфирования вибрирующих в жидкости тел методом конечных объемов с приложением к расчету параметров пучка твэлов реактора ВВЭР-440 // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2013. № 8. С. 47–53.
9. Кондратов Д.В., Кондратова Ю.Н., Могилевич Л.И. Исследование амплитудных частотных характеристик колебаний упругих стенок трубы кольцевого профиля при пульсирующем движении вязкой жидкости в условиях жесткого заземления по торцам // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2009. № 3. С. 15–21.
10. Косарев О.И., Остапишин Н.М., Бедный И.А., Мамонова М.Г. Распределение давления жидкости по длине конечной цилиндрической оболочки при ее колебаниях // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2012. № 4. С. 97–100.
11. The OpenFOAM Foundation [Официальный сайт]. URL: <http://www.openfoam.org/>
12. Солонин В.И., Сорокин Ф.Д., Перевезенцев В.В. Демпфирование колебаний пучка твэлов тепловыделяющих сборок водоохлаждаемых реакторов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2008. № 3. С. 75–85.