

# СЛУЧАЙНЫЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ И ВИБРАЦИИ ТВЭЛОВ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ТВС ВВЭР

**В.В. Перевезенцев**

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,  
г. Москва*



На основании многоточечных измерений пульсаций давления по периметру пучка твэлов полномасштабного макета ТВС ВВЭР-440 второго поколения получены реализации случайных гидродинамических нагрузок, вызывающих вибрации пучка. Установлено, что в области начального гидродинамического участка вблизи нижней опорной решетки ТВС ВВЭР существенное влияние на случайные гидродинамические нагрузки оказывают гидродинамические условия формирования структуры течения на входе в ТВС. Дроссельные шайбы создают вихревую структуру течения с высокими уровнями пульсационной энергии, что приводит к высоким интенсивностям вибраций на начальном гидродинамическом участке. В области установившегося течения уровни случайных гидродинамических нагрузок снижаются и в меньшей степени зависят от гидродинамических условий на входе в ТВС. Получены обобщающие эмпирические зависимости виброперемещений от случайных гидродинамических нагрузок. Обнаружены две характерные области влияния случайных гидродинамических нагрузок на виброперемещения. При значениях случайных гидродинамических нагрузок более 80 Н/м наблюдается существенное увеличение интенсивности вибраций, что объясняется проскальзыванием твэла в ячейке дистанционирующей решетки.

**Ключевые слова:** ядерные реакторы, тепловыделяющие сборки ВВЭР, вибрации пучков твэлов, пульсации давления, случайные гидродинамические нагрузки, спектральные характеристики.

**Key words:** nuclear reactors, the fuel assemblies WWER, vibration of fuel element beams, pressure fluctuation, random hydrodynamic loads, the spectral characteristics.

Вибрационные процессы в ядерных реакторах в значительной степени определяют надежность оборудования и безопасность эксплуатации энергоблока в целом. Воздействие турбулентного потока теплоносителя на конструктивные элементы реакторных систем инициирует и поддерживает их механические колебания (вибрации). Одной из наиболее важных механических систем, определяющих безаварийную работу реакторных установок, являются тепловыделяющие сборки (ТВС). С вибрацией твэлов в продольном турбулентном потоке теплоносителя связаны повреждения оболочек за счет коррозионно-усталостных процессов, износа дебриз-частицами и фреттинг-износа.

Вопросам моделирования ТВС как механической колебательной системы уделялось значительное внимание [1]. Однако анализ процессов гидродинамического возбуждения вибраций невозможен без описания взаимодействия потока с обтекаемыми поверхностями механической колебательной системы. Такая информация в большинстве случаев может быть получена только на базе экспериментальных исследований. При обтекании твэлов турбулентным потоком теплоносителя на обтекаемой поверхности формируются поля пульсаций давления, которые и определяют вызывающие вибрации распределенные случайные гидродинамические нагрузки. Очевидно, характеристики пульсаций давления зависят от режимных параметров потока, структуры течения, сформированной особенностями тракта подвода теплоносителя к ТВС, геометрии проходного сечения пучка твэлов. В работе [2] показано, что пучок твэлов в потоке теплоносителя следует рассматривать как гидроупругую колебательную систему, в которой отдельные твэлы связаны между собой механически нижней опорной и дистанционирующими решетками и гидродинамически – за счет теплоносителя как гидроупругой среды. В связи с этим следует рассматривать вибрации пучка в целом, а не отдельных его твэлов. Экспериментальные исследования полей пульсаций давления как основной характеристики гидродинамического нагружения и вибрационного отклика на него механической системы – пучка твэлов выполнены с использованием полномасштабного макета ТВС ВВЭР-440 второго поколения. Макет изготовлен по штатной технологии из штатных конструкционных материалов со свинцовыми имитаторами топливных таблеток. Это обеспечивает идентичность статических и динамических характеристик макета натурной ТВС, а также моделирование гидродинамических параметров взаимодействия потока с пучком твэлов. Пульсации давления измерялись с помощью малогабаритных пьезорезистивных датчиков, соединенных с областью измерений импульсными линиями. Двухкомпонентные пьезорезистивные виброакселерометры в заданном сечении пучка устанавливались внутри твэльных трубок. Виброакселерометры в составе измерительных каналов с интегрирующими усилителями позволяли измерять непосредственно виброперемещения твэлов [3].

Случайная гидродинамическая сила, действующая на единичную длину пучка твэлов в сечении  $z$  в момент времени  $\tau$  в плоскости, перпендикулярной оси ТВС, определяется распределением мгновенных значений пульсаций давления по периметру внешнего ряда твэлов пучка

$$\vec{f}_g(z, \tau) = - \int_p p'(z, P, \tau) \cdot \vec{n} \cdot dP, \quad (1)$$

где  $p'(z, P, \tau)$  – мгновенные значения пульсаций давления на грани пучка;  $P, \vec{n}$  – периметр внешней границы пучка твэлов и нормаль к внешней границе.

При реализации процедуры (1) для определения мгновенных значений гидродинамических нагрузок в сечении пучка  $z$  в момент времени  $\tau$  необходимо располагать данными по мгновенным значениям пульсаций давления по периметру внешнего ряда пучка в том же сечении. Такие измерения проводились одновременно на внутренней поверхности шести граней чехла ТВС в двух сечениях пучка твэлов. Первое сечение располагалось на расстоянии  $z = 72$  мм от нижней опорной решетки, где гидродинамические характеристики в значительной степени зависят от условий формирования структуры потока на входе в ТВС. Второе сечение  $z = 1527$  мм выбрано вдали от нижней опорной решетки, где гидродинамика определяется, в основном, геометрией пучка твэлов и не зависит от условий на входе в ТВС. Таким образом, были получены одновременно двенадцать сигналов датчиков пульсаций давления. Практически взаимно перпендикулярные составляющие случайных гид-

родинамических нагрузок на единицу длины пучка твэлов по осям  $x$  и  $y$  определялись суммированием мгновенных значений пульсаций давления на внутренних поверхностях всех шести граней чехла с учетом соответствующих тригонометрических функций (рис. 1) [2, 4]:

$$f_{g_x}(z, \tau) = \sum_{i=1}^6 p'(z, \tau) \cdot \cos \varphi_i \cdot a;$$

$$f_{g_y}(z, \tau) = \sum_{i=1}^6 p'(z, \tau) \cdot \sin \varphi_i \cdot a, \quad (2)$$

где  $a$  – ширина грани пучка твэлов по внешнему его ряду.

С целью существенного изменения структуры осредненного и пульсационного течения на входе в ТВС в экспериментах использовались установленные перед хвостовиком дроссельные шайбы трех диаметров 52, 48,5 и 45 мм.

На рисунке 2 показано влияние скорости течения теплоносителя в пучке твэлов на среднеквадратичные значения случайных гидродинамических нагрузок для различных условий формирования структуры потока на входе в ТВС. Возмущающее воздействие дроссельной шайбы на поток с формированием крупномасштабных вихревых структур перед нижней опорной решеткой (т.е. на входе в пучок твэлов) сопровождается существенным увеличением уровней случайных гидродинамических нагрузок вблизи нижней опорной решетки, т.е. на начальном гидродинамическом участке.

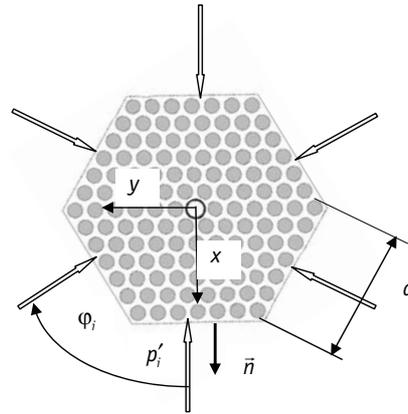


Рис. 1. Схема определения гидродинамических нагрузок на пучок твэлов по измеренным пульсациям давления на внутренней поверхности граней чехла

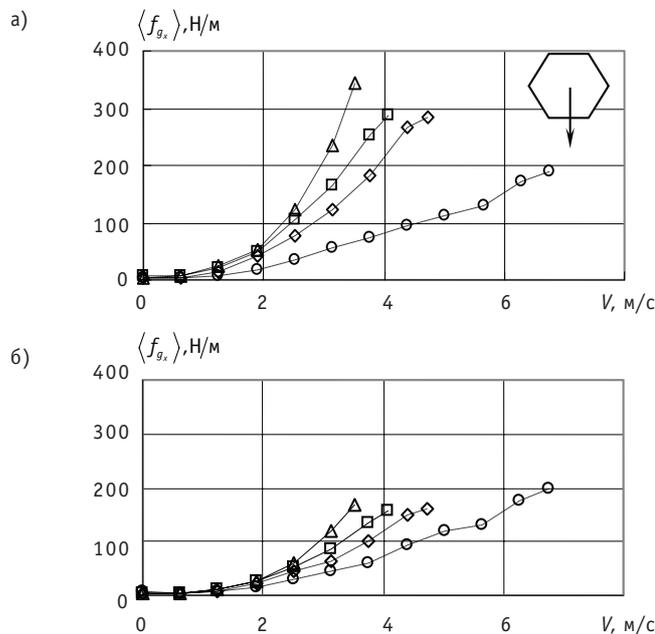


Рис. 2. Зависимость среднеквадратичных значений случайных гидродинамических нагрузок в направлении перпендикулярно грани пучка твэлов в сечениях  $z = 72$  мм (а) и  $z = 1527$  мм (б) от скорости теплоносителя для различных условий формирования структуры потока на входе в ТВС:  $\circ$  – невозмущенное турбулентное течение (без дроссельной шайбы на входе в ТВС);  $\diamond$  – дроссельная шайба 52 мм;  $\square$  – 48,5 мм;  $\triangle$  – 45 мм

По мере удаления от нижней опорной решетки происходит диссипация пульсационной энергии потока теплоносителя, и уровни случайных гидродинамических нагрузок снижаются.

Среднеквадратичные значения виброперемещений на начальном гидродинамическом участке в сечении  $z = 72$  мм достигают наибольших значений в условиях высокой турбулизации потока дроссельными шайбами. Интенсивность вибраций пучка твэлов в различных условиях формирования структуры потока на входе в ТВС полностью соответствует закономерностям изменения случайных гидродинамических нагрузок. В удаленной от нижней опорной решетки в сечении  $z = 1527$  мм уровни случайных гидродинамических нагрузок уменьшаются, и в меньшей степени различаются для разных гидродинамических условий на входе в ТВС. При этом среднеквадратичные значения виброперемещений в этой области пучка для разных условий на входе в ТВС также становятся близкими (рис. 3).

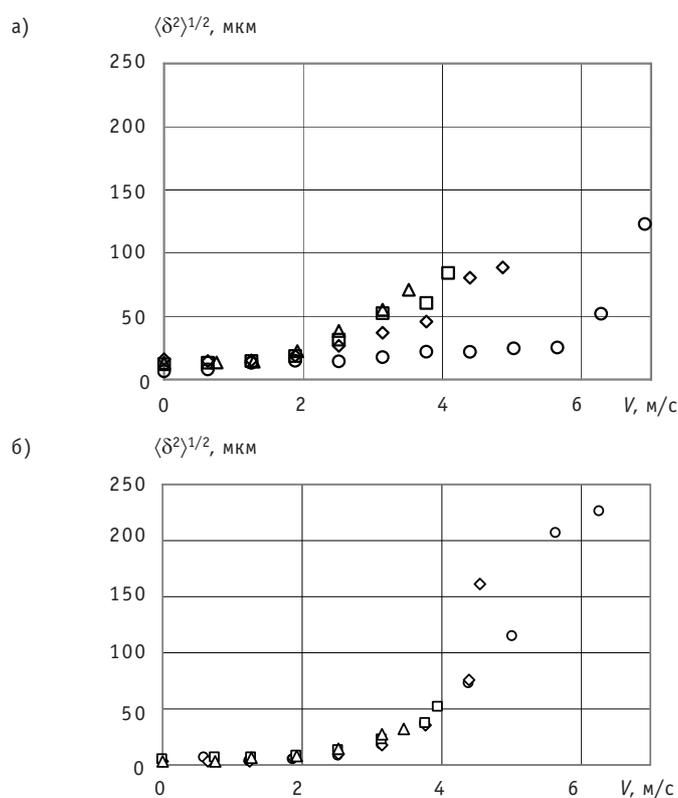


Рис. 3. Влияние скорости потока теплоносителя в пучке твэлов на среднеквадратичные значения виброперемещений на начальном гидродинамическом участке  $z = 72$  мм (а) и в области установившегося течения  $z = 1272$  мм при различных гидродинамических условиях на входе в ТВС:  $\circ$  – невозмущенное турбулентное течение (без дроссельной шайбы на входе в ТВС);  $\diamond$  – дроссельная шайба 52 мм;  $\square$  – 48,5 мм;  $\triangle$  – 45 мм

В области установившегося течения влияние возмущающих течение входных устройств отсутствует, и генерация пульсаций давления, а следовательно, уровни случайных гидродинамических нагрузок определяются градиентом потерь статического давления по длине пучка твэлов, т.е.

$$f_g^\infty \sim \frac{dP}{dz} \cdot S_{np} = \xi \cdot \frac{S_{np}}{d_r} \cdot \frac{\rho V^2}{2}, \quad (3)$$

где  $\xi$  – коэффициент гидравлического сопротивления трения в пучке твэлов;  $S_{пр}$  – площадь проходного сечения пучка твэлов;  $d_t$  – эквивалентный гидравлический диаметр пучка твэлов.

Коэффициент гидравлического сопротивления трения в пучке расположенных по треугольной решетке твэлов в диапазоне чисел Рейнольдса

$\left( Re = \frac{Vd_3}{\nu} = 6 \cdot 10^3 - 10^5 \right)$  определяется соотношением [5]:

$$\xi = \frac{0,210}{Re^{0,25}} \cdot F(x),$$

где  $F(x)$  – функция, описывающая влияние относительного шага  $x$  треугольной решетки расположения твэлов на коэффициент гидравлического сопротивления трения.

Таким образом, из (3) следует, что случайные гидродинамические нагрузки зависят от скорости в области установившегося течения следующим образом:  $f_g \sim V^{1,75}$ . На рисунке 4 приведены экспериментальные данные по среднеквадратичным значениям случайных гидродинамических нагрузок в области установившегося течения  $z = 1527$  мм в условиях не возмущенного входными устройствами потока. Видно, что влияние скорости течения на уровни случайных гидродинамических нагрузок действительно пропорционально  $\sim V^{1,75}$ .

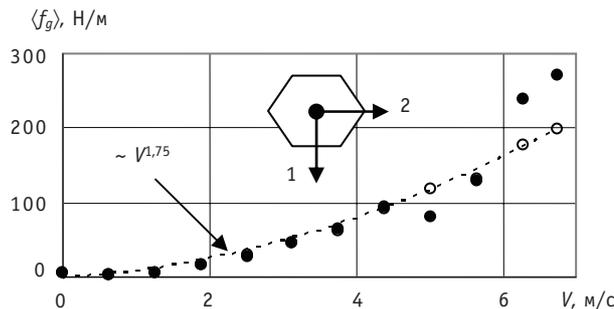


Рис. 4. Влияние скорости течения на среднеквадратичные значения случайных гидродинамических нагрузок в области установившегося течения ( $z = 1527$  мм) при отсутствии возмущающих устройств на входе в ТВС:  $\circ$  – в направлении перпендикулярно грани пучка;  $\bullet$  – в направлении параллельно грани пучка

Способность случайных гидродинамических нагрузок возбуждать и поддерживать вибрации пучка твэлов определяется не только их абсолютными значениями, но и спектральным составом. Наибольшую опасность представляют резонансы в низкочастотной области, где и располагаются собственные частоты пучка. Характерной особенностью спектров случайных гидродинамических нагрузок на начальном гидродинамическом участке в условиях невозмущенного турбулентного течения является отсутствие существенных спектральных уровней в низкочастотной области. Практически вся энергия гидродинамических нагрузок сосредоточена в области высоких частот от 160 до 400 Гц. Очевидно, такие нагрузки обладают сравнительно невысокой способностью к возбуждению и поддержанию вибраций пучка твэлов с собственными частотами до 10 Гц. Дроссельные шайбы создают на входе в ТВС вихревые структуры, обладающие высокой энергией и сохраняющие свою индивидуальность и в области пучка твэлов. Обусловленные этими вихревыми структурами пульсации давления формируют случайные гидродинамические нагрузки с резонансами в низкочастотной области. Наличие резонансов в

области низких частот обуславливает повышение эффективности потока относительно возбуждения и поддержания вибраций пучка твэлов (рис. 5).

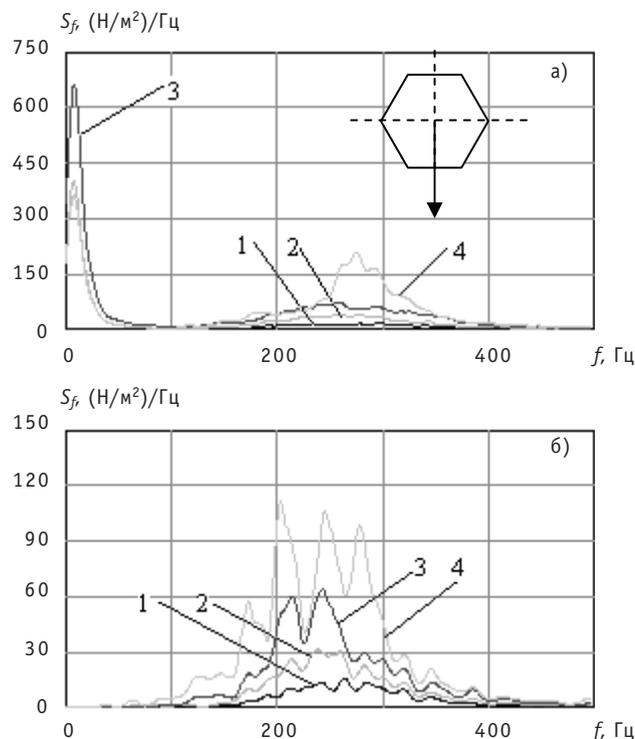


Рис. 5. Спектральные плотности случайных гидродинамических нагрузок на пучок твэлов в направлении перпендикулярно грани пучка на начальном гидродинамическом участке (а –  $z = 72$  мм) и в области установившегося течения (б –  $z = 1527$  мм) при различных гидродинамических условиях на входе в ТВС (скорость течения в пучке твэлов 3,14 м/с): 1 – невозмущенное турбулентное течение (без дроссельной шайбы на входе в ТВС); 2 – дроссельная шайба 52 мм; 3 – 48,5 мм; 4 – 45 мм

С учетом определяющего влияния характеристик случайных гидродинамических нагрузок на вибрации пучка твэлов экспериментальные данные по среднеквадратичным значениям виброперемещений представлены в виде зависимостей от среднеквадратичных значений случайных гидродинамических нагрузок (рис. 6). Можно выделить две характерные области интенсивности вибраций: на начальном гидродинамическом участке при сравнительно низких случайных гидродинамических нагрузках ( $f_g < 80$  Н/м) виброперемещения пропорциональны  $\langle \delta^2 \rangle^{1/2} \sim f_g^{0,2}$ , а в области высоких гидродинамических нагрузок ( $f_g \geq 80$  Н/м) наблюдается более интенсивный рост вибраций  $\langle \delta^2 \rangle^{1/2} \sim f_g^{0,85}$ . Для установившегося течения вдали от нижней опорной решетки при  $f_g < 80$  Н/м виброперемещения пропорциональны  $\langle \delta^2 \rangle^{1/2} \sim f_g^{0,5}$ , а при  $f_g \geq 80$  –  $\langle \delta^2 \rangle^{1/2} \sim f_g^{2,2}$ .

Существенное повышение темпа роста виброперемещений в области  $f_g \geq 80$  Н/м обусловлено, по-видимому, проскальзыванием твэлов в дистанционирующих решетках при их изгибных деформациях. Таким образом, при воздействии случайных гидродинамических нагрузок в области  $f_g < 80$  Н/м в местах сопряжений оболочки твэла с ячейкой дистанционирующей решетки реализуется механизм трения покоя (проскальзывание отсутствует), а при более высоких значениях

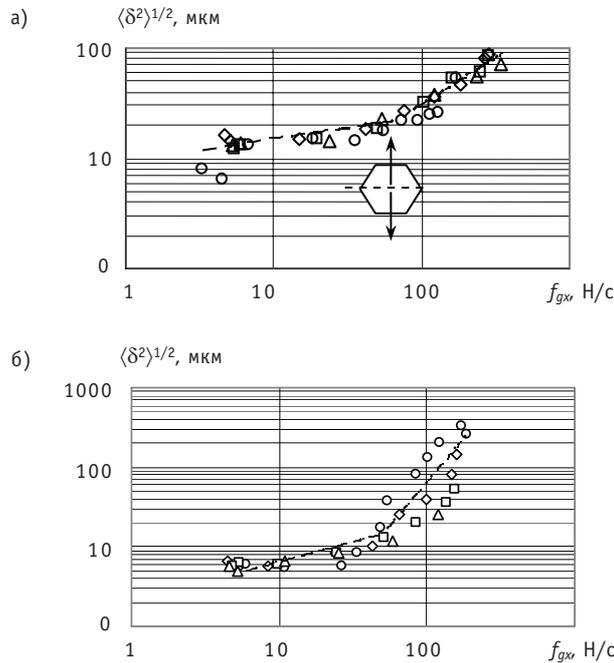


Рис. 6. Зависимость среднеквадратичных значений виброперемещений в сечениях  $z = 72$  мм (а) и  $z = 1272$  мм (б) перпендикулярно грани пучка от уровней случайных гидродинамических нагрузок при различных гидродинамических условиях на входе в ТВС:  $\circ$  – невозмущенный турбулентный поток (без размещения дроссельной шайбы на входе в ТВС);  $\diamond$  – дроссельная шайба 52 мм;  $\square$  – 48,5 мм;  $\triangle$  – 45 мм

$f_g \geq 80$  Н/м – механизм трения скольжения (оболочка проскальзывает в ячейке дистанционирующей решетки).

Для обобщения экспериментальных данных по виброперемещениям пучка твэлов под действием случайных гидродинамических нагрузок можно использовать известные соотношения [6] для поперечного прогиба балки, нагруженной распределенной по длине статической нагрузкой. В соответствии с [6] прогиб балки, имеющей две опоры, нагруженной распределенной по длине статической силой  $f_{st}$  Н/м, для любого заданного сечения  $z$  определяется выражением

$$\delta(z) = C(z) \cdot \frac{f_{st} \cdot l^4}{E \cdot I}, \quad (4)$$

где  $\delta(z)$  – прогиб балки в сечении  $z$ ;  $C(z)$  – константа, значение которой зависит от  $z$ ;  $l$  – длина балки;  $E$  – модуль упругости конструкционного материала балки;  $I$  – момент инерции сечения балки.

При условии применимости этого соотношения и для случайных нагрузок из соотношения (3) следует выражение для обобщения экспериментальных данных по среднеквадратичным значениям виброперемещений при изгибных колебаниях (вибрациях) пучка твэлов

$$\langle \delta^2(z) \rangle^{1/2} / l = C(z) \cdot \frac{\langle f_g^2 \rangle^{1/2} \cdot l^3}{E \cdot I}. \quad (5)$$

Это выражение представляет собой зависимость безразмерных среднеквадратичных значений виброперемещений пучка твэлов  $\delta(z)/l$  в сечении  $z$  в зависимости от безразмерной случайной нагрузки  $\langle f_g^2 \rangle^{1/2} \cdot l^3 / (E \cdot I)$ . На рисунке 7 представ-

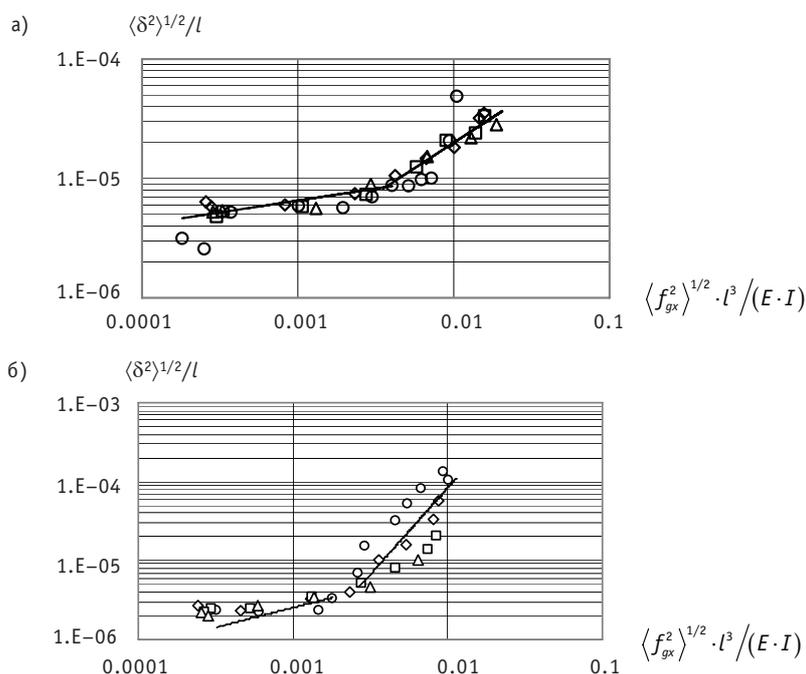


Рис. 7. Обобщение экспериментальных данных по среднеквадратичным значениям виброперемещений пучка твэлов на начальном гидродинамическом участке  $z = 72$  мм (а) и в области установившегося течения  $z = 1275$  мм (б):  $\circ$  – невозмущенный турбулентный поток;  $\diamond$  – дроссельная шайба 52 мм;  $\square$  – 48,5 мм;  $\triangle$  – 45 мм

лены результаты обобщения экспериментальных данных по виброперемещениям пучка твэлов на начальном гидродинамическом участке в сечении  $z = 72$  мм и в области установившегося течения в сечении  $z = 1275$  мм. Область безразмерных случайных нагрузок  $\langle f_g^2 \rangle^{1/2} \cdot l^3 / (E \cdot I) \leq 4 \cdot 10^{-3}$  характеризуется отсутствием проскальзывания твэлов в ячейках дистанционирующих решеток, а при

$\langle f_g^2 \rangle^{1/2} \cdot l^3 / (E \cdot I) > 4 \cdot 10^{-3}$  наступает проскальзывание, и темп роста виброперемещений увеличивается.

Экспериментальные исследования пульсаций давления проводились и в трактах подвода теплоносителя к ТВС ВВЭР-1000. Результаты таких исследований позволяют понять механизмы возникновения гидродинамической неустойчивости потока и получить количественные данные по характеристикам случайных гидродинамических нагрузок, вызывающих вибрации обтекаемых поверхностей и, в частности, пучков твэлов в ТВС. Значительный комплекс таких исследований был выполнен в период пусконаладочных работ на пятом блоке НВАЭС [7]. Пульсации давления измерялись, в том числе на входе в ТВС и на выходе из активной зоны. Установлено, что максимальные амплитуды пульсаций давления на входе в ТВС не превышают 6 кПа, а в области головки ТВС достигают значений около 10 кПа. Среднеквадратичные значения пульсаций давления перед нижней опорной решеткой макета ТВС ВВЭР-440 при размещении на входе в хвостовик дроссельной шайбы 45 мм достигают 12 кПа. При этом в области установившегося течения в пучке твэлов в сечении  $z = 1527$  мм соответствующие уровни пульсаций давления составляют  $\sim 7$  кПа. Отсюда следует, что полученные случайные гидродинамические нагрузки на пучок твэлов могут превышать реализуемые в ТВС ВВЭР-1000. В связи

с этим имеется возможность проведения оценок виброперемещений пучков твэлов на основе полученных эмпирических соотношений (5) не только для исследованных ТВС ВВЭР-440, но и для ТВС других конструкций.

В соответствии с соотношением (5) для оценок виброперемещений пучка твэлов под действием случайных гидродинамических нагрузок необходимо располагать данными об изгибной жесткости ТВС. В работе [8] получены параметры собственных колебаний (собственных частот, форм и коэффициентов демпфирования) в воздухе пяти полномасштабных макетов ТВС реакторов ВВЭР- 440 (РК-3), ВВЭР-1000, ВВЭР-1200 (АЭС-2006) и ВВЭР-1500. На основании анализа экспериментальных данных показано, что при малых амплитудах колебаний, когда в ячейках дистанционирующих решеток не происходит проскальзывания твэлов, пучок ведет себя как однородная балка, и ее собственная частота определяется соотношением

$$f \sim \frac{1}{l^2} \sqrt{\frac{E \cdot I}{M/l}},$$

где  $E \cdot I$  – изгибная жесткость пучка твэлов;  $l, M$  – длина и масса пучка твэлов.

Соотношение для собственных частот использовалось для определения изгибных жесткостей указанных выше макетов ТВС и последующего использования полученных значений для оценки интенсивности вибраций пучков твэлов, возникающих в турбулентном потоке теплоносителя под действием случайных гидродинамических нагрузок. На рисунке 8 приведены результаты прогноза виброперемещений под действием распределенной случайной гидродинамической нагрузки, характерной для области установившегося течения, в зависимости от скорости теплоносителя в пучке. Видно, что вибрации пучков твэлов в ТВС РК-3 значительно снизились по сравнению с ТВС второго поколения ВВЭР-440, что обусловлено высокой жесткостью каркаса из шести уголков, приваренных к дистанционирующим решеткам. Из приведенных для сравнения ТВС ВВЭР-1000 наименьшие уровни виброперемещений характерны для конструкции ТВСА, что также объясняется высокой жесткостью каркаса, образованного шестью уголками и дистанционирующими решетками.

Таким образом, в данной работе по многоточечным измерениям пульсаций давления по периметру пучка твэлов определены воздействующие на него случайные гидродинамические нагрузки, которые вызывают вибрации пучка. Установлены две характерные области влияния случайных гидродинамических нагрузок на уровни изгибных виброперемещений пучка твэлов на начальном гидродинамическом

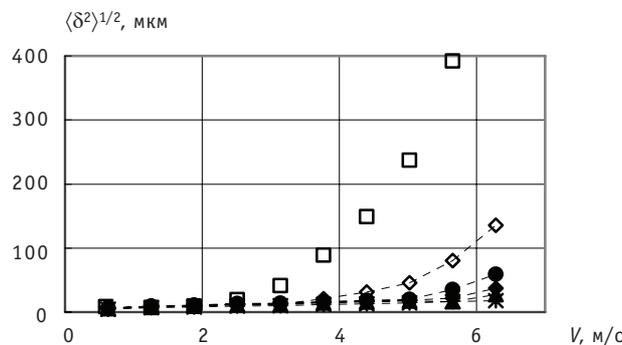


Рис. 8. Сопоставление расчетных уровней виброперемещений пучков твэлов ТВС реакторов ВВЭР с экспериментальными значениями, полученными для ТВС второго поколения ВВЭР-440:  $\square$  – ТВС ВВЭР-440;  $\diamond$  – РК-3;  $\blacklozenge$  – ТВС-2М;  $\blacktriangle$  – АЭС 2006;  $\bullet$  – УТВС;  $\ast$  – ТВСА

ком участке и в области установившегося течения. Более высокие темпы увеличения интенсивности вибраций при уровнях случайных гидродинамических нагрузок более 80 Н/м связаны с проскальзыванием твэлов в дистанционирующих решетках. Определены спектральные характеристики случайных гидродинамических нагрузок на начальном гидродинамическом участке вблизи нижней опорной решетки и в области установившегося течения теплоносителя в пучке твэлов. Установлено, что для не возмущенного входными устройствами течения резонансные спектральные уровни случайных гидродинамических нагрузок и на начальном гидродинамическом участке, и в области установившегося течения сосредоточены в области сравнительно высоких частот 200–400 Гц. Установленные на входе в ТВС дроссельные шайбы (или другие входные устройства) генерируют крупномасштабные вихревые структуры, что приводит к смещению резонансов спектральных плотностей случайных гидродинамических нагрузок в область низких частот, где и расположены собственные частоты колебаний пучка твэлов.

### **Литература**

1. Тутнов А.А. Методы расчета работоспособности элементов конструкций ядерных реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 183 с.
2. Перевезенцев В.В., Солонин В.И., Сорокин Ф.Д. Нестационарные гидродинамические нагрузки и вибрации пучка твэлов в ТВС ВВЭР-440 // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2008. – №4. – С. 23-29.
3. Опыт разработки и использования пьезорезистивных виброакселерометров для измерения вибрационных характеристик тепловыделяющих сборок водоохлаждаемых ядерных реакторов / С.И. Гетя, В.Г. Крапивцев, В.В. Перевезенцев и др. // Датчики и системы. 2006. №10. С. 25-29.
4. 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.
5. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 360 с.
6. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник в трех томах / Под ред. И.А. Биргера, Я.Г. Пановко. – М.: Машиностроение, 1988. – Т.1. – 831 с.
7. Расчетное обоснование теплогидравлических характеристик реактора и РУ ВВЭР / В.П. Спасков, Ю.Г. Драгунов, С.Б. Рыжов и др. – М.: ИздАТ, 2003. – 308 с.
8. Макаров В.В., Афанасьев А.В., Матвиенко И.В. Модальный анализ макетов ТВС реакторов ВВЭР при силовом и кинематическом возбуждении вибрации // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: Сб. докл. V Междунар. науч.-техн. конф. (Подольск, 2007 г.). Т.2. – С. 137-148.

Поступила в редакцию 18.10.2011

Open and experimentally justified a new physical phenomenon – a property of the flow of coolant lead – the process of implementing a purely gaseous cavitation process and the impossibility of ‘traditional’ vapor cavitation. Proposed and experimentally substantiated by three independent methods of model cavitation in the flow of gas coolant lead to the conditions of the reactor circuit. It is proved that the traditional steam (steam and gas), cavitation in the flow of coolant can not lead. The experimentally determined conditions for the appearance and characteristics of gas cavitation. Experimentally proved the absence of cavitation erosion wear of the impeller pump made of steel with an oxide-coated in lead coolant temperature 470–500°C, flow rate of lead approx. 10 m/s, the pump speed to 1200 rpm. When operating in a developed cavitation gas approx. 50 hours including 17 hours in provoking dynamic tests with the cyclical development of cavitation breakdown of filing, followed by the resumption of feeding, and development of cavitation cycle with a period of 3–5 seconds (a total of more than 15000 cycles).

**УДК 621.039.5: 536.24.08**

*Subchannel Thermohydraulic Calculations for Fuel Subassembly of Reactor Core on Supercritical Water* | K.V. Kartashov, G.P. Bogoslovskaya; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 7 pages, 2 tables, 8 illustrations. – References, 5 titles.

Results of thermohydraulic calculations with subchannel codes SUP and MIF-SKD are presented in the paper. Code SUP allows the thermohydraulic parameters of the part of reactor core to be estimated. Input neutron-physical parameters are calculated with code ACADEM. Code MIF-SKD gives us possibility to predict local thermohydraulic parameters in separate fuel subassembly. The code has been verified on the data gained in experiments on water in round tube and on freon in pin bundle.

Thermohydraulic parameters of the part of reactor core and fuel subassembly of VVER-SKD by the power 1700 MW for different coolant flows within reactor core (one- and double-thread) are presented here.

**УДК 621.039.548**

*Random Hydrodynamic Loads and the Vibration of Fuel Elements in the Turbulent Coolant Flow in WWER Fuel Assembly* | V.V. Perevezentsev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 10 pages, 8 illustrations. – References, 8 titles.

Annotation on the basis of the multimeterings of pressure fluctuations on the perimeter of the fuel elements beam of the of full-scale mock-up fuel assembly WWER-440 of the second generation are obtained the realizations of the random hydrodynamic loads, which cause the vibrations of beam. It is established that in the region of initial hydrodynamic section near the lower supporting lattice. essential influence on the random hydrodynamic loads render the hydrodynamic conditions for shaping of the structure of flow at the entrance. Choke washers create the vortex structure of flow with the high levels of pulsating energy, which leads to the high intensities of vibrations in the initial hydrodynamic section. In the region of steady flow the levels of random hydrodynamic loads are reduced and to a lesser degree they depend on hydrodynamic entrance conditions. The generalizing empirical dependence of vibration movements on the random hydrodynamic loads are obtained. Two characteristic regions of the influence of random hydrodynamic loads on the vibration movements are discovered. With the values of random hydrodynamic loads of more than 80 N/m is observed a considerable increase in the intensity of vibrations, which is explained by the slippage of fuel element in the cell of the spacing lattice.

**УДК 621.039.548**

*Examination of Heat Transfer in Ceramic Fuel Elements at Variable Thermal Loadings* | V.V. Popov, V.N. Rumyantsev, I.S. Kurina, M.V. Mikheev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 10 pages, 1 table, 8 illustrations. – References, 18 titles.

The technique of measurement, under laboratory conditions, of contact pressure and heat conductance from UO<sub>2</sub> fuel pellets to fuel cladding at power variation is described. As has been shown, from the moment as a certain level of power is achieved, fuel sleeves go on cracking, so the radial gap between their fragments and cladding is being reduced up to the mechanical contact of sleeve fragments to cladding, and the contact pressure increases with the growth of level and amount of power variation cycles. The results of the analysis of computational models for heat transfer from fuel to cladding are also presented and discussed.