

Экспериментальные исследования динамических характеристик пучков твэлов ТВС ВВЭР-440

77-30569/215179

10, октябрь 2011

Перевезенцев В. В.

УДК 621.039.524

МГТУ им. Н.Э. Баумана
vpereves@power.bmstu.ru
vladimirperevezencev@rambler.ru

Вибрации тепловыделяющих сборок (ТВС) ядерных реакторов в турбулентном потоке теплоносителя могут приводить к образованию дефектов оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭлов) вплоть до их разгерметизации с выходом радиоактивных продуктов деления в контур циркуляции теплоносителя. Для анализа процессов гидродинамического возбуждения вибраций ТВС необходимо располагать количественными характеристиками взаимодействия потока с обтекаемыми поверхностями такой механической колебательной системы. Динамические характеристики механических колебательных систем, в частности, ТВС ядерных реакторов (собственные частоты, присоединенные массы, коэффициенты демпфирования) в значительной степени зависят от гидродинамики течения теплоносителя. Вибрации пучков ТВЭлов в потоке теплоносителя существенно отличаются от колебательных процессов в воздухе. Собственные частоты колебаний снижаются, что интерпретируется через увеличение массы колеблющейся системы за счет присоединенной массы воды. Рассеяние энергии колебаний интенсифицируется, что в количественном виде характеризуется повышением коэффициентов демпфирования. Количественная информация по динамическим характеристикам пучков ТВЭлов ТВС в большинстве случаев может быть получена только на базе экспериментальных исследований.

ТВС в турбулентном потоке теплоносителя следует рассматривать как гидроупругую систему, состоящую из механической и гидродинамической подсистем. ТВС реакторов ВВЭР как механическая колебательная система состоит из пучка цилиндрических, расположенных по треугольной решетке, ТВЭлов жестко закрепленных одним концом в нижней опорной решетке. ТВЭлы объединены в пучок несколькими промежуточными дистанционирующими решетками сотового типа [1]. В чехловых ТВС ВВЭР-440 верхняя дистанционирующая решетка снабжена

широким ободом для центрирования пучка твэлов в верхней его части посредством выступов на чехле. Остальные дистанционирующие решетки не имеют механического контакта с чехлом. Таким образом, реализуются условия упругой опоры в верхней части пучка твэлов. В бесчехловых ТВС жесткость пучка твэлов обеспечивается, в основном, каркасом либо из направляющих каналов, либо уголков жесткости.

При турбулентном течении теплоносителя в ТВС поля пульсаций давления на обтекаемых поверхностях формируют случайные гидродинамические нагрузки, которые и вызывают вибрации отдельных твэлов и пучка в целом [2]. Однако продольное турбулентное течение не только возбуждает колебания, но и способствует рассеянию энергии этих колебаний. Механизмы демпфирования колебаний связывают с сопротивлением движению в вязкой жидкости твэлов при их изгибных деформациях, а также с возникновением поперечной составляющей скорости при несовпадении оси твэла с направлением потока теплоносителя. Поперечная составляющая скорости направлена против перемещения твэла при его колебаниях, что и обеспечивает дополнительное по сравнению с неподвижной вязкой средой демпфирование колебаний.

В настоящее время недостаточно данных по динамическим характеристикам пучков твэлов в продольном потоке теплоносителя (собственные частоты колебаний пучка, присоединенные массы, демпфирующие свойства пучков). Проводимые в течение длительного времени экспериментальные исследования на фрагментарных моделях пучков твэлов не позволяют, как правило, получить надежные данные по динамическим характеристикам в реакторных условиях закрепления ТВС с учетом влияния течения теплоносителя. При частичном моделировании невозможно воспроизвести конструкционное демпфирование для натурных ТВС, а также полностью смоделировать эффекты гидроупругости. В настоящее время недостаточно сведений о механизмах рассеяния энергии колебаний в продольном потоке теплоносителя. Это существенно сдерживает разработку расчетных моделей гидродинамического возбуждения вибраций ТВС ядерных реакторов.

В данной работе проведены систематические экспериментальные исследования динамических характеристик пучка твэлов ТВС ВВЭР-440 в условиях моделирования реакторных условий закрепления хвостовика и головки ТВС. 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). При этом усилие P поджатия подпружиненных пальцев головки макета ТВС может изменяться вплоть до исчерпания их хода ~ 22 мм при этом оно составляет около 300 Н [1].

Все экспериментальные исследования выполнены с использованием полномасштабного макета ТВС ВВЭР-440 второго поколения, изготовленных по штатной технологии из штатных конструкционных материалов со свинцовыми имитаторами топливных таблеток. Методика экспериментальных исследований заключалась в возбуждении свободных колебаний пучка твэлов путем внезапного снятия сосредоточенной поперечной статической нагрузки, обеспечивающей начальный прогиб пучка твэлов. Начальный прогиб пучка твэлов создавался за счет усилия штока электромагнита в области шестой дистанционирующей решетки, т.е. практически в середине пучка. При отключении питания электромагнита прекращается силовое воздействие штока, и пучок совершает свободные колебательные движения (рис. 1).

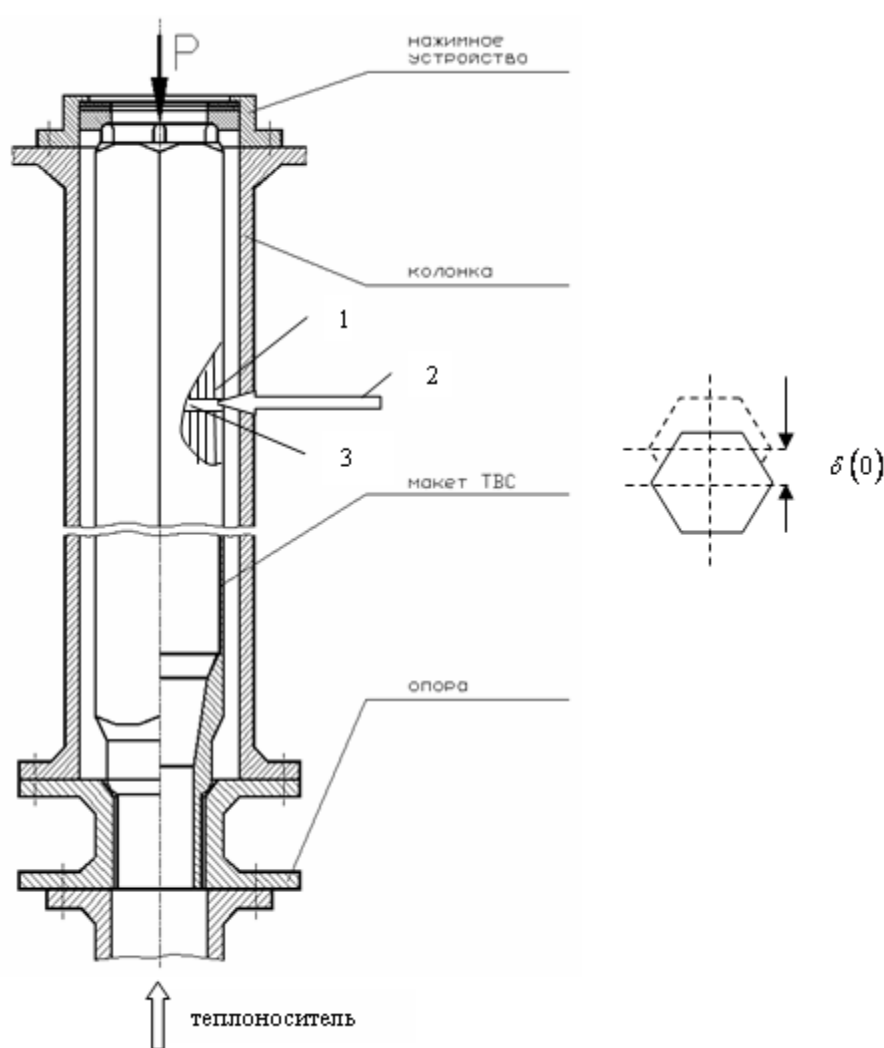


Рис. 1. Схема возбуждения свободных колебаний пучка твэлов методом начального отклонения с моделированием реакторных условий закрепления головки и хвостовика макета ТВС ВВЭР-440

1 - пучок твэлов; 2 - направление усилия для создания начального прогиба;
3 - дистанционирующая решетка

Вибрации пучка твэлов макета ТВС ВВЭР-440 измерялись с использованием двухкомпонентных (с измерительными осями в плоскости, перпендикулярной оси макета) пьезорезистивных виброакселерометров. Виброакселерометры размещались и фиксировались внутри твэльной трубки по боковой внутренней поверхности с помощью фторпластовых втулок (рис. 2). Записанные сигналы сигналов виброакселерометров в составе измерительных каналов с интегрирующими усилителями фильтровались в частотном диапазоне 3...6 Гц в окрестности собственной частоты колебаний пучка, что обеспечивало высокое качество реализаций виброперемещений и возможность корректной обработки полученных данных.

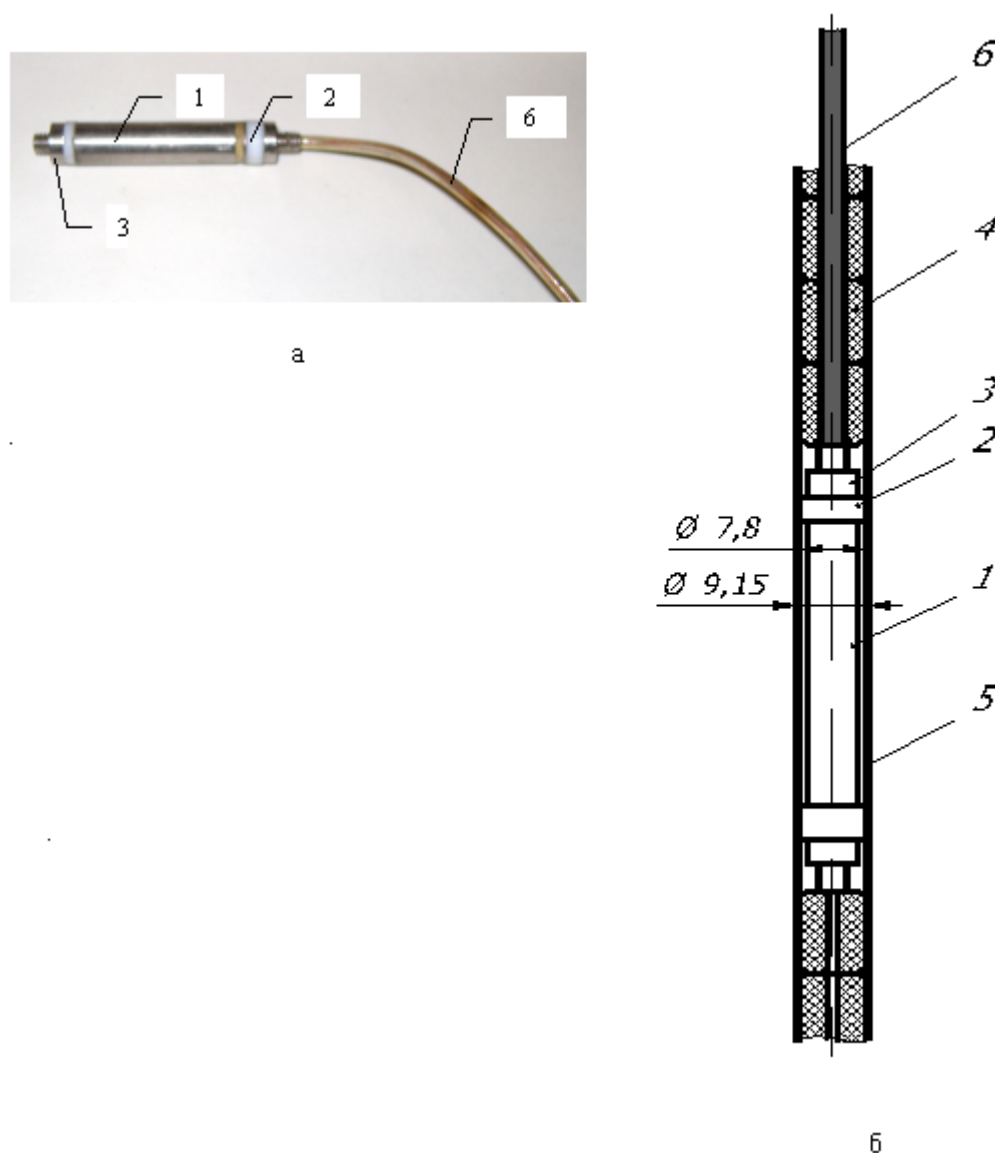


Рис. 2. Общий вид пьезорезистивного виброакселерометра (а) и схема его размещения внутри твэльной трубки (б)

1 - корпус виброакселерометра; 2 - фторпластовая втулка; 3 - гайка; 4 - имитаторы топливных таблеток; 5 - твэльная трубка; 6 - кабель виброакселерометра

При условиях закрепления головки и хвостовика макета ТВС в колонке гидродинамического стенда, аналогичных реакторным, собственные частоты колебаний в воздухе в направлении перпендикулярно грани пучка твэлов составляют от 6 Гц при полном поджатии подпружиненных пальцев до 5,1 Гц при частичном поджатии. Собственные частоты колебаний пучка твэлов в макронеподвижной воде по сравнению с воздухом существенно снижаются из-за эффектов присоединенной массы и составляют около 3,9...4,2 Гц (рис. 3).

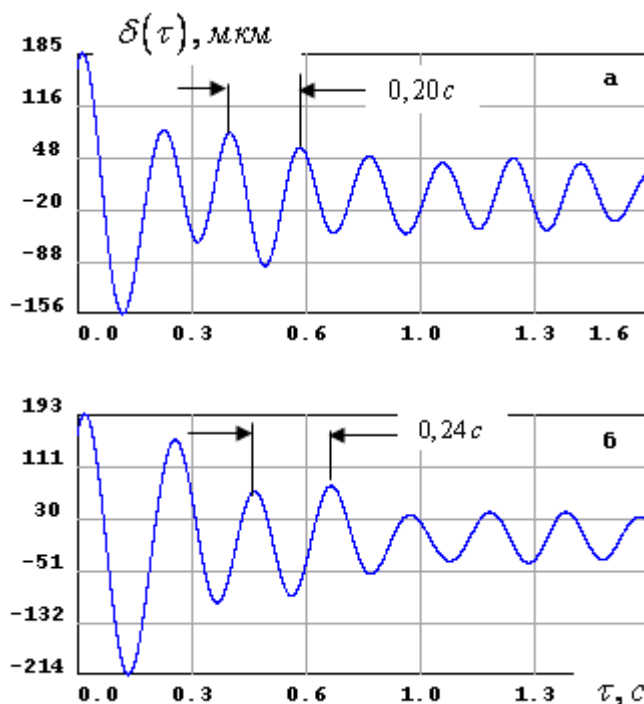


Рис. 3. Затухающие гармонические колебания пучка твэлов в воздухе (а) и в макронеподвижной воде (б) в сечении $z=1365$ мм при начальном отклонении $\delta(0)=600$ мкм в направлении перпендикулярно грани пучка при штатных условиях закрепления макета ТВС в колонке гидродинамического стенда.

Полученные экспериментальные значения собственных частот колебаний пучка твэлов в воздухе $f_0 \sim 1/l^2 \cdot \sqrt{EI/m_0}$ и макронеподвижной воде $f_w \sim 1/l^2 \cdot \sqrt{EI/(m_0+m_w)}$ позволяют оценить значение присоединенной массы

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

где m_0, m_w - массы пучка твэлов и присоединенной жидкости соответственно; E, I - модуль упругости и момент инерции пучка твэлов; l - длина пучка твэлов. Относительная масса присоединенной жидкости (по отношению к массе пучка твэлов) m_w/m_0 при колебаниях пучка твэлов достигает 1,36 при полном поджатии подпружиненных пальцев (собственная

частота в воздухе 6 Гц) и 0,71 при частичном поджатии подпружиненных пальцев (собственная частота в воздухе 5,1 Гц).

В практике анализа вибрационных процессов, возбуждаемых турбулентным потоком, используется коэффициент присоединенной массы, который определяется как отношение присоединенной массы к массе вытесненной пучком твэлов жидкости [3]

$$\alpha = m_w / \left(\rho \frac{\pi d_r^2}{4} \cdot n \right), \quad (2)$$

где ρ - плотность жидкости; d_r, n - диаметр твэла и их количество в пучке.

Значения коэффициентов присоединенной массы составляют $\alpha=13,1$ в условиях полного поджатия подпружиненных пальцев и $\alpha=6,8$ при частичном поджатии подпружиненных пальцев. Течение воды практически не влияет на собственные частоты пучка твэлов, но существенно повышает интенсивность рассеяния энергии колебаний [2, 4]. На рис. 4 приведены характерные реализации затухающих гармонических колебаний пучка твэлов в сечении $z=1365$ мм при различных скоростях течения воды после внезапного снятия статической нагрузки в сечении $z=1365$ мм на уровне шестой дистанционирующей решетки. С увеличением скорости течения воды в пучке рассеяние энергии колебаний интенсифицируется. При высоких скоростях течения пучок твэлов после 1...2 колебаний выходит на соответствующий данной скорости установившейся уровень амплитуд виброперемещений. При этом период колебаний практически остается постоянным при всех скоростях в исследованном диапазоне их изменения до ~ 7 м/с. Таким образом, собственные частоты колебаний пучка не зависят от скорости течения, а демпфирование увеличивается с ее ростом.

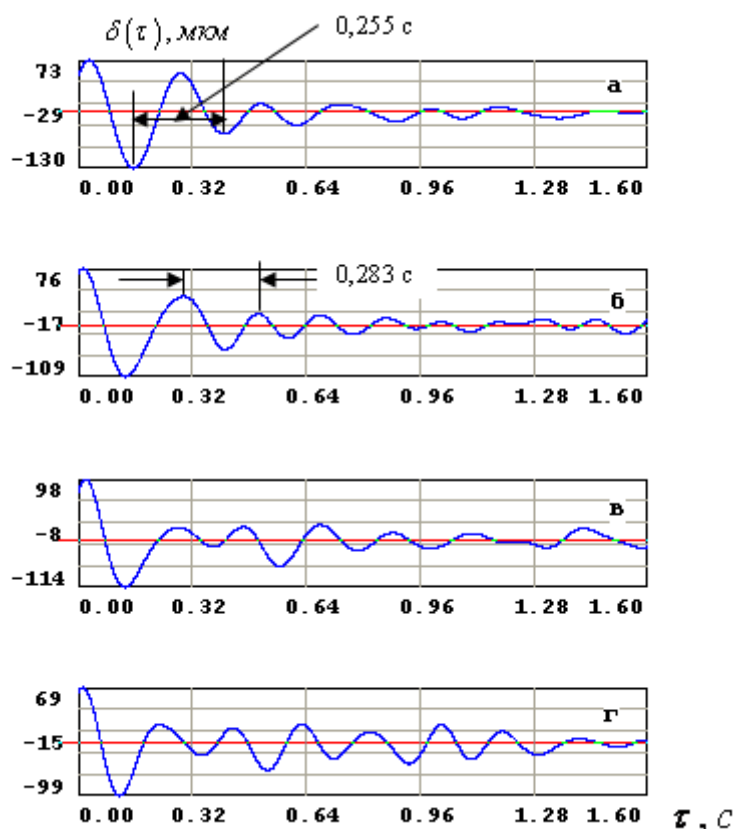


Рис. 4. Затухающие гармонические колебания пучка твэлов при течении воды с различными скоростями при начальном отклонении $\delta(0)=600$ мкм в сечении $Z=1365$ мм в направлении перпендикулярно грани пучка при штатных условиях закрепления макета ТВС в колонке гидродинамического стенда

а- $V=0,86$ м/с; б- $1,72$ м/с; в- $3,44$ м/с; г- $5,16$ м/с

Диссипативную силу (силу сопротивления колебаниям) традиционно считают пропорциональной скорости движения упругого элемента $f_{dis} \sim -\zeta \cdot \frac{d\delta}{d\tau}$, где ζ - коэффициент демпфирования; δ - виброперемещение [2]. Очевидно, коэффициент демпфирования складывается из двух составляющих, одна из которых ζ_k обусловлена конструкционными потерями энергии (трение в зоне контактов пуклевки дистанционирующих решеток с оболочками твэлов, внутреннее демпфирование в материале оболочек и т.д.), а вторая ζ_g - потерями энергии на преодоление сопротивления колебаниям со стороны потока теплоносителя:

$$\zeta = \zeta_k + \zeta_g. \quad (3)$$

Коэффициент конструкционного демпфирования пучка твэлов зависит от многих характеристик ТВС как механической системы, и его количественные значения могут быть

определены только экспериментально. По данным [2, 5] коэффициенты гидродинамического демпфирования могут существенно превышать коэффициенты конструкционного демпфирования, и их роль может быть определяющей в ограничении интенсивности вибраций. Поэтому исследования процессов рассеяния энергии колебаний пучка твэлов в продольном потоке теплоносителя и получение надежных количественных данных по гидродинамическому демпфированию колебаний являются необходимым этапом разработки моделей гидродинамически возбуждаемых вибраций ТВС ядерных реакторов. В настоящее время практически отсутствуют систематические экспериментальные данные по влиянию скорости течения теплоносителя на коэффициенты демпфирования колебаний пучков твэлов ТВС. В то же время расчетные модели прогноза интенсивности и спектрального состава вибрационного отклика ТВС на гидродинамическое воздействие турбулентного потока содержат количественные характеристики эффектов рассеяния энергии колебаний в потоке теплоносителя.

Из уравнения свободных колебаний механической системы (пучка твэлов) с одной степенью свободы при наличии потерь энергии, пропорциональных скорости [6]

$$m_0 \cdot \frac{d^2 \delta}{d\tau^2} + \zeta \cdot \frac{d\delta}{d\tau} + k \cdot \delta = 0, \quad (4)$$

где m - масса механической системы (пучка твэлов); ζ, k - коэффициент демпфирования и жесткость механической системы (пучка твэлов),

следуют соотношения для коэффициента демпфирования колебаний $\zeta = 2m \cdot f_0 \cdot d$ и собственной частоты колебаний $f_0 = \sqrt{k/m}/2\pi$. Экспериментальные данные (реализации затухающих колебаний) обобщались на основе экспоненциальных функций убывания амплитуды колебаний:

$$\delta(z, \tau) = \delta(z, 0) \cdot \exp(-\gamma \cdot \tau) \cdot \sin(2\pi f_0 \cdot \tau + \varphi_0) \quad (5)$$

где $\delta(z, 0)$ – начальная амплитуда колебаний; γ – коэффициент затухания; f_0 – низшая собственная частота колебаний пучка; φ_0 – начальная фаза колебаний.

На рис. 5 приведены относительные значения амплитуд колебаний пучка $\delta(z, \tau)/\delta(z, 0)$ в воздухе и макронеподвижной воде. Декремент колебаний определялся по значениям амплитуд, отстоящих друг от друга на период колебаний $T = 1/f_0$

$$d = \ln \frac{\delta(z, \tau)}{\delta(z, \tau + T)} = \gamma \cdot T = \gamma / f_0. \quad (6)$$

На основе выполненных обобщений были определены коэффициенты затухания γ и получены значения логарифмических декрементов $d = \gamma \cdot T = \gamma / f_0$. Значения логарифмических декрементов колебаний в воздухе (конструкционное демпфирование) и макронеподвижной воде составляют 0,17 и 0,36 соответственно. Таким образом, интенсивность рассеяния энергии колебаний в макронеподвижной жидкости более чем в два раза выше по сравнению с колебаниями в воздухе, когда проявляются только эффекты конструкционного демпфирования.

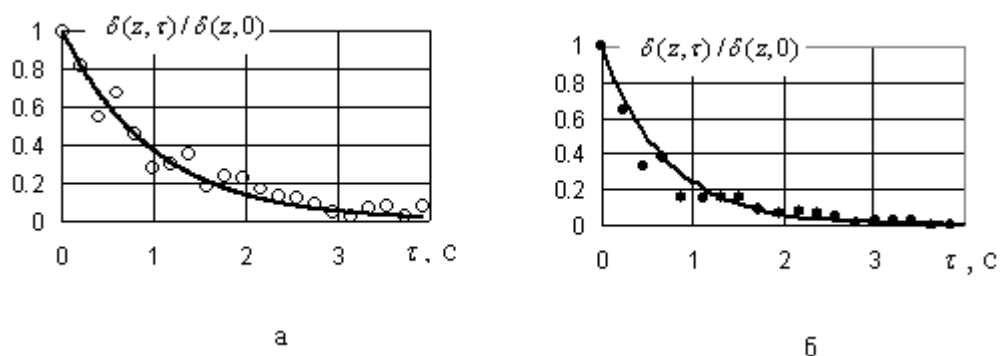


Рис. 5. Функции затухания амплитуд колебаний в воздухе (а) и макронеподвижной воде (б) пучка твэлов, выведенного из состояния равновесия методом начального отклонения

Течение воды в ТВС интенсифицирует процессы рассеяния энергии колебаний, о чем наглядно свидетельствует увеличение коэффициентов затухания γ с ростом скорости воды в пучке твэлов (рис. 6). В условиях отсутствия воды в макете ТВС, когда затухание колебаний обусловлено только конструкционными потерями, значение коэффициента демпфирования оставило $\zeta_k = 250 \text{ Н} \cdot \text{с} / \text{м}^2$, которое соответствует декременту колебаний $d \approx 0,33$. Следует отметить высокие конструкционные демпфирующие свойства твэлов, объединенных в единый пучок дистанционирующими решетками. По данным [2] для отдельных труб с количеством опор до восьми штук значения декрементов колебаний не превышают 0,15.

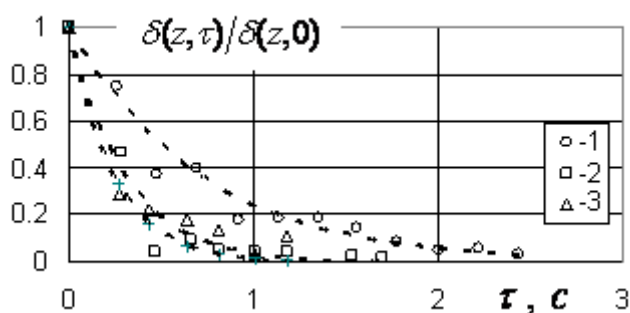


Рис. 6. Функции затухания амплитуд колебаний пучка твэлов при различных скоростях течения теплоносителя в ТВС

1- в макронеподвижной жидкости; 2- $V = 2,15 \text{ м/с}$; 3- $3,87 \text{ м/с}$

В практике представлений данных по демпфированию колебаний часто используется относительный (по отношению к критическому значению) коэффициент демпфирования. Колебательный характер изменения перемещения $\delta(\tau)$ во времени переходит в монотонный при критическом значении коэффициента демпфирования $\zeta_{кр} = 2 \cdot \sqrt{k \cdot m}$ [7]. Тогда относительный коэффициент демпфирования можно выразить через логарифмический декремент колебаний

$$\tilde{\zeta} = \zeta / \zeta_{кр} = d / 2\pi . \quad (7)$$

На рис. 7 приведены результаты экспериментальных исследований влияния течения воды в пучке твэлов ТВС ВВЭР-440 на демпфирование колебаний (вибраций), представленные в виде зависимости относительного коэффициента демпфирования от скорости течения. В макронеподвижной воде относительный коэффициент демпфирования составляет около 5% от критического значения. С ростом скорости течения воды в пучке твэлов наблюдается линейный характер роста относительного коэффициента демпфирования. При характерных для ТВС ВВЭР-440 скоростях течения теплоносителя 3,6...3,8 м/с относительный коэффициент демпфирования может достигать (15...17) % от критического значения. В работах [8] получены коэффициенты гидродинамического демпфирования колебаний пучка твэлов ТВС PWR квадратного сечения с 264 твэлами и каркасом из 24 направляющих каналов и одной инструментальной трубкой (размерность сечения 17×17). Общая высота ТВС составляет 4,26 м. По данным [8] демпфирование колебаний пучков твэлов в ТВС PWR в потоке теплоносителя также достигает (20...23) %. Результаты расчетов и экспериментальные данные свидетельствуют о значительном влиянии турбулентного течения теплоносителя в ТВС на эффекты демпфирования колебаний пучка твэлов, что способствует ограничению амплитуд вибраций при высоких скоростях потока. В области скоростей потока более 1 м/с расчетные значения декрементов колебаний практически линейно зависят от скорости потока, что согласуется с данными [5].

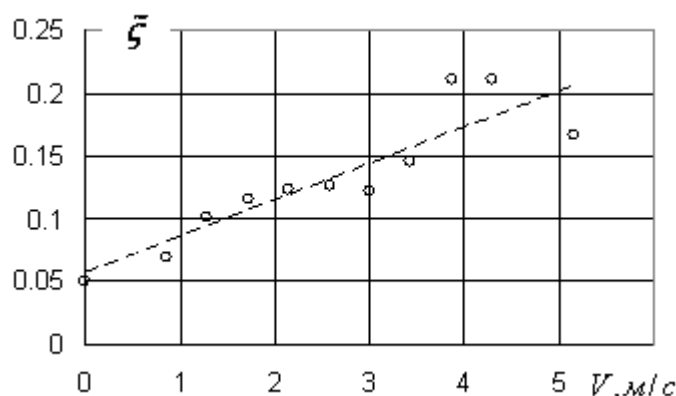


Рис. 7. Зависимость относительного коэффициента демпфирования колебаний пучка твэлов ТВС ВВЭР-440 от скорости течения воды

Гидродинамическое демпфирование колебаний твэл в потоке теплоносителя характеризует общие особенности взаимодействия механической колебательной системы (пучка твэл) с гидродинамикой турбулентного течения. Для всех ТВС эти особенности связаны с продольным обтеканием поверхностей твэл и возникающими при этом гидродинамическими силовыми факторами, ограничивающими колебания. В связи с этим особый интерес представляют данные по демпфированию колебаний, отражающие только гидродинамические эффекты. На рис. 8 приведено сопоставление коэффициентов гидродинамического демпфирования для ТВС PWR и ТВС ВВЭР-440. Представленные данные подтверждают общий характер формирования эффектов диссипации энергии колебаний в пучках твэл, расположенных по треугольной и квадратной решеткам, из-за взаимодействия продольного потока теплоносителя с обтекаемыми поверхностями твэл. При этом наблюдается линейный характер роста коэффициента гидродинамического демпфирования с увеличением скорости течения.

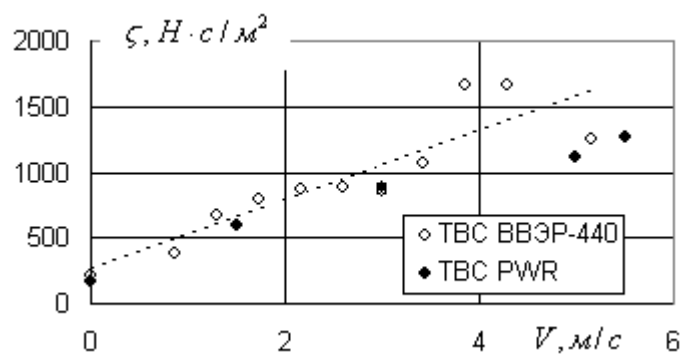


Рис. 8. Сопоставление коэффициентов гидродинамического демпфирования колебаний пучка твэлов ТВС ВВЭР-440 и PWR

Таким образом, в результате проведенных экспериментальных исследований были получены количественные данные по динамическим характеристикам (собственные частоты, присоединенные массы, коэффициенты демпфирования) пучка твэлов ТВС ВВЭР-440 второго поколения. Полученные данные по коэффициентам демпфирования и декрементам колебаний свидетельствуют об определяющей роли гидродинамических процессов рассеяния энергии колебаний пучка твэлов по сравнению с эффектами конструкционного демпфирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Активные зоны ВВЭР для атомных электростанций/ В.Д. Шмелев, Ю.Г. Драгунов, В.П. Денисов [и др.] М.: ИКЦ Академкнига, 2004. 220 с.

2. Вибрации элементов оборудования ядерных энергетических установок/ Е.Д. Федорович, Б.С. Фокин, А.Ф. Аксельрод [и др.]. М.: Энергоатомиздат, 1989. 168 с.
3. Динамика конструкций гидроаэроупругих систем /К.В.Фролов, Н.А. Махутов, С.М. Каплунов [и др.]. М.: Наука, 2002. 397 с.
4. Солонин В.И., Сорокин Ф.Д., Перевезенцев В.В. Демпфирование колебаний пучка твэлов тепловыделяющих сборок водоохлаждаемых реакторов в потоке теплоносителя// Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2009. №3. С. 57-65.
5. Федотовский В.С., Синявский В.Ф., Тереник Л.В. Инерционность и гидродинамическое демпфирование при колебаниях труб и трубных пучков в жидкости//Динамические характеристики и колебания элементов энергетического оборудования: сб. ст. М.: Наука, 1980. С. 86-97.
6. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1980. 408 с.
7. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник в трех томах/ под ред. И.А. Биргера, Я.Г. Пановко. М.: Машиностроение, 1988. Т.1. 831 с.
8. Collard B. Flow induced damping of a PWR fuel assembly// Structural behaviour of fuel assemblies for water cooled reactors: proceedings of technical meeting. Vienna, 2005. P. 279-288.

Experimental investigations of fuel element cluster dynamic characteristics of WWER-440 fuel assembly

77-30569/215179

10, October 2011

Perevezentsev V.V.

Bauman Moscow State Technical University

vpereves@power.bmstu.ru

vladimirperevezencev@rambler.ru

In the experiments the author used a full-scale model of a WWER-440 fuel assembly of the second generation with lead imitators of nuclear fuel tablets. The pilot study technique consisted in free oscillation excitation of a fuel element cluster by sudden removal of concentrated transverse static load which provides the initial sagging of the fuel element cluster. Vibration movements were fixed on the signals of piezoresistive accelerometers which were included in measuring channels with integrating amplifiers. Data on the damping factors indicate the determining role of hydrodynamic processes of dissipation of vibrational energy of a fuel element cluster in comparison with the effects of structural damping.

Publications with keywords: [nuclear reactors](#), [fuel assembly of WWER](#), [vibration fuel rods beam](#), [dynamic characteristics](#), [natural frequencies](#), [apparent additional masses](#), [the hydrodynamic damping](#)

Publications with words: [nuclear reactors](#), [fuel assembly of WWER](#), [vibration fuel rods beam](#), [dynamic characteristics](#), [natural frequencies](#), [apparent additional masses](#), [the hydrodynamic damping](#)

Reference

- V.D. Shmelev, Iu.G. Dragunov, V.P. Denisov, et al., Moscow, IKTs Akademkniga, 2004, 220 p.
- 1.E.D. Fedorovich, B.S. Fokin, A.F. Aksel'rod, et al., Moscow, Energoatomizdat, 1989, 168 p.
- 2.K.V.Frolov, N.A. Makhutov, S.M. Kaplunov, et al., Moscow, Nauka, 2002, 397 p.
- 3.Solonin V.I., Sorokin F.D., Perevezentsev V.V., Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. Mashinostroenie3 (2009) 57-65.
- 4.Fedotovskii V.S., Siniavskii V.F., Terenik L.V., , Moscow, Nauka, 1980, pp. 86-97.
- 5.Biderman V.L., Moscow, Vysshiaia shkola, 1980, 408 p.
- 6.I.A. Birger (Ed.), Ia.G. Panovko (Ed.), Moscow, Mashinostroenie, Vol. 1, 1988, 831 p.
- 7.Collard B. Flow induced damping of a PWR fuel assembly// Structural behaviour of fuel assemblies for water cooled reactors: proceedings of technical meeting. Vienna, 2005. P. 279-288.