

В. В. П е р е в е з е н ц е в

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СЛУЧАЙНЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ПО ДЛИНЕ ПУЧКА ТВЭЛОВ ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК ВВЭР

Получены значения случайных гидродинамических нагрузок и их распределение по длине пучка твэлов для различных гидродинамических условий на входе в тепло выделяющие сборки водоохлаждаемых ядерных реакторов. Предложены полуэмпирические соотношения для обобщения экспериментальных данных. Максимальные уровни случайных гидродинамических нагрузок на начальном гидродинамическом участке пропорциональны гидравлическим сопротивлениям входных устройств (например дроссельных шайб) и нижней опорной решетки.

E-mail: vpereves@power.bmstu.ru

Ключевые слова: ядерные реакторы, тепло выделяющие сборки ВВЭР, вибрации твэлов, повреждения оболочек, пульсации давления, случайные гидродинамические нагрузки.

При анализе повреждений оболочек тепло выделяющих элементов (твэлов) в тепло выделяющих сборках (ТВС) водоохлаждаемых ядерных реакторов (ВВЭР и PWR) было выявлено определяющее значение процессов фреттинг-износа и истирания дебрис-частицами. Эти процессы связаны с вибрациями твэлов в турбулентном потоке теплоносителя. Глубина фреттинг-износа поверхностей зависит от частоты, амплитуды колебаний и силы прижатия трущихся поверхностей друг к другу. При этом скорость фреттинг-износа [1] описывается соотношением

$$dh/d\tau = K k_{тр} P_c f \delta_c, \quad (1)$$

где h — глубина фреттинг-износа; K — коэффициент износа; $k_{тр}$ — коэффициент трения скольжения; P_c — давление в области контакта оболочки твэла с пуклевкой дистанционирующей решетки; f — частота поперечных колебаний твэла; δ_c — амплитуда продольных виброперемещений в области контакта.

Таким образом, явления фреттинг-износа, повреждения дебрис-частицами определяются вибрационными процессами в ТВС и, в первую очередь, амплитудами и характерными частотами вибраций.

В расчетной практике анализа гидродинамического возбуждения вибраций определяющее значение имеет характер распределения случайных гидродинамических нагрузок по длине пучка твэлов. Нижняя опорная решетка ТВС, входные устройства (дроссельные шайбы, антидебрисные фильтры и т.д.) повышают турбулентность потока, и,

как следствие, увеличиваются пульсации давления в пучке за нижней опорной решеткой. Повышенные уровни пульсаций давления, в свою очередь, формируют и более высокие случайные гидродинамические нагрузки. Очевидно, пульсации давления в потоке за входными устройствами пропорциональны гидравлическим сопротивлениям этих устройств. Действительно, часть энергии усредненного течения трансформируется в энергию пульсационного движения, причем эффективность этого преобразования определяется потерями статического давления на входных устройствах [2]. На этом основании можно считать, что и среднеквадратические значения случайных гидродинамических сил на начальном гидродинамическом участке за входными устройствами пропорциональны их гидравлическим сопротивлениям. По мере развития характеристик усредненного течения происходит диссипация энергии пульсационного движения. Уровни пульсаций давления снижаются вплоть до установившихся значений, характерных для развитого турбулентного течения в пучке твэлов. В условиях отсутствия дроссельных шайб, антидебризных фильтров и других входных устройств на входе в ТВС основным возмущающим поток элементом конструкции является нижняя опорная решетка.

Случайные гидродинамические нагрузки определяются по измеренным мгновенным значениям пульсаций давления при турбулентном течении теплоносителя в ТВС ВВЭР. В соответствии с развиваемым подходом случайная гидродинамическая сила, 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 внешней границы пучка твэлов:

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

где $p'(z, P, \tau)$ — мгновенные значения пульсаций давления на границе пучка; P , \vec{n} — периметр внешнего ряда твэлов пучка и нормаль к внешнему ряду.

Для реализации процедуры (2) проводились измерения пульсаций давления на внутренней поверхности шести граней чехла полномасштабного макета ТВС ВВЭР-440 в двух сечениях по длине пучка твэлов. Первое сечение $z = 72$ мм расположено в первом пролете пучка между нижней опорной решеткой и первой дистанционирующей решеткой и соответствует начальному гидродинамическому участку, где проявляется влияние тракта подвода теплоносителя к ТВС. Второе сечение $z = 1527$ мм выбрано в области установившегося течения, где влияние возмущающих поток особенностей геометрии тракта подвода

теплоносителя уже практически не проявляется. Таким образом, были получены одновременно двенадцать сигналов датчиков пульсаций давления. Методики измерений пульсаций давления и определения на их основе случайных гидродинамических нагрузок изложены в работе [3]. Практически взаимно-перпендикулярные составляющие случайных гидродинамических нагрузок на единицу длины пучка твэлов определялись суммированием мгновенных значений пульсаций давления на внутренних поверхностях всех шести граней чехла с учетом соответствующих тригонометрических функций (рис. 1):

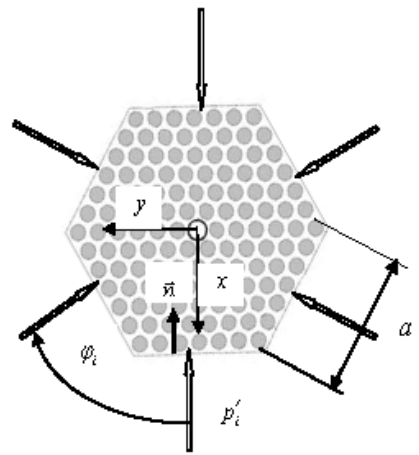


Рис. 1. Схема определения гидродинамических нагрузок на пучок твэлов по измеренным пульсациям давления на внутренней поверхности граней чехла

$$f_{g_x}(z, \tau) = \sum_{i=1}^6 p'_i(z, \tau) (\cos \varphi_i) a; \quad (3)$$

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

где $p'_i(z, \tau)$ — мгновенные значения пульсаций давления на i -й грани пучка; a — ширина грани пучка по внешнему ряду твэлов.

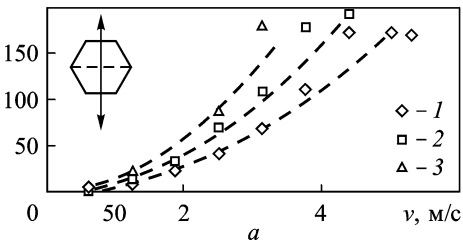
В работе [2] показано, что распределение пристеночных пульсаций давления по длине канала за входными решетками имеет экспоненциальный характер. При этом максимальные уровни пульсаций давления пропорциональны гидравлическим сопротивлениям решеток. Таким образом, распределение среднеквадратических значений случайных гидродинамических нагрузок по длине пучка твэлов в условиях формирования структуры потока дроссельными шайбами (или какими-либо другими входными устройствами) можно представить следующим образом:

$$\langle f_g^{д.ш}(z) \rangle \sim C_a (\Delta P_{д.ш} + \Delta P_{о.р}) \exp(-\lambda z) + \langle f_g^{\infty} \rangle, \quad (4)$$

где C — эмпирическая константа; $\Delta P_{д.ш}$, $\Delta P_{о.р}$ — потери статического давления на дроссельной шайбе и нижней опорной решетке; $\langle f_g^{\infty} \rangle$ — среднеквадратическое значение случайной гидродинамической нагрузки на участке установившегося течения; λ — коэффициент диссипации пульсационной энергии потока.

Обратное значение коэффициента диссипации пульсационной энергии $1/\lambda$ представляет собой длину пучка твэлов, на которой уро-

$$\langle f_g^{д.ш} \rangle - \langle f_g \rangle, \text{ Н/м}$$



$$\langle f_g^{д.ш} \rangle - \langle f_g \rangle, \text{ Н/м}$$

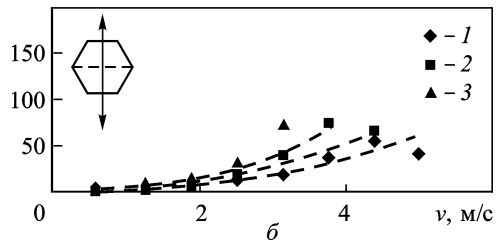


Рис. 2. Разность среднеквадратических значений случайных гидродинамических нагрузок в направлении, перпендикулярном грани пучка, при наличии и отсутствии на входе дроссельных шайб в сечениях $z = 72 \text{ мм}$ (а) и $z = 1527 \text{ мм}$ (б) в зависимости от скорости течения в пучке (точки — эксперимент; штриховая линия — расчет по выражению (4));

1 — дроссельная шайба 52 мм; 2 — 48,5 мм; 3 — 45 мм

вень среднеквадратических значений случайных гидродинамических нагрузок уменьшается в e раз.

При отсутствии на входе в ТВС дроссельных шайб или других возмущающих поток устройств выражение (2) записывается в виде

$$\langle f_g^{д.ш}(z) \rangle \sim C_a (\Delta P_{о,р}) \exp(-\lambda z) + \langle f_g^\infty \rangle. \quad (5)$$

Тогда из соотношений (4) и (5) следует выражение для определения коэффициента диссипации пульсационной энергии потока λ в пучке твэлов:

$$\langle f_g^{д.ш}(z) \rangle - \langle f_g(z) \rangle \sim C_a \Delta P_{д.ш} \exp(-\lambda z). \quad (6)$$

На рис. 2 приведены экспериментальные данные по среднеквадратическим значениям случайных гидродинамических нагрузок на начальном гидродинамическом участке (в сечении $z = 72 \text{ мм}$) и в области установившегося течения ($z = 1527 \text{ мм}$) в направлении, перпендикулярном грани пучка. Коэффициент диссипации пульсационной энергии турбулентного течения не является постоянной величиной, а зависит от числа Рейнольдса ($Re = v d_r \nu$, где d_r — гидравлический диаметр пучка твэлов, ν — коэффициент кинематической вязкости воды). При значениях $C_a = 9,6 \cdot 10^{-2}$ и $\lambda = 10,6 Re^{-0,25}$ экспериментальные данные для всех исследованных дроссельных шайб хорошо согласуются с экспоненциальной зависимостью (6). При скорости течения воды в пучке твэлов $v = 3,8 \text{ м/с}$, близкой к номинальному значению для ТВС ВВЭР-440, λ составляет около $0,79 \text{ м}^{-1}$. При этом случайные гидродинамические нагрузки, сформированные непосредственно за нижней опорной решеткой за счет турбулизации потока входными устройствами, на длине пучка $1/\lambda \sim 1,27 \text{ м}$ снижаются почти в 3 раза. На всем протяжении пучка твэлов ТВС ВВЭР-440 длиной 2,58 м первоначальный уровень случайных гидродинамических нагрузок, обусловленных возмущающим воздействием входных устройств, уменьшается более чем в 7 раз. На рис. 3 приведены распределения

среднеквадратических значений случайных гидродинамических нагрузок по длине пучка твэлов в соответствии с выражением (4) в сопоставлении с экспериментальными данными при различных гидродинамических условиях на входе в ТВС для скорости воды в пучке $v = 3,14$ м/с. Экспериментальные данные подтверждают экспоненциальный характер диссипации пульсационной энергии потока и соответствующее снижение среднеквадратических значений случайных гидродинамических нагрузок по длине пучка за нижней опорной решеткой.

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

$$\langle f_g^\infty \rangle \sim \frac{dP_{\text{ст}}}{dz} S_{\text{пр}} \sim \xi \frac{S_{\text{пр}} \rho v^2}{2}, \quad (7)$$

где ξ — коэффициент гидравлического сопротивления трения в пучке твэлов; $S_{\text{пр}}$ — площадь проходного сечения пучка твэлов.

Коэффициент гидравлического сопротивления трения в пучке расположенных по треугольной решетке твэлов в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = vd_r/\nu = 6 \cdot 10^3 \dots 10^5$ определяется соотношением [4]

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

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

Таким образом, из выражения (5) следует, что случайные гидродинамические нагрузки зависят от скорости в области установившегося течения следующим образом: $\langle f_g^\infty \rangle \sim v^{1,75}$. Экспериментальные данные о среднеквадратических значениях случайных гидродинамических нагрузок в области установившегося течения $z = 1527$ мм в условиях невозмущенного входными устройствами потока подтверждают указанную зависимость случайных гидродинамических нагрузок от скорости течения (рис. 4). Для обобщения экспериментальных данных

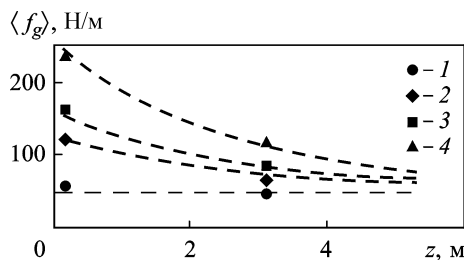


Рис. 3. Распределение среднеквадратических значений случайных гидродинамических нагрузок по длине пучка твэлов при различных гидродинамических условиях на входе в ТВС (точки — эксперимент; штриховая линия — расчет по (4)):

1 — без дроссельной шайбы на входе в ТВС; 2 — на входе с дроссельной шайбой 52 мм; 3 — 48,5 мм; 4 — 45 мм

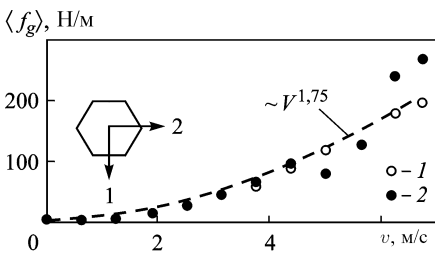


Рис. 4. Влияние скорости течения воды в пучке твэлов на среднеквадратические значения случайных гидродинамических нагрузок в области установившегося течения: 1 — в направлении, перпендикулярном грани пучка; 2 — в направлении, параллельном грани пучка

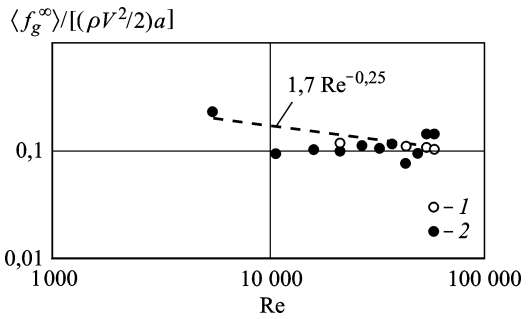


Рис. 5. Обобщение экспериментальных данных о среднеквадратических значениях случайных гидродинамических нагрузок в области установившегося течения (1 и 2 — обозначения см. рис. 4)

по среднеквадратическим значениям случайных гидродинамических нагрузок в области установившегося течения, когда условия на входе в пучок твэлов уже не проявляются, можно на основе выражения (5) предложить следующее эмпирическое соотношение для безразмерной случайной нагрузки:

$$\frac{\langle f_g^\infty \rangle}{(\rho v^2/2) a} = A \xi \frac{S_{\text{нр}}}{d_r a} = A \frac{0,210}{\text{Re}^{0,25}} F(x) \frac{S_{\text{нр}}}{d_r a}, \quad (8)$$

где A — константа.

Для конкретной конструкции ТВС выражение (8) можно записать следующим образом:

$$\frac{\langle f_g^\infty \rangle}{(\rho v^2/2) a} = C \text{Re}^{-0,25}, \quad (9)$$

где $C = 0,210 A F(x) \frac{S_{\text{нр}}}{d_r a}$.

На рис. 5 приведены результаты обобщения в соответствии с формулой (9) данных о среднеквадратических значениях случайных гидродинамических нагрузок в области установившегося течения в сечении пучка твэлов $z = 1527$ мм ТВС ВВЭР-440 в условиях отсутствия дроссельных шайб на входе в ТВС. При значении константы $C = 1,7$ экспериментальные данные удовлетворительно обобщаются соотношением (9).

Повышенные уровни случайных гидродинамических нагрузок, формирующиеся на начальном гидродинамическом участке вблизи нижней опорной решетки в условиях турбулизации потока входными устройствами с высокими гидравлическими сопротивлениями, способствуют и более интенсивной вибрации пучка твэлов (рис. 6). При

скорости течения $v = 3,5$ м/с уровни виброперемещений пучка в сечении $z = 72$ мм при размещении на входе в ТВС дроссельной шайбы 45 мм более чем в 3 раза выше по сравнению с полученными в условиях отсутствия турбулизирующих поток входных устройств. Воздействующие на пучок твэлов случайные гидродинамические нагрузки в указанных условиях находятся примерно в таком же соотношении.

Таким образом, установлен экспоненциальный закон продольного распределения случайных гидродинамических нагрузок, действующих на пучок твэлов ТВС ВВЭР и вызывающих его вибрации. По измеренным распределениям пульсаций давления по периметру внешнего ряда твэлов пучка в двух его сечениях по длине получены характеристики случайных гидродинамических нагрузок. Предложены полуэмпирические соотношения для обобщения экспериментальных данных о распределениях среднеквадратических значений случайных гидродинамических нагрузок по длине пучка твэлов и в области установившегося течения.

Максимальные уровни случайных гидродинамических нагрузок на начальном гидродинамическом участке пропорциональны гидравлическим сопротивлениям входных устройств (например, дроссельных шайб) и нижней опорной решетки. В области установившегося течения случайные гидродинамические нагрузки пропорциональны $Re^{1,75}$.

Результаты проведенных исследований наглядно показывают, что необходимо снижать уровни случайных гидродинамических нагрузок на начальном гидродинамическом участке вблизи нижней опорной решетки. Именно здесь наблюдали наибольшие повреждения оболочек твэлов из-за вибраций. Для этого необходимо избегать размещения в тракте подвода теплоносителя к ТВС и особенно непосредственно на входе в пучок твэлов входных устройств (дроссельных шайб, антидебризных фильтров и др.) с высоким гидравлическим сопротивлением и генерирующих крупномасштабные вихревые структуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kim K. T. The study on grid-to-rod fretting wear models for PWR fuel // Nuclear Engineering and Design. – 2009. – Vol. 239. – P. 2820–2824.

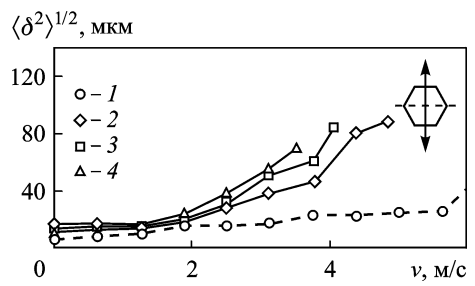


Рис. 6. Зависимость среднеквадратических значений виброперемещений пучка твэлов в сечении $z = 72$ мм в направлении, перпендикулярном грани пучка, от скорости течения воды для различных гидродинамических условий на входе в ТВС (1–4 – см. рис. 3)

2. Пристеночные пульсации давления при турбулентном течении газа в каналах / В.В. Перевезенцев и др. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1992. – 96 с.
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. Кириллов П. Л., Юрьев Ю. С., Бобков В. П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). – М.: Энергоатомиздат. 1984. – 360 с.

Статья поступила в редакцию 31.08.2011



Владимир Васильевич Перевезенцев родился в 1951 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1974 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Ядерные реакторы и установки” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 70 научных работ в области гидродинамики и теплофизических процессов в ядерных энергетических установках.

V.V. Perevezentsev (b. 1951) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1974. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Nuclear Reactors and Facilities” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 70 publications in the field of hydrodynamics and thermal and physical processes in nuclear power generating facilities.