

Пульсации давления, случайные гидродинамические нагрузки и вибрации пучков твэлов в ТВС ВВЭР

09, сентябрь 2011

автор: Перевезенцев В. В.

УДК 621.039.524

МГТУ им. Н.Э. Баумана

vpereves@power.bmstu.ru

vladimirperevezenцев@rambler.ru

Вибрационные процессы в ядерных реакторах в значительной степени определяют надежность оборудования и безопасность эксплуатации энергоблока в целом. Динамическое воздействие потока теплоносителя на конструктивные элементы реакторных систем инициирует и поддерживает их механические колебания (вибрации). Одними из наиболее важных механических систем, определяющих безаварийную работу реакторных установок ВВЭР, являются ТВС. Вибрации в продольном турбулентном потоке теплоносителя приводят к повреждениям и образованию дефектов оболочек твэлов и выходу радиоактивных продуктов деления в контур циркуляции теплоносителя. Выявление механизмов возникновения вибраций ТВС является важнейшим этапом создания методик расчетных и экспериментальных анализов вибрационных процессов и выработки научно обоснованных рекомендаций по конструктивным решениям, направленным на повышение устойчивости ТВС в целом и ее отдельных элементов к динамическим воздействиям теплоносителя. Анализ гидродинамически возбуждаемых вибраций невозможен без описания процессов взаимодействия потока с обтекаемыми поверхностями механической колебательной системы. Такая информация в большинстве случаев может быть получена только на базе экспериментальных исследований. В турбулентном потоке теплоносителя на обтекаемых поверхностях твэлов формируются случайные гидродинамические нагрузки, от которых и зависят характеристики вибраций твэлов и пучка в целом. В свою очередь, случайные гидродинамические полностью определяются распределением пульсаций давления по обтекаемой поверхности. В частности, для вектора случайной гидродинамической нагрузки, действующей на единичную длину твэла в сечении z в момент времени τ в плоскости перпендикулярной оси ТВС, можно записать выражение [1]

$$\vec{f}_{g_i}(z, \tau) = - \int_{\varphi} p'_i(z, \varphi, \tau) \cdot \vec{n} \cdot d/2 \cdot d\varphi, \quad (1)$$

где $p'_i(z, \varphi, \tau)$ – распределение пульсаций давления по периметру (по углу φ) i -го твэла в момент времени τ в сечении пучка z .

Таким образом, для решения рассматриваемой проблемы необходимы одновременные измерения полей пульсаций давления по периметру и длине всех твэлов пучка. Получение таких экспериментальных данных практически не возможно. Однако уровни виброперемещений пучка в целом, как механически и гидродинамически связанной системы, будут определяться вектором случайных гидродинамических нагрузок, воздействующих на внешний ряд твэлов пучка (рис. 1) [2].

Тогда случайная гидродинамическая нагрузка, действующая на единичную длину пучка твэлов в сечении z в момент времени τ в плоскости перпендикулярной оси ТВС определяется распределением мгновенных значений пульсаций давления по периметру внешнего ряда твэлов пучка

$$\vec{f}_g(z, \tau) = - \int_P p'(z, P, \tau) \cdot \vec{n} \cdot dP, \quad (2)$$

где $p'(z, P, \tau)$ - мгновенные значения пульсаций давления на грани пучка;

$P, \vec{n}$ - периметр внешнего ряда твэлов пучка и нормаль к внешней границе этого ряда.

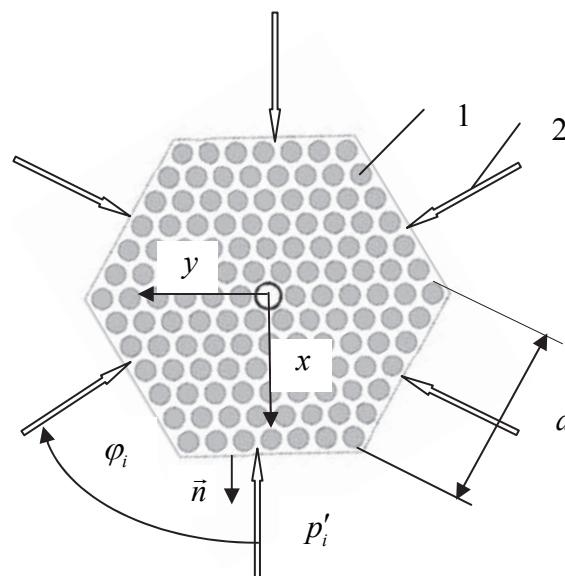


Рис. 1. Схема определения случайных гидродинамических нагрузок по распределениям пульсаций давления по периметру внешнего ряда твэлов пучка
1- внешний ряд твэлов пучка; 2- точки измерений пульсаций давления

Измерения пульсаций давления проводились одновременно на внутренней поверхности шести граней чехла полномасштабного макета ТВС ВВЭР-440 в двух сечениях по длине пучка. Первое сечение $z = 72 \text{ мм}$ соответствует середине первого пролета между нижней опорной решеткой и первой дистанционирующей решеткой. Второе сечение $z = 1527 \text{ мм}$ расположено в середине пролета между пятой и шестой дистанционирующими решетками. Таким образом, были получены одновременно двенадцать сигналов датчиков пульсаций давления. Точки отборов давления располагались в середине по ширине грани пучка. Практически взаимно перпендикулярные составляющие гидродинамических 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 [2, 3]:

$$\begin{aligned} f_{g_x}(z, \tau) &= \sum_{i=1}^6 p'(z, \tau) \cdot \cos \varphi_i \cdot a; \\ f_{g_y}(z, \tau) &= \sum_{i=1}^6 p'(z, \tau) \cdot \sin \varphi_i \cdot a \end{aligned} \quad (3)$$

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

Характерные распределения среднеквадратичных значений пульсаций давления по периметру внешнего ряда твэлов пучка свидетельствуют о достаточно равномерном распределении уровней пульсаций давления по всем шести граням пучка как в близком к входу сечении, так и на достаточном удалении от нижней опорной решетки (рис. 2). Это свидетельствует о симметричности структуры осредненного и пульсационного течения по периметру пучка твэлов. При этом пульсации давления вблизи нижней опорной решетки выше, чем в удаленной от нее области. Очевидно, возмущающее воздействие дроссельной шайбы с формированием крупномасштабных вихревых структур перед нижней опорной решеткой (т.е. на входе в пучок твэлов) проявляется, прежде всего, на начальном гидродинамическом участке в пределах нескольких первых пролетов пучка. Вдали от нижней опорной решетки воздействие дроссельной шайбы на пульсационные характеристики потока распространяется в меньшей степени. Это подтверждается и практически одинаковыми пульсациями давления в обоих сечениях в условиях отсутствия дроссельной шайбы на входе в ТВС.

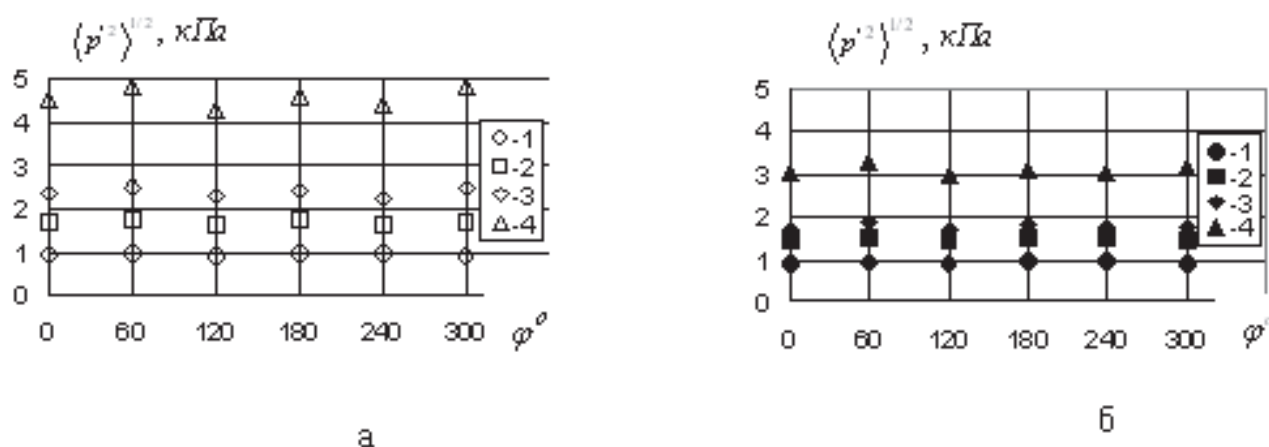


Рис. 2. Распределение среднеквадратичных значений пульсаций давления по периметру внешнего ряда твэлов пучка в сечениях $z = 72$ мм (а) и $z = 1527$ мм (б) при скорости течения воды в пучке твэлов 3,14 м/с

- 1 - невозмущенное турбулентное течение (без дроссельной шайбы на входе в ТВС);
2 - дроссельная шайба 52 мм; 3 - 48,5 мм; 4 – 45 мм

Наряду с интенсивностью пульсаций давления гидродинамические нагрузки в любом сечении пучка определяются фазовыми сдвигами между пульсациями давления на противоположных гранях пучка [4]. Очевидно, наибольшие нагрузки будут формироваться при фазовом сдвиге $\Delta\varphi = 180^\circ$. При нулевом фазовом сдвиге и одинаковых мгновенных значениях пульсаций давления нагрузка не возникает. Наибольшие фазовые сдвиги между пульсациями давления на противоположных гранях пучка в сечениях на начальном гидродинамическом участке возникают в условиях формирования потока на входе в ТВС дроссельными шайбами (рис. 3). Это является одной из причин возникновения значительных случайных гидродинамических нагрузок в этих условиях, т.е. при размещении на входе в ТВС дроссельных шайб, и связано, по видимому, с ролью крупных вихрей, формируемых за дроссельными шайбами. В области установившегося течения (вдали от входа в пучок твэлов), где влияние возмущающих поток входных устройств проявляется незначительно, существенных фазовых сдвигов между импульсами давления на противоположных гранях пучка твэлов не наблюдается (рис. 4). Естественно, при этом и случайные гидродинамические нагрузки, возникающие из-за разности мгновенных значений пульсаций давления на противоположных гранях пучка, оказываются менее выраженными.

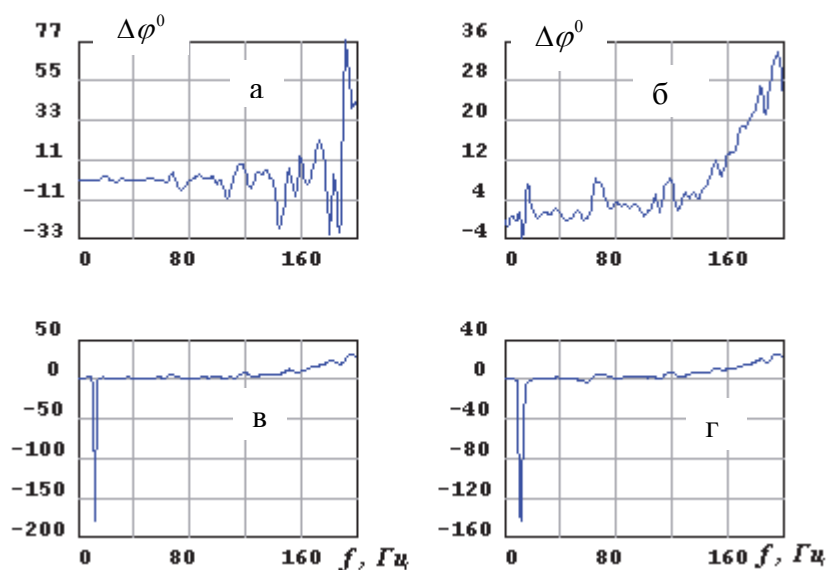


Рис. 3. Фазовый сдвиг между пульсациями давления в сечении $z = 72 \text{ мм}$ на противоположных гранях пучка твэлов при скорости течения воды $3,14 \text{ м/с}$ и различных условиях формирования структуры потока на входе в ТВС

а- невозмущенное турбулентное течение (без дроссельной шайбы на входе в ТВС);
б- дроссельная шайба 52 мм; в- 48,5 мм; г- 45 мм

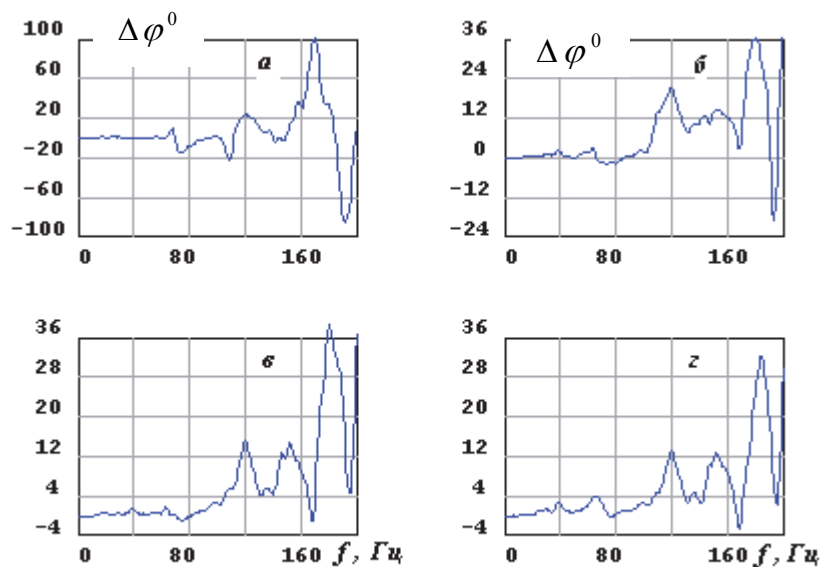


Рис. 4. Фазовый сдвиг между пульсациями давления в сечении $z = 1527 \text{ мм}$ на противоположных гранях пучка твэлов при скорости течения воды $3,14 \text{ м/с}$ и при различных условиях формирования структуры потока на входе в ТВС

а- невозмущенное турбулентное течение (без дроссельной шайбы на входе в ТВС); б- дроссельная шайба 52 мм; в- 48,5 мм; г- 45 мм

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 (рис. 5). 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. Спектры случайных гидродинамических нагрузок в удаленной от нижней опорной решетки содержат резонансы в диапазоне высоких частот независимо от условий формирования структуры потока на входе в ТВС. Это свидетельствует о том, что в сечении $z = 1527$ мм поток практически утрачивает “информацию” о вихревой структуре, приобретенной им при течении через дроссельные шайбы или другие возмущающие поток устройства (рис. 6).

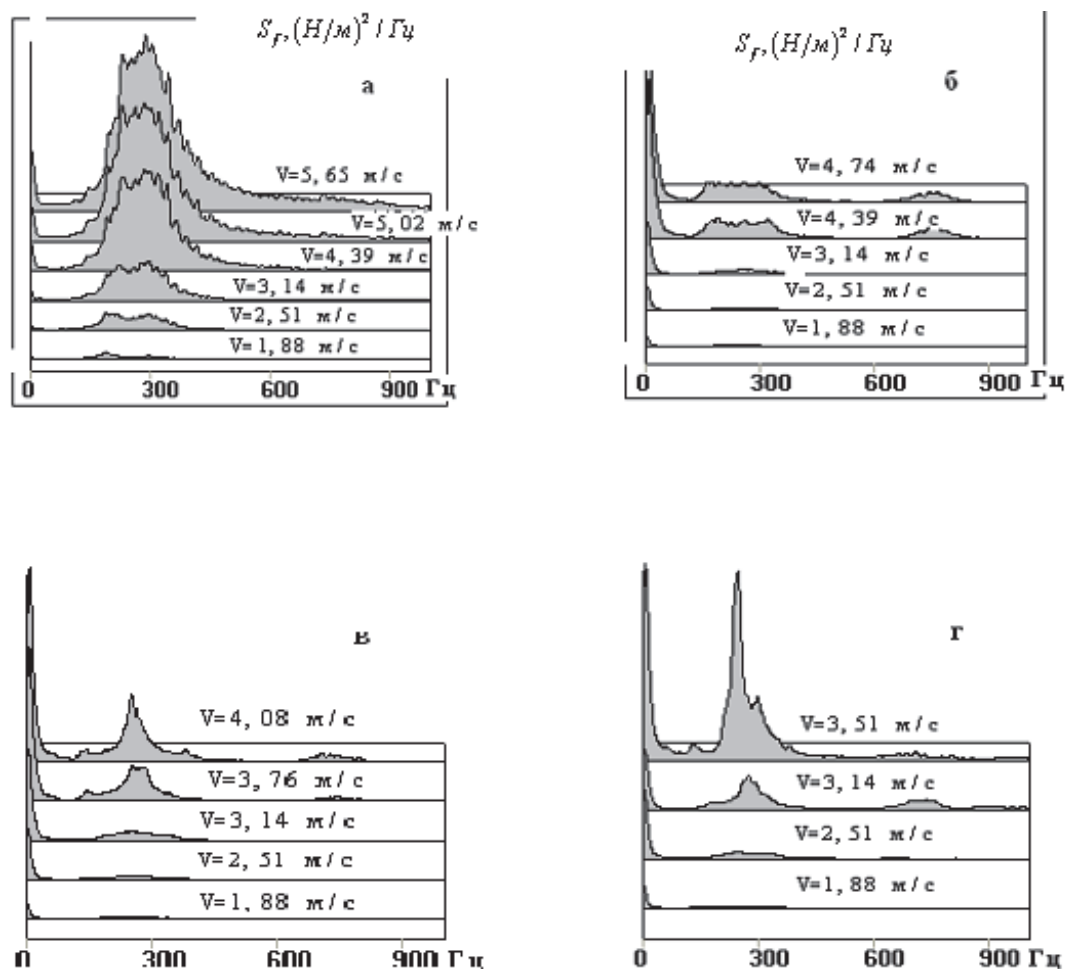


Рис. 5. Развитие спектров случайных гидродинамических нагрузок в направлении перпендикулярно грани пучка с увеличением скорости течения воды в пучке твэлов в сечении $z = 72$ мм при различных условиях формирования структуры потока на входе в ТВС
а- невозмущенное турбулентное течение (без дроссельной шайбы на входе в ТВС);
б- дроссельная шайба 52 мм; в- 48,5 мм; г- 45 мм

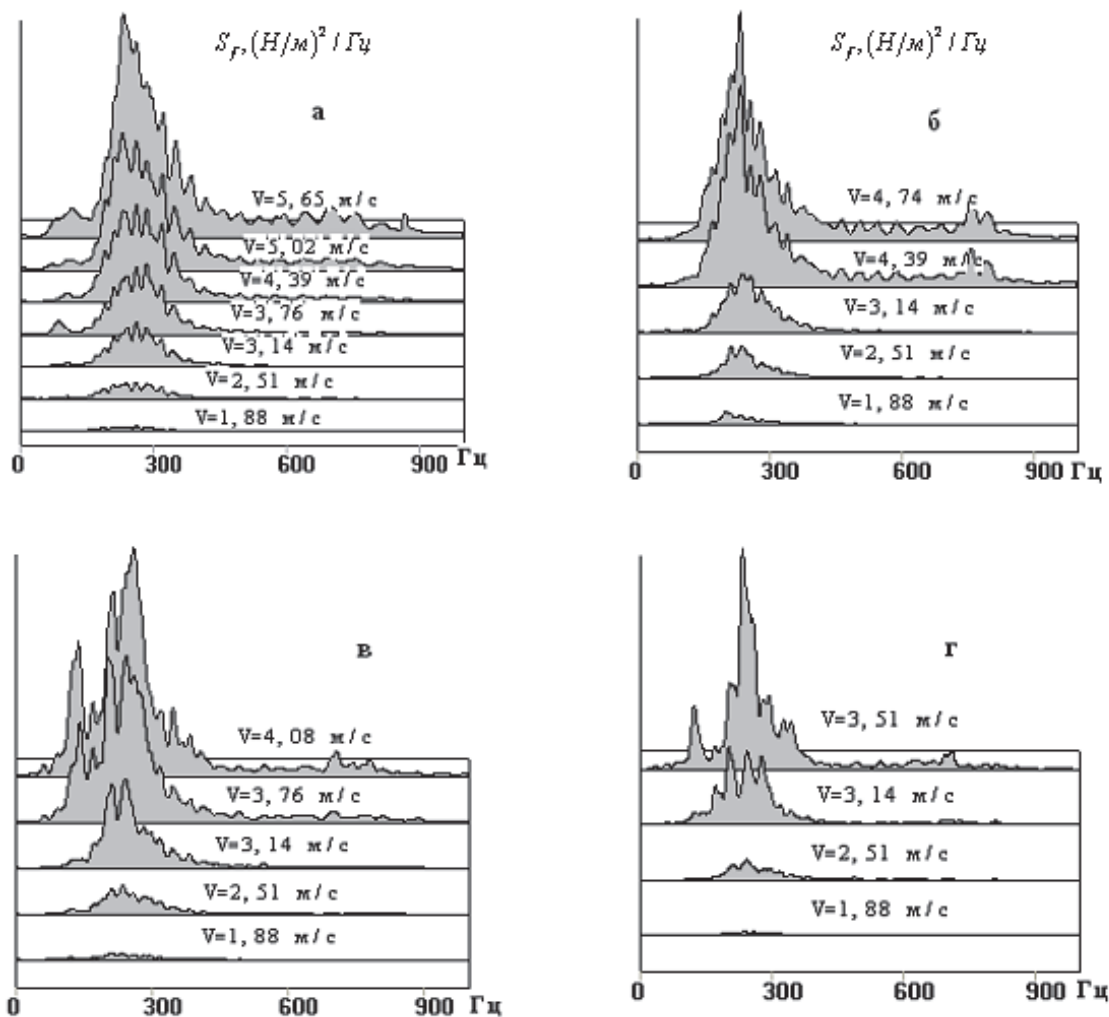


Рис. 6. Развитие спектров случайных гидродинамических нагрузок в направлении перпендикулярно грани пучка с увеличением скорости течения воды в пучке твэлов в сечении $z = 1527 \text{ мм}$ при различных условиях формирования структуры потока на входе в ТВС
а- невозмущенное турбулентное течение (без дроссельной шайбы на входе в ТВС);
б- дроссельная шайба 52 мм; в- 48,5 мм; г- 45 мм

Таким образом, образующиеся за дроссельными шайбами вихри в пристеночной области и струйное течение с разными скоростями в центральной области приводят к существенным отличиям в интенсивности и спектральном составе пульсаций давления в пучке твэлов и, как следствие, к разным уровням случайных гидродинамических нагрузок (рис. 7). При одинаковых скоростях потока воды в пучке наибольшие случайные гидродинамические нагрузки характерны для дроссельных шайб малых диаметров. При этом влияние дроссельной шайбы проявляется в наибольшей степени на начальном гидродинамическом участке пучка вблизи

нижней опорной решетки. Из рис. 7 видно, что уровни случайных гидродинамических нагрузок в сечении $z = 72$ мм в условиях размещения на входе в ТВС дроссельной шайбы 45 мм при скорости $V = 3,14$ м/с составляют около 235 Н/м, что более чем в 4 раза выше соответствующих значений в условиях невозмущенного потока на входе в ТВС (при отсутствии на входе дроссельных шайб). В области установившегося течения ($z = 1527$ мм), где влияние входных устройств практически не проявляется, уровни случайных гидродинамических нагрузок существенно ниже. Таким образом, пучок твэлов в ТВС подвергается воздействию неравномерных распределенных по длине случайных нагрузок. При размещении на входе в ТВС возмущающих течение входных устройств (например, дроссельных шайб) вблизи нижней опорной решетки формируются повышенные уровни случайных гидродинамических нагрузок. Случайные нагрузки могут вызывать интенсивные вибрации пучка твэлов, причем именно в тех сечениях, где формируются наиболее высокие уровни таких нагрузок.

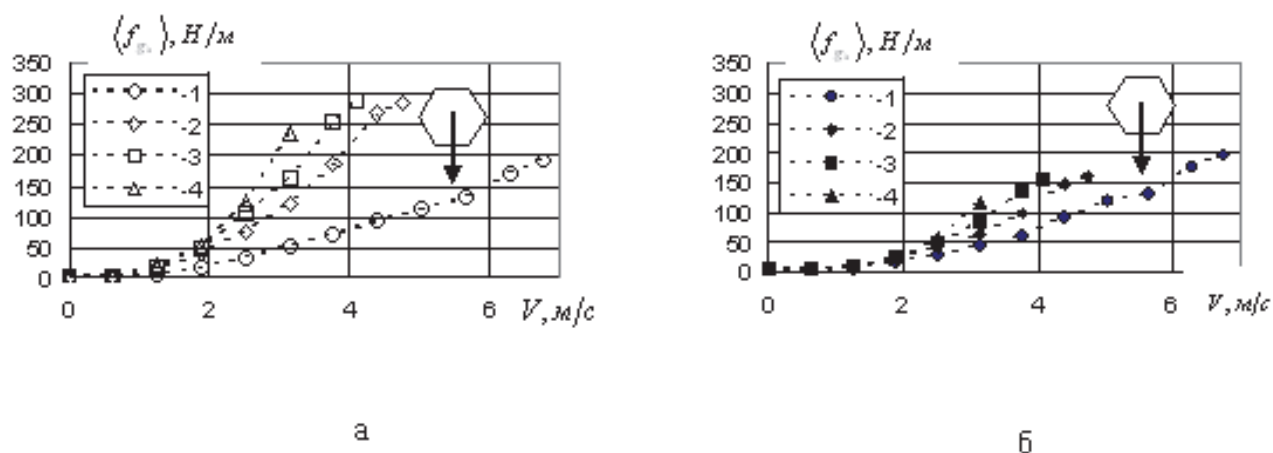


Рис. 7. Зависимость среднеквадратичных значений случайных гидродинамических нагрузок в направлении перпендикулярно грани пучка в сечениях $z = 72$ мм (а) и $z = 1527$ мм (б) от скорости течения воды для различных условий формирования структуры потока на входе в ТВС
1- невозмущенное турбулентное течение (без дроссельной шайбы на входе в ТВС); 2- дроссельная шайба 52 мм; 3 - 48,5 мм; 4 – 45 мм

Изгибные деформации пучка твэлов под действием случайных гидродинамических нагрузок можно трактовать как виброперемещения в плоскости перпендикулярной оси ТВС. Для заданной изгибной жесткости пучка твэлов среднеквадратичные значения виброперемещений пропорциональны уровням случайных гидродинамических нагрузок

$\langle \delta^2 \rangle^{1/2} \sim \langle f_g \rangle$. Как на начальном гидродинамическом участке вблизи нижней опорной решетки, так и в области установившегося течения, можно выделить два характерных диапазона влияния случайных гидродинамических нагрузок на интенсивность вибраций (рис. 8). В сечении $z = 72$ мм при сравнительно низких случайных гидродинамических нагрузках $f_g < 80$ Н/м виброперемещения пропорциональны $\langle \delta^2 \rangle^{1/2} \sim \langle f_g \rangle^{0,2}$, а в области высоких значений $f_g \geq 80$ Н/м наблюдается более интенсивный рост вибраций $\langle \delta^2 \rangle^{1/2} \sim \langle f_g \rangle^{0,85}$. Вдали от нижней опорной решетки в сечении $z = 1527$ мм виброперемещения пропорциональны $\langle \delta^2 \rangle^{1/2} \sim \langle f_g \rangle^{0,5}$ при $f_g < 80$ Н/м и $\langle \delta^2 \rangle^{1/2} \sim \langle f_g \rangle^{2,2}$ при $f_g \geq 80$ Н/м.

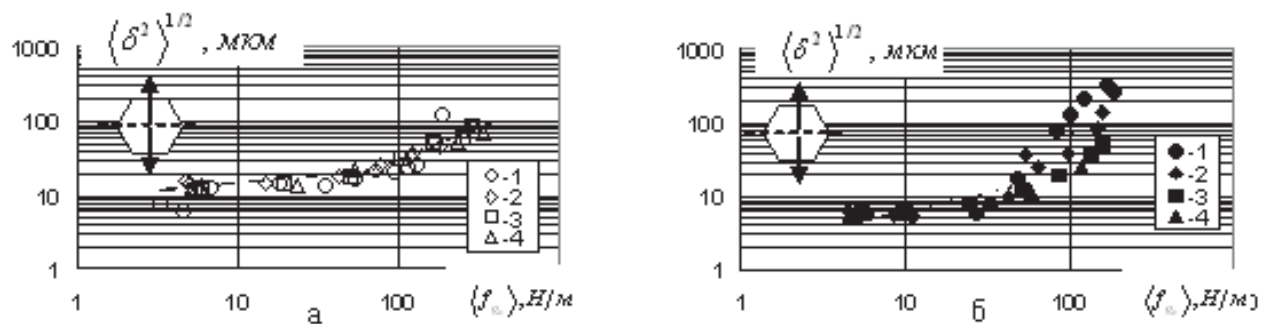


Рис. 8. Зависимость среднеквадратичных значений виброперемещений в сечениях $z = 72$ мм (а) и $z = 1527$ мм (б) от уровней случайных гидродинамических нагрузок при различных гидродинамических условиях на входе в ТВС
а- невозмущенное турбулентное течение (без дроссельной шайбы на входе в ТВС); 2- дроссельная шайба 52 мм; 3- 48,5 мм; 4- 45 мм

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 $f_g \geq 80$ Н/м – механизм трения скольжения

(оболочка проскальзывает в ячейке дистанционирующей решетки). Эффекты проскальзывания оболочки в местах сопряжения с дистанционирующей решеткой интенсифицируют процессы фреттинг-износа, что в итоге может привести к образованию сквозных дефектов в оболочке и выходу радиоактивных продуктов деления в контур циркуляции теплоносителя. В связи с этим необходимо ограничивать уровни случайных гидродинамических нагрузок на пучки твэлов со стороны турбулентного потока теплоносителя. Для этого необходимо формировать структуру течения на входе в ТВС без образования крупномасштабных вихревых структур, с равномерным распределением скорости перед нижней опорной решеткой. Размещаемые на входе в ТВС конструктивные элементы (например, дроссельные шайбы, антидебризные фильтры и т. п.) не должны обладать высокими гидравлическими сопротивлениями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вибрации элементов оборудования ядерных энергетических установок/ Е.Д. Федорович [и др.]. М.: Энергоатомиздат, 1989. 168 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. 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.
4. Перевезенцев В.В. Возбуждение колебаний пучка твэлов реакторов ВВЭР турбулентным потоком теплоносителя// Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2009. №4. С.78-88.