## надежность, прочность, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

УЛК 621.039.546.8

## СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА ПУЧКИ ТВЭЛОВ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ТВС ВВЭР

© 2019 г. В. В. Перевезенцев\*,\*\*

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия \*e-mail: vladimirperevezencev@rambler.ru

\*\*e-mail: perevezentsev@bmstu.ru

Поступила в редакцию 09.01.2018 г. Принята к публикации 26.08.2019 г.

Проведены экспериментальные исследования закономерностей формирования пульсаций давления и обусловленных ими гидродинамических нагрузок на тепловыделяющие элементы в продольном турбулентном потоке теплоносителя в тепловыделяющих сборках водо-водяных энергетических реакторов. Получены спектральные характеристики пульсаций давления и гидродинамических нагрузок для различных условий формирования структуры потока на входе в тепловыделяющие сборки. Представленные результаты позволят осуществить отстройку собственных частот колебаний отдельных тепловыделяющих элементов и пучка в целом от характерных резонансов в спектрах гидродинамических нагрузок и исключить резкое повышение интенсивности вибраций тепловыделяющих элементов.

Ключевые слова: Водо-водяной энергетический реактор, тепловыделяющая сборка, пульсации давления, гидродинамические нагрузки, вибрации, спектральные характеристики, отстройка собственных частот

DOI: 10.1134/S0235711919070083

Вибрационные процессы в ядерных реакторах в значительной степени определяют надежность и безопасность их эксплуатации. Особое место в этой проблеме занимают тепловыделяющие сборки (ТВС) ядерных реакторов. Возбуждаемые турбулентным потоком теплоносителя вибрации тепловыделяющих элементов (твэлов) в ТВС приводят к образованию дефектов оболочек вплоть до их разгерметизации с выходом радиоактивных продуктов деления в теплоноситель. Возникновение дефектов обусловлено усталостными процессами при циклических напряжениях вследствие изгибных деформаций, а также фреттинг-износа твердыми частицами (дебриз-частицы) оболочек в зоне их сопряжения с дистанционирующими решетками. Для анализа гидродинамически возбуждаемых вибраций обычно используются уравнения малых поперечных колебаний, решение которых невозможно при отсутствии информации о действующих на твэлы гидродинамических нагрузках [1]. При наличии в спектрах гидродинамических нагрузок резонансов на частотах близких к собственным частотам отдельных твэлов или пучка в целом возможно резкое повышение интенсивности вибраций. Для исключения резонансного увеличения интенсивности вибраций отдельных твэлов или пучка в целом необходимо либо обеспечить отстройку его собственных частот от характерных частот гидродинаических нагрузок, либо изменить частотный диапазон последних путем целенаправленного формирования структуры

потока на входе в TBC. В любом случае требуется исследование амплитудно-частотных характеристик гидродинамических нагрузок на пучки твэлов в турбулентном потоке теплоносителя.

**1. Условия проведения экспериментальных исследований.** Экспериментальные исследования пульсаций давления и вибраций твэлов в продольном турбулентном потоке выполнены на гидродинамическом стенде с использованием полномасштабного макета TBC BBЭР-440 второго поколения. Макет TBC размещался в колонке гидродинамического стенда с воспроизведением реакторных условий закрепления головки и хвостовика. Скорость течения воды в пучке твэлов при температуре от 10 до 50°С и давлении до 0.3 МПа изменялась в диапазоне до 7 м/с (числа Рейнольдса до  $7 \cdot 10^4$ ). Гидродинамические условия потока воды на входе в пучок твэлов изменялись путем размещения дроссельных шайб с диаметрами d = 45; 48.5 и 52 мм на входе в макет TBC [2]. Виброперемещения твэлов определялись с помощью установленных в твэльных трубках пьезорезистивных двухкомпонентных виброакселерометров в составе измерительных каналов с аналоговыми интегрирующими усилителями. Пульсации давления на внутренней поверхности граней шестигранного чехла макета TBC измерялись пьезорезистивными датчиками пульсаций давления.

Пучок твэлов представляет собой механически и гидродинамически связанную систему отдельных твэлов. Механическая связь обеспечивается нижней опорной решеткой, дистанционирующими решетками и для ТВС ВВЭР-440 шестигранным чехлом. Гидродинамическая связь обусловлена гидроупругими свойствами теплоносителя в объеме пучка твэлов. Гидродинамические нагрузки на твэлы в ТВС формируются в результате воздействия пульсаций давления на обтекаемые турбулентным потоком теплоносителя поверхности. Характеристики пульсаций давления зависят от режимных параметров потока, структуры течения, сформированной особенностями тракта подвода теплоносителя к ТВС, геометрии проходного сечения пучка твэлов. Векторная сумма действующих в заданном сечении на каждый твэл сил в плоскости перпендикулярной оси ТВС и определяет вектор мгновенной гидродинамической нагрузки на пучок твэлов. Для пучков с достаточно большим числом твэлов (~10<sup>2</sup> и более) в силу идентичности характеристик пульсационного движения в отдельных ячейках пучка следует ожидать взаимного уравновешивания сил, действующих на отдельные твэлы, образующие регулярную решетку ячеек. В то же время в "кольцевом" зазоре между внутренней поверхностью шестигранного чехла и внешним рядом твэлов характер течения отличен от области регулярной геометрии. Здесь формируются действующие на периферийный ряд твэлов случайные гидродинамические силы, итоговый вектор которых и определяет гидродинамическую нагрузку на пучок твэлов в целом. Собственные частоты изгибных колебаний пучка как единой механической системы существенно меньше чем отдельных твэлов в пределах их длины между дистанционирующими решетками. По данным [3] собственная частота изгибных колебаний пучка твэлов ТВС ВВЭР-440 в возухе составляет около 5 Гц, а в воде (с учетом присоединенной массы) ~3.9 Гц. Собственная частота колебаний участка твэла между дистанционирующими решетками составляет ~100 Гц. Следовательно, уровни виброперемещений пучка в целом оказываются существенно выше по сравнению с характерными значениями для отдельных твэлов.

2. Результаты экспериментальных исследований пульсаций давления и определения гидродинамических нагрузок. Экспериментальные данные по виброперемещениям при различных гидродинамических условиях на входе в пучок твэлов показывают, что скорость потока теплоносителя не определяет однозначно интенсивность их вибраций. В то же время пульсации давления являются энергетической характеристикой потока, отражающей уровни удельной на единицу объема пульсационной энергии по-

тока  $p' \sim \rho u'^2/2$ , где u' — пульсационная составляющая скорости турбулентного пото-



**Рис. 1.** Влияние скорости течения теплоносителя в пучке твэлов на пульсации давления в хвостовике TBC перед нижней опорной решеткой (а) и виброперемещения на начальном гидродинамическом участке в сечении z = 72 мм между нижней опорной и первой дистанционирующей решетками (б): *1* – невозмущенный турбулентный поток; *2* – на входе в TBC дроссельная шайба 52 мм; *3* – 48.5 мм; *4* – 45 мм.

ка. Частично эта энергия расходуется на возбуждение и поддержание вибраций обтекаемых потоком теплоносителя твэлов. Экспериментальные данные показывают качественное соответствие интенсивности вибраций твэлов уровням пульсаций давления на входе в пучок (рис. 1). Таким образом, пульсации давления являются мерой гидродинамического нагружения твэлов со стороны турбулентного потока теплоносителя, возбуждающего их вибрации.

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

$$\vec{f}_g(z,\tau) = -\int_{\Omega} p'(z,\Omega,\tau) \mathbf{n} d\Omega,$$
(1)

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

Практически компоненты случайной гидродинамической силы в двух взаимно перпендикулярных направлениях *x* и *y* определялись по одновременно измеренным мгновенным значениям пульсаций давления на внутренней поверхности шести граней чехла TBC (рис. 2)

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

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

где a — ширина грани внешнего ряда твэлов;  $\phi_i$  — угол между направлением x и нормалью к поверхности грани внешнего ряда твэлов.

На рис. 3 приведены характерные распределения среднеквадратичных значений пульсаций давления по периметру внешнего ряда твэлов пучка. Можно отметить достаточно равномерное распределение уровней пульсаций давления по всем шести граням чехла как в сечении близком к входу в пучок твэлов, так и на достаточном удалении от нижней опорной решетки. Это свидетельствует о симметричности структуры осредненного и пульсационного течения в зазоре между внешним рядом твэлов и внутренней поверхностью чехла. При этом пульсации давления вблизи нижней опор-



**Рис. 2.** Схема определения действующих на пучок твэлов случайных гидродинамических нагрузок по одновременно измеренным мгновенным значениям пульсаций давления на внутренней поверхности шестигранного чехла TBC: *1* – твэл; *2* – чехол TBC.



**Рис. 3.** Распределение среднеквадратичных значений пульсаций давления по периметру зазора между внешним рядом твэлов и внутренней поверхностью шестигранного чехла TBC 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 TBC); 2 – на входе в TBC дроссельная шайба 52 мм; 3 - 48,5 мм; 4 - 45 мм.

ной решетки выше, чем в удаленной от нее области. Возмущающее воздействие дроссельной шайбы с формированием крупномасштабных вихревых структур перед нижней опорной решеткой (т.е. на входе в пучок твэлов) проявляется 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.

Для понимания особенностей формирования спектрального состава гидродинамических нагрузок целесообразно провести анализ спектров не только пульсаций давления в заданном сечении пучка твэлов, но и разности мгновенных значений пульсаций давления на противоположных гранях пучка. Именно разность мгновенных значений пульсаций давления на противоположных гранях пучка определяет уровни и спек-



**Рис. 4.** Спектральные плотности пульсаций давления в сечениях z = 72 мм (а) и z = 1527 мм (в) на противоположных гранях пучка твэлов и разности их мгновенных значений ((б) – сечение z = 72 мм; (г) – сечение z = 1527 мм) в условиях невозмущенного потока (без дроссельных шайб на входе в TBC): I – пульсации давления  $p_1^i$ ; 2 – пульсации давления  $p_2^i$ .

тральный состав воздействующих на пучок гидродинамических нагрузок. Спектры пульсаций давления  $p'_1$  и  $p'_2$  в одном сечении на противоположных гранях пучка (рис. 4, 5) в области сравнительно низких частот (до ~100 Гц) практически совпадают.

В то же время спектры разности мгновенных значений пульсаций давления в зависимости от условий формирования структуры потока на входе в ТВС существенно различаются. Для невозмущенного потока на входе в ТВС (без размещения дроссельных шайб) и на начальном гидродинамическом участке вблизи нижней опорной решетки, и в области установившегося течения спектральные плотности разности пульсаций давления, а, следовательно, и действующих на пучок твэлов гидродинамических нагрузок сосредоточены, в основном, в области высоких частот (рис. 4).

Возмущающее воздействие дроссельных шайб на течение теплоносителя заключается в формировании крупномасштабных вихревых структур в пристеночной области цилиндрической части хвостовика [4]. Образующиеся за дроссельными шайбами различных диаметров 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. При этом в спектрах разности пульсаций давления на начальном гидродинамическом участке выделяется низкочастотная область, где располагаются и собственные частоты пучка твэлов. Вдали от нижней опорной решетки, где влияние дроссельных шайб на гидродинамику потока в пучке твэлов проявляется слабо, в спектрах разности пульсаций давления попрежнему присутствует только высокочастотная область (рис. 5).

При одинаковых скоростях потока воды в пучке наибольшие гидродинамические нагрузки характерны для дроссельных шайб малых диаметров. При этом влияние



**Рис. 5.** Спектральные плотности пульсаций давления в сечениях z = 72 мм (а) и z = 1527 мм (в) на противоположных гранях пучка твэлов и разности их мгновенных значений ((б) – сечение z = 72 мм; (г) – сечение z = 1527 мм) в условиях размещения дроссельной шайбы 52 мм на входе в ТВС: I – пульсации давления  $p'_1$ ; 2 – пульсации давления  $p'_2$ .

дроссельной шайбы проявляется в наибольшей степени на начальном гидродинамическом участке пучка вблизи нижней опорной решетки (рис. 6). При скорости воды в пучке твэлов ~3.5 м/с, близкой к номинальной в реакторах ВВЭР-440, при размещении на входе в ТВС дроссельной шайбы диаметром 45 мм уровни гидродинамических нагрузок на начальном гидродинамическом участке достигают 350 H/м и более чем в 5 раз превышают соответствующие значения в условиях невозмущенного турбулентного течения.

3. Спектральный состав гидродинамических нагрузок при различных условиях формирования структуры потока на входе в TBC. Способность случайных гидродинамических нагрузок возбуждать и поддерживать вибрации пучка твэлов определяются не только их абсолютными значениями, но и спектральным составом. Наибольшую опасность представляют резонансы в низкочастотной области, где и располагаются собственные частоты пучка.

Сопоставление спектров случайных гидродинамических нагрузок для различных условий формирования структуры (рис. 7) показывает, что на начальном гидродинамическом участке в условиях невозмущенного турбулентного течения отсутствуют повышения спектральных уровней в низкочастотной области. Практически вся энергия гидродинамических нагрузок сосредоточена в области высоких частот от 200 до 400 Гц. 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 [5], 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 способствует повы



**Рис. 6.** Зависимость удельных на единицу длины пучка твэлов среднеквадратичных значений гидродинамических нагрузок в направлении перпендикулярно грани пучка твэлов в сечениях z = 72 мм (а) и z = 1527 мм (б) от скорости течения воды для различных условий формирования структуры потока на входе в TBC: 1 - невозмущенное турбулентное течение (без дроссельной шайбы на входе в TBC); 2 - дроссельная шайба 52 мм; 3 - 48.5 мм; 4 - 45 мм.



**Рис. 7.** Спектральные плотности гидродинамических нагрузок на начальном гидродинамическом участке (z = 72 мм), представленные в размерном (1) и безразмерном (2) видах, в условиях невозмущенного турбулентного течения на входе в TBC (а) и в условиях формирования течения на входе в TBC дроссельной шайбой 52 мм (б).

шению эффективности возбуждения и поддержания вибраций пучка твэлов турбулентным потоком теплоносителя.

Для выявления закономерностей распределения гидродинамических нагрузок по частотам представим их спектральные плотности в безразмерном виде. В качестве масштаба гидродинамических нагрузок на единицу длины пучка твэлов примем величину  $f_{g_0} \sim (\rho V^2/2)a$ . Характерный масштаб частот гидродинамических пульсаций давления определяется отношением скорости течения в пучке твэлов V к условной

ширине  $\Delta$  зазора между внешним рядом твэлов пучка и внутренней поверхностью чехла или между внешними рядами твэлов соседних безчехловых TBC  $\sim V/\Delta$ . Таким образом, безразмерные спектральные плотности мощности гидродинамических на-грузок определяются выражением

$$\hat{S}_{f_g} = S_{f_g} / \left(\frac{\rho V^2}{2}a\right)^2 \frac{\Delta}{V}.$$
(3)

При этом в качестве безразмерной частоты используется величина  $\overline{f} = f \Delta/V$ . Для условий невозмущенного турбулентного течения на входе в TBC основная энергия случайных гидродинамических нагрузок на пучок сосредоточена в области высоких частот  $f \approx 200...400$  Гц. Указанный диапазон соответствует безразмерным частотам от 0.2 до 1.2. При этом максимальные значения безразмерных спектральных плотностей смещаются с ростом скорости течения в область более низких значений безразмерных частот. В низкочастотном диапазоне, где и располагаются собственные частоты пучка твэлов, спектральные уровни незначительны. Установленные на входе в TBC дроссельные шайбы формируют течение с крупномасштабными вихревыми структурами, что не только повышает уровни пульсационной энергии потока, но и перераспределяет резонансы спектральных плотностей в область низких частот. Это обстоятельство способствует повышению эффективности гидродинамического возбуждения вибраций твэлов. Наиболее мощные резонансы в спектральных плотностях мощности случайных гидродинамических нагрузок в условиях формирования течения на входе в TBC дроссельными шайбами расположены в диапазоне безразмерных частот  $\overline{f} = f \Delta/V \prec 0.12$ .

Выводы: 1) полученные результаты показывают, что структура потока на входе в TBC оказывает существенное влияние на гидродинамически возбуждаемые вибрации пучков твэлов в TBC ВВЭР. Скорость течения теплоносителя не определяет однозначно интенсивность вибраций; 2) установленные на входе в TBC дроссельные шайбы формируют течение с крупномасштабными вихревыми структурами, что не только повышает уровни пульсационной энергии потока, но и перераспределяет резонансы спектральных плотностей в область низких частот. Это обстоятельство способствует повышению эффективности гидродинамического возбуждения вибраций твэлов; 3) наиболее мощные резонансы в спектрах случайных гидродинамических нагрузок в условиях формирования течения на входе в TBC дроссельными шайбами расположены в области менее 50 Гц, что соответствует диапазону безразмерных частот меньше 0.12; 4) результаты исследований спектральных характеристик гидродинамических нагрузок можно использовать при выборе конструктивных решений по отстройке собственных частот пучка и отдельных твэлов от характерных резонансов в спектрах гидродинамических нагрузок.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Федорович Е.Д., Фокин Б.С., Аксельрод А.Ф., Гольдберг Е.Н. Вибрации элементов оборудования ядерных энергетических установок. М.: Энергоатомиздат, 1989. С. 168.
- 2. Солонин В.И., Перевезенцев В.В. Влияние гидродинамических нагрузок на вибрации пучков твэлов тепловыделяющих сборок реакторов типа ВВЭР // Ж. Проблемы машиностроения и надежности машин. 2009. № 4. С. 92.
- 3. 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. Т. 113. № 4. С. 237.
- 4. *Солонин В.И., Перевезенцев В.В.* Гидродинамически возбуждаемые вибрации пучка твэлов при различных характеристиках потока теплоносителя на входе в ТВС ВВЭР-440 // Известия вузов. Машиностроение. 2006. № 3. С. 23.
- 5. *Qing M., Jinghui Z.* Orifice-induced Wall Pressure Fluctuations and Pipe Vibrations: Theory and Modeling of Fluid Excitions// Flow, Turbulence and Combustion. 2007. V. 79. P. 25.