

УДК 621.039.546.8

Закономерности формирования гидродинамических нагрузок на пучки ТВЭЛов в турбулентном потоке теплоносителя в ТВС ВВЭР

В.В. Перевезенцев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Formation patterns of hydrodynamic loads on the fuel rod bundles in the turbulent coolant flow in WWER fuel assemblies

V.V. PerevezentsevBMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

e-mail: vladimirperevezentsev@rambler.ru

i Гидродинамически возбуждаемые вибрации тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) в тепловыделяющей сборке (ТВС) способствуют образованию дефектов ТВЭЛов с возможностью выхода радиоактивных продуктов деления в теплоноситель. Одним из путей снижения интенсивности вибраций является уменьшение воздействующих на пучок ТВЭЛов гидродинамических нагрузок за счет профилирования тракта подвода теплоносителя к ТВС. На основе одновременных многоточечных измерений пульсаций давления при турбулентном течении воды в полномасштабном макете ТВС ВВЭР-440 определены гидродинамические нагрузки, вызывающие вибрации ТВЭЛов. Показано, что амплитудно-частотные характеристики гидродинамических нагрузок зависят не только от скорости течения, но и от гидродинамической структуры потока на входе в ТВС ядерных реакторов. Установлено, что высокие уровни гидродинамических нагрузок наблюдаются на начальном гидродинамическом участке пучка ТВЭЛов вблизи нижней опорной решетки в условиях высоких уровней турбулизации потока на входе в ТВС, в частности, при размещении дроссельных шайб. На начальном гидродинамическом участке при высоких уровнях турбулизации потока на входе низкочастотный диапазон гидродинамических нагрузок (до 10 Гц) увеличивает до 40...60 % общие гидродинамические нагрузки. При низких уровнях возмущения потока на входе в ТВС низкочастотная резонансная область отсутствует. Высокие уровни гидродинамических нагрузок в низкочастотной области возбуждают интенсивные вибрации пучка ТВЭЛов, а это приводит к образованию дефектов оболочек и выходу радиоактивных продуктов деления в теплоноситель. Результаты исследования показали, что высокие уровни возмущения потока на входе в ТВС способствуют формированию значительных гидродинамических нагрузок на пучки ТВЭЛов, вызывают их интенсивные вибрации и повреждения ТВЭЛов.

Ключевые слова: ТВС ядерных реакторов, вибрации ТВЭЛов, пульсации давления, гидродинамические нагрузки, амплитудно-частотные характеристики.

i Flow induced vibrations of fuel rods in fuel assemblies promote fuel rod deterioration and can lead to the release of nuclear fission fragments into the fuel assembly. One of the ways to reduce vibration intensity is to decrease hydrodynamic loads on the fuel rod bundle through redistribution of the inlet coolant flow. Simultaneous multi-point measurements of pressure

pulsations in the turbulent water flow in a full-scale model of fuel assembly WWER-440 are used to determine hydrodynamic loads that cause fuel rod vibrations. It is shown that amplitude and frequency of hydrodynamic loads depend not only on the flow velocity but also on the flow configuration at the inlet to the nuclear reactor fuel assembly. High levels of hydrodynamic loads are characteristic of the initial hydrodynamic area of the rod bundle near the lower supporting grid where high levels of flow turbulence at the fuel assembly inlet are observed, in particular when throttling spacers are used. At the initial hydrodynamic area where flow turbulence is high, hydrodynamic loads in the low-frequency range (up to 10 Hz) contribute up to 40–60% of the total hydrodynamic loads. When flow disturbance at the inlet to the fuel assembly is low, the low-frequency response is absent. High levels of hydrodynamic loads in the low-frequency region produce intense vibration of the fuel rod bundle, leading to the formation of defects of the cladding and the release of nuclear fission products into the coolant. The results of the investigations have shown that high levels of flow disturbance at the inlet to the fuel assembly promotes the formation of appreciable hydrodynamic loads on the fuel rod bundles, causing their intense vibration and fuel rod damage.

Keywords: nuclear reactor, fuel assemblies, fuel rods, vibration, pressure fluctuation, hydrodynamic loads, amplitude-frequency characteristics.

Тепловыделяющие сборки (ТВС) ядерных реакторов являются одними из наиболее важных систем, определяющих безопасность и надежность эксплуатации реакторных установок (РУ) в целом. В продольном турбулентном потоке водного теплоносителя возбуждаются вибрации стержневых тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов).

Цель работы — исследование закономерностей формирования гидродинамических нагрузок на пучки ТВЭЛов в турбулентном потоке теплоносителя в ТВС водо-водяного энергетического реактора (ВВЭР).

В ТВС ТВЭЛы объединены в пучок дискретно расположенными по его длине дистанционирующими решетками (ДР) и нижней опорной решеткой, в которой закреплены хвостовики ТВЭЛов (рис. 1). Гидродинамически возбуждаемые вибрации приводят к образованию дефектов оболочек ТВЭЛов, вплоть до их разгерметизации вследствие коррозионно-усталостных процессов из-за изгибных деформаций; динамического взаимодействия оболочек ТВЭЛов с ДР в узлах их сопряжений с развитием фреттинг-износа; повреждений твердыми частицами (дебриз-износ) при попадании и фиксации их в ячейках между оболочкой и ДР. Кроме этого вибрации ТВЭЛов обуславливают повышенные циклические напряжения в зоне крепления хвостовиков ТВЭЛов в нижней опорной решетке, что способствует инициированию и дальнейшему развитию механического износа хвостовиков [1].

При эксплуатации ВВЭР неоднократно наблюдались повреждения оболочек ТВЭЛов в узлах их сопряжения с ДР, т. е. в зоне контактов

оболочек с пуклевками ДР. Так, например, в 2002–2003 годах на 2-м блоке Кольской АЭС (ВВЭР-440, проект В-230) были зафиксированы массовые повреждения оболочек ТВЭЛов в области их сопряжения с ДР. Причем эти повреждения в основном были локализованы на

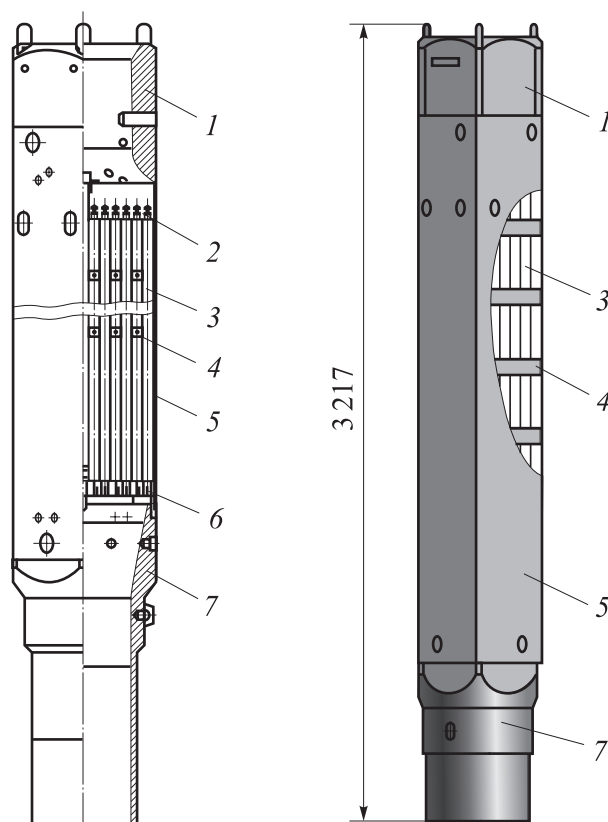


Рис. 1. Конструктивная схема ТВС ВВЭР-440:
1 — головка; 2 — верхняя решетка; 3 — ТВЭЛ;
4 — дистанционирующая решетка; 5 — чехол; 6 — нижняя опорная решетка; 7 — хвостовик

начальном гидродинамическом участке течения теплоносителя в области первых трех пролетов пучка от нижней опорной решетки. Причины повреждений обусловлены интенсивными вибрациями отдельных ТВЭЛов и пучка в целом вследствие неблагоприятной гидродинамики на входе в активную зону. Плоское днище шахты реактора формирует вихревые структуры и высокие уровни пульсаций давления. Износ узлов крепления внутри корпусных устройств, способствующих колебаниям последних вместе с вложенными в них ТВС, а также достаточно высокая скорость теплоносителя явились факторами, спровоцировавшими повреждения оболочек ТВЭЛов. Снижение скорости теплоносителя и восстановление проектного закрепления шахты позволили устранить проблему образования дефектов оболочек, вызванных вибрационными процессами в турбулентном потоке теплоносителя [2, 3]. Таким образом, снижение вибронгруженности пучка ТВЭЛов в значительной степени определяется гидродинамическими параметрами потока теплоносителя в ТВС. При этом скорость теплоносителя в ТВС нельзя рассматривать в качестве основной гидродинамической характеристики, определяющей вибронгруженности пучка ТВЭЛов. Воздействующие на обтекаемые поверхности гидродинамические нагрузки (силы) определяются полем пристеночных пульсаций давления, характеристики которых зависят не только от скорости потока, но и от условий обтекания. Для цилиндрического ТВЭЛа вектор, действующий на его единичную длину в сечении z в момент времени τ в плоскости, перпендикулярной оси ТВС, определяется распределением мгновенных значений пульсаций давления на поверхности оболочки ТВЭЛа [4]:

$$f_{gi}(z, \tau) = \int_{\varphi} p'_i(z, \varphi, \tau) \mathbf{n} \frac{d}{2} d\varphi, \quad (1)$$

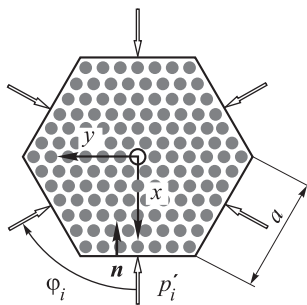


Рис. 2. Схема определения гидродинамических нагрузок на пучок ТВЭЛов по измеренным мгновенным значениям пульсаций давления на внутренней поверхности граней чехла ТВС

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 ; φ — азимутальный угол направления вектора гидродинамической нагрузки; \mathbf{n} — нормаль к обтекаемой поверхности; d — внешний диаметр оболочки.

Соотношение (1) позволяет определить гидродинамическую нагрузку на единичный ТВЭЛ пучка. Колебания пучка ТВЭЛов, объединенных механически ДР и нижней опорной решеткой, возбуждаются под действием общего вектора гидродинамической нагрузки:

$$f_g(z, \tau) = \sum_{i=1}^m f_{gi}(z, \tau). \quad (2)$$

Здесь m — общее количество ТВЭЛов в пучке.

Таким образом, спрогнозировать и количественно оценить интенсивности вибраций ТВЭЛов в турбулентном потоке теплоносителя без данных о пристеночных пульсациях давления на обтекаемых поверхностях нельзя. Однако при экспериментальных исследованиях измерить пульсации давления на каждом ТВЭЛе в пучке практически невозможно. Колебания пучка ТВЭЛов, связанных между собой ДР и нижней опорной решеткой, возбуждаются пульсациями давления, которые распределены по периметру внешнего ряда ТВЭЛов (рис. 2). Поэтому при исследовании измеряли пульсации давления на внутренней поверхности шестигранного чехла ТВС. Эксперимент проводили на полномасштабном макете ТВС ВВЭР-440 2-го поколения со свинцовыми имитаторами таблеток ядерного топлива. Для измерений пульсаций давления использовали пьезорезистивные датчики, а вибрационных характеристик — пьезорезистивные двухкомпонентные виброакселерометры в составе измерительных каналов с интегрирующими усилителями. Сведения об экспериментальном стенде, измерительных средствах и методиках измерений изложены в работах [4–6]. Во время эксперимента в двух сечениях пучка ТВЭЛов на расстоянии $z = 72$ мм (1-й пролет пучка ТВЭЛов) и $z = 1527$ мм (7-й пролет пучка ТВЭЛов) от выходного торца нижней опорной решетки одновременно измеряли мгновенные значения пульсации давления на внутренней поверхности шести граней чехла в каждом сечении. По этим значениям определяли составляющие гидродинамических нагрузок в двух взаимно перпендикулярных направлениях:

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

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

где a — ширина грани пучка ТВЭЛов по внешнему его ряду.

Пульсации давления измеряли также и перед нижней опорной решеткой на расстоянии 109 мм от ее выходного торца. Результаты этих измерений характеризуют гидродинамику течения, сформированного трактом подвода теплоносителя к ТВС. С целью изменения структуры течения на входе в ТВС устанавливали дроссельные шайбы с диаметрами центрального отверстия 45; 48,5 и 52 мм. В ТВС ВВЭР-440 эти шайбы предусмотрены для профилирования расхода.

Пульсации давления отражают энергетическую насыщенность потока, а, следовательно, и его способность возбуждать вибрации обтекаемых поверхностей и, в частности, пучка ТВЭЛов. Приведенные на рис. 3 данные свидетельствуют о качественном соответствии интенсивности вибраций уровням пульсаций давления на входе в пучок и неоднозначную связь вибраций с осредненными характеристиками турбулентного потока. В частности, скорость течения не может служить единственной гидродинамической характеристикой, определяющей амплитуды вибраций пучка ТВЭЛов [7]. Дроссельные шайбы турбулизируют поток и формируют вихревые структуры, что повышает интенсивность пульсаций давления и влияет на их спектральный состав [8]. Пульсации давления являются источником формирования гид-

родинамических нагрузок на обтекаемые поверхности.

Из выражения (3) следует, что гидродинамические нагрузки определяются мгновенными значениями и фазовыми сдвигами пульсаций давления на противоположных гранях пучка ТВЭЛов. Очевидно, чем больше разность мгновенных значений пульсаций давления, тем выше гидродинамические нагрузки. При одинаковых мгновенных значениях пульсаций давления и нулевом фазовом сдвиге между ними гидродинамические нагрузки в соответствующем направлении не возникают. Наибольшие гидродинамические нагрузки при любых мгновенных значениях пульсаций давления на противоположных гранях пучка формируются при фазовом сдвиге $\Delta\varphi = 180^\circ$. Данные по среднеквадратичным значениям разности мгновенных пульсаций давления на противоположных гранях пучка ТВЭЛов свидетельствуют о существенном влиянии гидродинамики потока на входе в ТВС на уровни гидродинамических нагрузок на пучки ТВЭЛов (рис. 4). Дроссельные шайбы создают на входе в ТВС высокотурбулизованный поток с вихревыми структурами, что способствует формированию в области начального гидродинамического участка (в пределах первых трех пролетов пучка ТВЭЛов) достаточно высоких уровней гидродинамических нагрузок. В области установившегося течения влияние гидродинамических нагрузок на входе в ТВС становится незначительным и возмущающее воздействие дроссельных шайб проявляется достаточно слабо.

Фазовый сдвиг между пульсациями давления на противоположных гранях пучка возни-

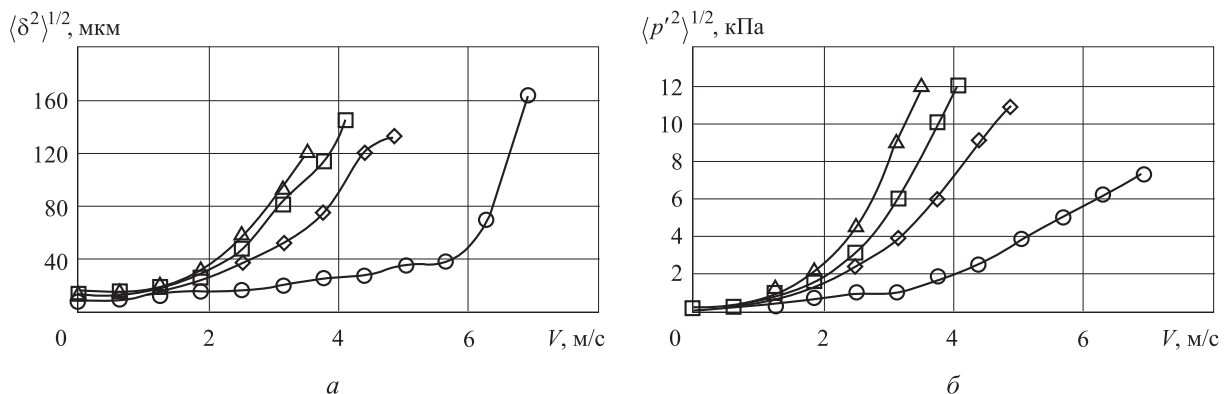


Рис. 3. Зависимости среднеквадратичных значений виброперемещений пучка ТВЭЛов в сечении $z = 72$ мм (а) и пульсаций давления перед нижней опорной решеткой $z = -109$ мм (б) от скорости воды в пучке при различных гидродинамических условиях на входе в ТВС: \circ — невозмущенный турбулентный поток (без дроссельной шайбы на входе в ТВС); \diamond — с дроссельной шайбой диаметром 52 мм на входе в ТВС; \square — с дроссельной шайбой диаметром 48,5 мм на входе в ТВС; \triangle — с дроссельной шайбой диаметром 45 мм на входе в ТВС

кает в том случае, когда эти пульсации обусловлены отдельными, не связанными друг с другом вихрями. Определить наличие и характерную частоту таких вихрей можно по функции когерентности сигналов, сформированных пульсациями давления p'_1 и p'_2 . Функция когерентности характеризует «связанность» двух процессов в частотной области. Очевидно, что низким значениям этой функции на определенных частотах соответствуют пульсации давления, вызванные независимыми вихревыми структурами. Именно на таких частотах формируются существенные фазовые сдвиги, а, следовательно, и более высокие гидродинамические нагрузки в соответствующем направлении. Следует отметить, что особое значение имеет низкочастотный диапазон, где располагаются собственные частоты пучка ТВЭЛов. Например, по результатам ранее проведенных экспериментальных исследований [6] динамических характеристик пучка ТВЭЛов ТВС ВВЭР-440 2-го поколения собственная частота изгибных колебаний пучка ТВЭЛов в воде составляет 3,9 Гц. Возбуждение вибраций в турбулентном потоке теплоносителя на частотах гидродинамических нагрузок, близких к собственным частотам пучка ТВЭЛов, носит резонансный характер.

Зависимости функций когерентности и фазовых сдвигов между пульсациями давления p'_1 и p'_2 на противоположных гранях пучка ТВЭЛов на начальном гидродинамическом участке и в области установившегося течения приведены на рис. 5. Для невозмущенного турбулентного течения при отсутствии на входе в ТВС дроссельных шайб в области сравнительно низких частот коэффициент частотной коге-

рентности близок к 1. Это свидетельствует о том, что пучок ТВЭЛов в целом подвержен воздействию единого кольцевого вихря. При этом фазовый сдвиг между пульсациями давления p'_1 и p'_2 на противоположных гранях пучка не возникает, а гидродинамическая нагрузка в соответствующем направлении формируется только из-за разности мгновенных значений пульсаций давления. Следует отметить, что в условиях невозмущенного турбулентного течения разность пульсаций давления существенно меньше по сравнению с соответствующими значениями при формировании структуры потока дроссельными шайбами.

Естественно, отмеченная особенность относится, прежде всего, к начальному гидродинамическому участку в пределах первых трех пролетов пучка ТВЭЛов. В удаленной от нижней входной решетки области, где влияние входных условий на гидродинамику течения незначительно, разность пульсаций давления на противоположных гранях пучка становится существенно меньше (см. рис. 4). Установленные на входе в ТВС дроссельные шайбы формируют крупномасштабные вихревые структуры, которые проходят через отверстия в нижней опорной решетке и распространяются в зазоре между внутренней поверхностью чехла и внешним рядом ТВЭЛов на начальном гидродинамическом участке пучка не синхронно. Это приводит к фазовому сдвигу в пульсациях давления по периметру внешнего ряда пучка ТВЭЛов и, как следствие, к повышению низкочастотных спектральных уровней разности пульсаций давления на противоположных гранях пучка. На рис. 5 видно, что существенные фазовые сдвиги реализуются на частотах с мини-

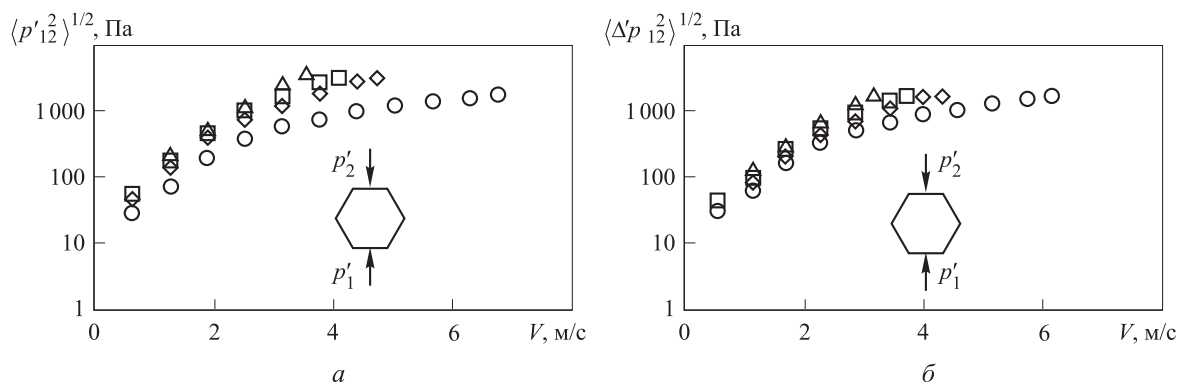


Рис. 4. Зависимости среднеквадратичных значений разности пульсаций давления на противоположных гранях пучка ТВЭЛов в сечениях $z = 72$ мм (а) и $z = 1527$ мм (б) от скорости течения воды при различных гидродинамических условиях на входе в макет ТВС:

○ — невозмущенный турбулентный поток (без дроссельной шайбы на входе в ТВС); ◇ — с дроссельной шайбой диаметром 52 мм на входе в ТВС; □ — с дроссельной шайбой диаметром 48,5 мм на входе в ТВС; △ — с дроссельной шайбой диаметром 45 мм на входе в ТВС

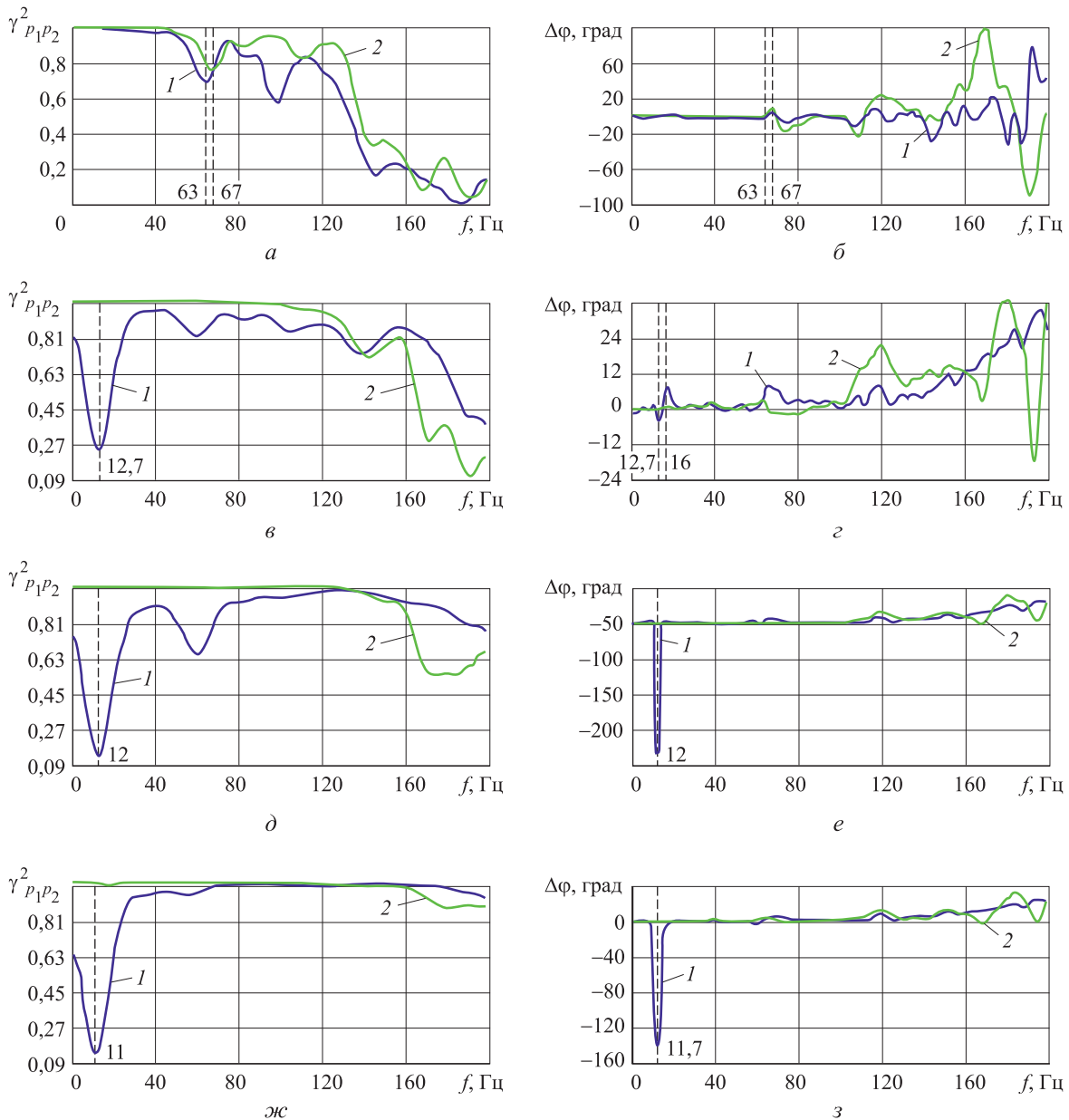


Рис. 5. Зависимости коэффициентов частотной когерентности пульсаций давления p'_1 и p'_2 на противоположных гранях пучка ТВЭЛов (а, в, д, ж) и сдвига фаз между ними (б, г, е, з) от гидродинамических условий на входе в ТВС (скорость течения воды в пучке ТВЭЛов 3,14 м/с): а, б — невозмущенное турбулентное течение (без дроссельной шайбы на входе в ТВС); в, г — с дроссельной шайбой диаметром 52 мм на входе в ТВС; д, е — с дроссельной шайбой диаметром 48,5 мм на входе в ТВС; ж, з — с дроссельной шайбой диаметром 45 мм на входе в ТВС мм; 1 — $z = 72$ мм; 2 — $z = 1527$ мм (полноцветную версию см. <http://www.izvuzmash.bmstu.ru>)

малыми значениями коэффициентов частотной когерентности, когда на противоположные грани пучка ТВЭЛов воздействуют отдельные, не связанные друг с другом, вихри. Очевидно, что наибольшие нагрузки будут формироваться при фазовом сдвиге $\Delta\phi = 180^\circ$. При нулевом фазовом сдвиге и одинаковых мгновенных значениях пульсаций давления гидродинамическая нагрузка не возникает. При размещении на входе в ТВС дроссельных шайб малых диа-

метров (48,5 и 45 мм) фазовые сдвиги на частотах ~ 12 Гц достигают значений ~ 178 и 143° соответственно. С учетом более высоких по сравнению с невозмущенным турбулентным течением значений разностей пульсаций давления указанные уровни фазовых сдвигов, безусловно, формируют существенные гидродинамические нагрузки на начальном гидродинамическом участке ($z = 72$ мм). В области установившегося течения существенных фазовых сдвигов

в пульсациях давления на противоположных гранях пучка не наблюдается. Вдали от нижней опорной решетки отдельные вихри объединяются и в зазоре между чехлом и внешним рядом ТВЭЛов пучка распространяются продольные кольцевые вихри, полностью окружающие периметр пучка. При этом фазового сдвига в низкочастотных пульсациях давления в пределах одного кольцевого вихря не возникает.

Способность 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, не превышающие 10 Гц [6]. 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 160...400 Гц. Очевидно, что 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 гидродинами-

ческие нагрузки с резонансами в низкочастотной области. Наличие резонансов в области низких частот способствует повышению эффективности потока относительно возбуждения и поддержания вибраций пучка ТВЭЛов. Сопоставление спектров случайных гидродинамических нагрузок для различных условий формирования структуры потока на входе в ТВС (рис. 6) наглядно показывает, что только при наличии на входе в ТВС дроссельных шайб в низкочастотной области появляются выраженные резонансы на начальном гидродинамическом участке. В удаленной от нижней опорной решетки области пучка проявляется вклад только высокочастотных составляющих случайных гидродинамических нагрузок при всех условиях формирования структуры потока на входе в ТВС. Здесь отсутствует возмущающее воздействие дроссельных шайб на течение в пучке ТВЭЛов. Это свидетельствует о том, что в области установившегося течения практически утрачивается «информация» о вихревой структуре, приобретенной им при течении через дроссельные шайбы или другие возмущающие поток устройства.

Изложенные выше особенности формирования воздействующих на пучок ТВЭЛов гидродинамических нагрузок свидетельствуют о существенном влиянии на них гидродинамических условий на входе в ТВС. Для высокотурбулентизированных течений с вихревыми структурами при наличии на входе в ТВС дроссельных шайб характерны повышенные гидродинамические нагрузки по сравнению с невозмущенным турбулентным течением.

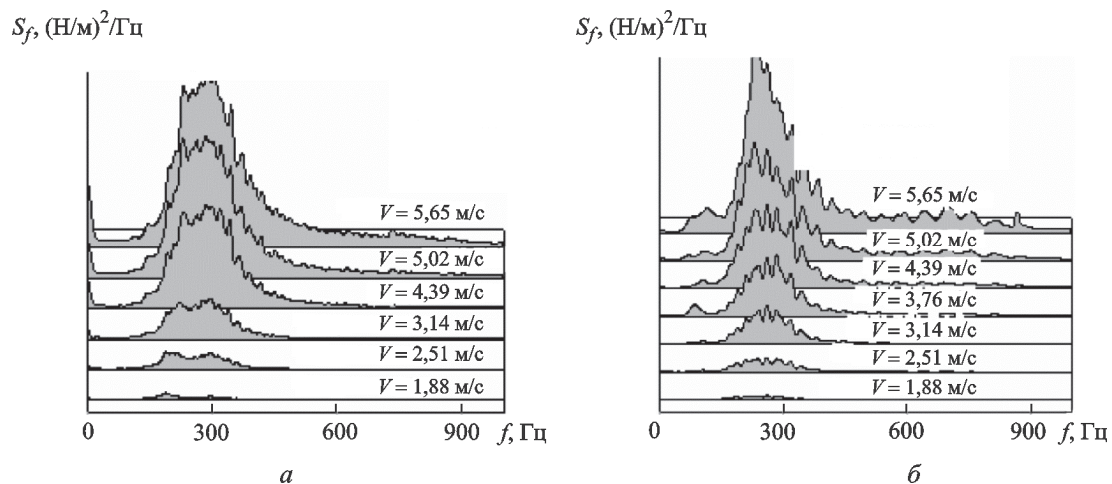


Рис. 6 (начало). Спектры гидродинамических нагрузок в направлении перпендикулярно грани пучка (по x) при различных скоростях течения воды в пучке ТВЭЛов в сечениях $z = 72$ мм (а, в, д, ж) и $z = 1527$ мм (б, г, е, з) при различных условиях формирования структуры потока на входе в ТВС: а, б — невозмущенное турбулентное течение (без дроссельной шайбы на входе в ТВС)

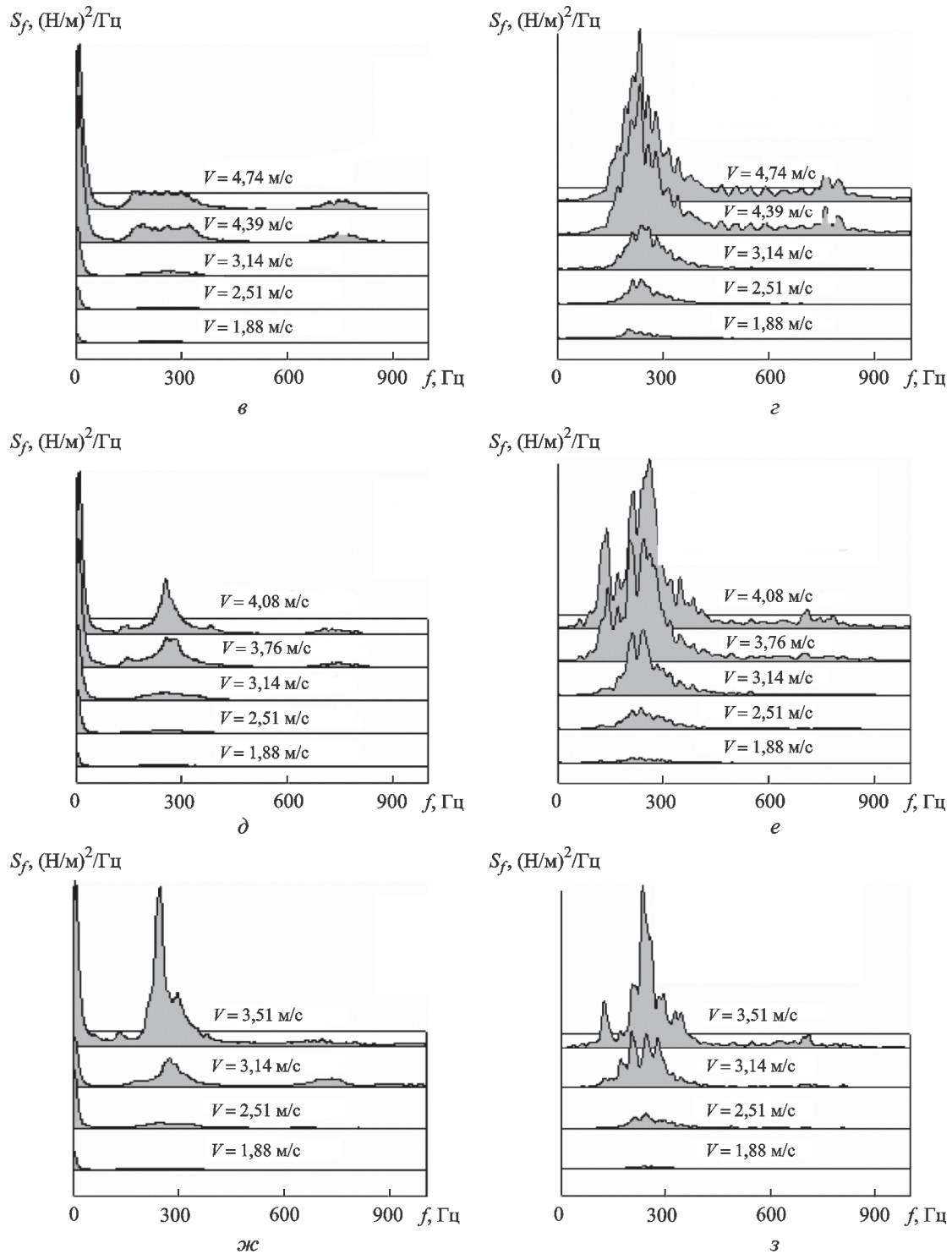


Рис. 6 (окончание). Спектры гидродинамических нагрузок в направлении перпендикулярно грани пучка (по x) при различных скоростях течения воды в пучке ТВЭЛов в сечениях $z = 72$ мм (а, в, д, ж) и $z = 1527$ мм (б, з, е, з) при различных условиях формирования структуры потока на входе в ТВС: в, з — с дроссельной шайбой диаметром 52 мм на входе в ТВС; д, е — с дроссельной шайбой диаметром 48,5 мм на входе в ТВС; ж, з — с дроссельной шайбой диаметром 45 мм на входе в ТВС

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

ной шайбы в наибольшей степени проявляется на начальном гидродинамическом участке пучка вблизи нижней опорной решетки (рис. 7). В направлении, параллельном грани пучка,

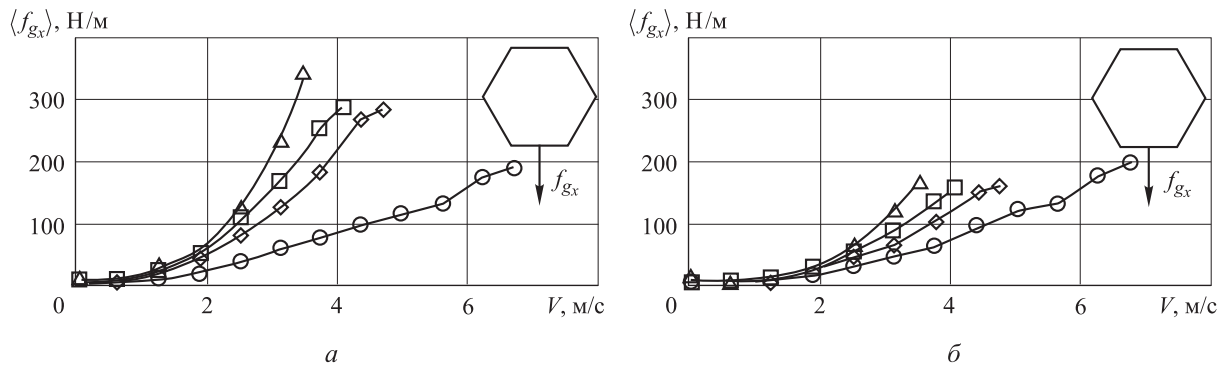


Рис. 7. Зависимость среднеквадратичных значений гидродинамических сил на единицу длины в направлении перпендикулярно грани пучка ТВЭЛОВ в сечениях $z = 72$ мм (а) и $z = 1527$ мм (б) от скорости течения воды для различных условий формирования структуры потока на входе в ТВС:
 ○ — невозмущенное турбулентное течение (без дроссельной шайбы на входе в ТВС); ◇ — с дроссельной шайбой диаметром 52 мм на входе в ТВС; □ — с дроссельной шайбой диаметром 48,5 мм на входе в ТВС; △ — с дроссельной шайбой диаметром 45 мм на входе в ТВС

получены аналогичные результаты. При скорости воды в пучке ТВЭЛОВ $\sim 3,5$ 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 Н/м и более чем в 5 раз превышают соответствующие значения в условиях невозмущенного турбулентного течения.

Распространяющиеся вдоль внешнего ряда пучка ТВЭЛОВ вихревые структуры или турбулентные моли в каждом сечении оказывают силовое воздействие на пучок, уровни которого, как было показано выше, зависят от интенсивности и фазового сдвига пульсаций давления на противоположных гранях пучка. Продольный

размер вихря или турбулентного моля в определенной степени отражает сосредоточенный или распределенный характер их силового воздействия на пучок ТВЭЛОВ. При малых продольных размерах вихря или турбулентного моля гидродинамическая нагрузка имеет сосредоточенный характер, а при больших — распределенный. Сосредоточенная нагрузка создает бóльший прогиб пучка ТВЭЛОВ по сравнению с распределенной при одинаковых среднеквадратичных их значениях. Характерный временной масштаб вихрей или турбулентных молей может быть оценен по автокорреляционным функциям пульсаций давления. Коэффициент автокорреляции — нормированная на квадрат значений пульсаций давления $\langle p'^2 \rangle$ автокорреляционная функция $R_{pp}(\Delta\tau)$ [9]:

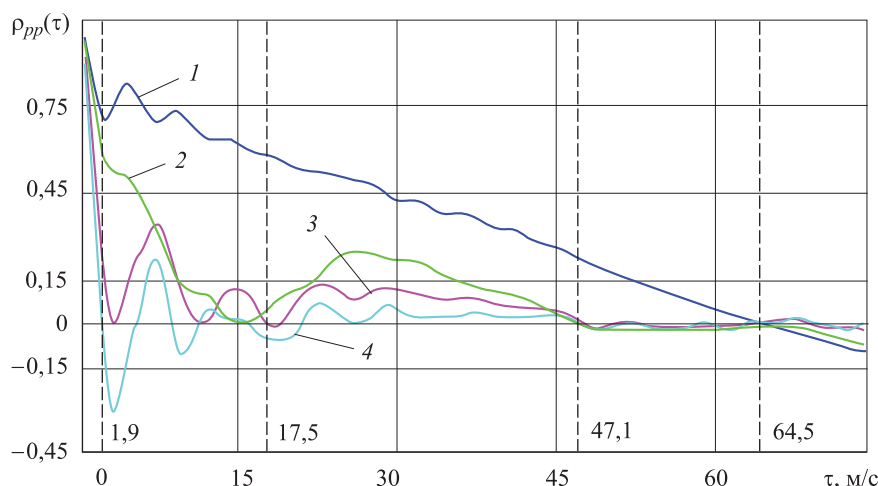


Рис. 8. Зависимость коэффициента автокорреляции пульсаций давления в сечении $z = 72$ мм пучка ТВЭЛОВ от различных гидродинамических условий на входе в ТВС (скорость воды в пучке 3,14 м/с):

1 — невозмущенное турбулентное течение (без дроссельной шайбы на входе в ТВС); 2 — с дроссельной шайбой диаметром 52 мм на входе в ТВС; 3 — с дроссельной шайбой диаметром 48,5 мм на входе в ТВС; 4 — с дроссельной шайбой диаметром 45 мм на входе в ТВС

(полноцветную версию см. <http://www.izvuzmash.bmstu.ru>)

$$\rho_{pp}(\tau) = \frac{R_{pp}(\Delta\tau)}{\langle p'^2 \rangle}. \quad (4)$$

Автокорреляционная функция определяется как среднее (математическое ожидание) за интервал времени T значение произведения величин пульсаций давления в моменты времени τ и $\tau + \delta\tau$:

$$R_{pp}(\Delta\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T p'(\tau) p'(\tau + \delta\tau) d\tau, \quad (5)$$

где $\delta\tau$ — временной сдвиг, или время задержки между моментами фиксации величины $p'(\tau)$ стационарного случайного процесса пульсаций давления.

Временной масштаб вихревых структур или турбулентных молей можно определить как временной интервал τ_0 , при котором $\rho_{pp}(\tau) = 0$ (соответствующие значения отмечены на рис. 8). Пространственный масштаб определяли как произведение временного интервала на скорость течения воды в пучке ТВЭЛов: $L = \tau_0 V$. Приведенные на рис. 9 результаты показывают, что в условиях невозмущенного турбулентного течения пространственные масштабы монотонно увеличиваются с ростом скорости течения с тенденцией к установившемуся значению ~280...300 мм, т. е. пучок ТВЭЛов испытывает воздействие распределенной нагрузки. При размещении на входе в ТВС дроссельных шайб на скоростях течения 2,5...3,0 м/с происходит резкое уменьшение пространственного масштаба с 240 до 10 мм. Это означает, что при высоких скоростях течения гидродинамические нагрузки становятся более сосредоточенными.

Выводы

1. Экспериментальные исследования гидродинамического возбуждения вибраций пучков ТВЭЛов в ТВС водоохлаждаемых реакторов показали, что механизмы взаимодействия пуч-

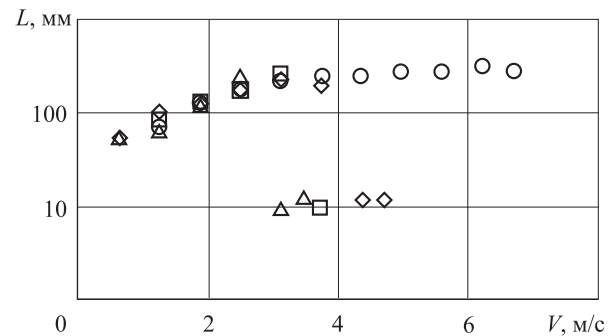


Рис. 9. Зависимость продольного пространственного масштаба вихрей или турбулентных молей в сечении $z = 1527$ мм от скорости воды в пучке при различных гидродинамических условиях на входе в ТВС:

- — невозмущенное турбулентное течение (без дроссельной шайбы на входе в ТВС);
- ◇ — с дроссельной шайбой диаметром 52 мм на входе в ТВС; □ — с дроссельной шайбой диаметром 48,5 мм на входе в ТВС; △ — с дроссельной шайбой диаметром 45 мм на входе в ТВС

ка ТВЭЛов аналогичны механизмам взаимодействия механической колебательной системы с гидродинамикой турбулентного потока теплоносителя.

2. Основные колебания с большими амплитудами характерны для пучка в целом, обладающего существенно более низкими собственными частотами по сравнению с собственными частотами отдельных ТВЭЛов между дистанционирующими решетками.

3. Скорости течения теплоносителя не определяют однозначно вибрации пучка ТВЭЛов. Важное значение имеют пульсационные характеристики потока.

4. Для снижения интенсивности вибраций ТВЭЛов в ТВС ВВЭР необходимо совершенствовать тракты подвода теплоносителя к ТВС в целях снижения уровней пульсаций давления на входе в пучок и формирования их спектров без резонансов в низкочастотной области.

Литература

- [1] Перевезенцев В.В. Вибрации и повреждения ТВЭЛов в турбулентном потоке теплоносителя в тепловыделяющих сборках ВВЭР. *Безопасность в техносфере*, 2011, № 6, с. 11–17.
- [2] Аркадов Г.В., Павелко В.И., Финкель Б.М. *Системы диагностирования ВВЭР*. Москва, Энергоатомиздат, 2010. 391 с.
- [3] Kim K.T., Suh J.M. Impact of Nuclear Fuel Assembly Design on Grid-to-Rod Fretting Wear. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2009, vol. 46, no. 2, pp. 149–157.
- [4] Перевезенцев В.В., Солонин В.И., Сорокин Ф.Д. Нестационарные гидродинамические нагрузки и вибрации пучка ТВЭЛов в ТВС ВВЭР-440. *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика*, 2008, № 4, с. 104–112.
- [5] 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.
- [6] 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*, 2012, т. 113, № 4, с. 237–240.
- [7] Драгунов Ю.Г., Солонин В.И., Перевезенцев В.В., Петров И.В. Вибрации пучков ТВЭЛов в ТВС ВВЭР, возбуждаемые турбулентным потоком теплоносителя. *Атомная энергия*, 2012, т. 113, № 3, с. 127–134.
- [8] Qing M., Jinghui Z. Orifice-induced Wall Pressure Fluctuations and Pipe Vibrations: Theory and Modeling of Fluid Excitations. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2007, vol. 79, iss. 1, pp. 25–40.
- [9] Бендат Дж., Пирсол А. *Прикладной анализ случайных данных*. Москва, Мир, 1989. 540 с.

References

- [1] Perevezentsev V.V. Vibratsii i povrezhdeniia tvelov v turbulentnom potoke teplonositel'ia v teplovydeliaiushchikh sborkakh VVER [Vibration and damage to the fuel rods in a turbulent flow of coolant in the fuel assemblies of WWER]. *Bezopasnost' v tekhnosfere* [Safety in technosphere]. 2011, no. 6, pp. 11–17.
- [2] Arkadov G.V., Pavelko V.I., Finkel' B.M. *Sistemy diagnostirovaniia VVER* [Diagnostic system VVER]. Moscow, Energoatomizdat publ., 2010. 391 p.
- [3] Kim K.T., Suh J.M. Impact of Nuclear Fuel Assembly Design on Grid-to-Rod Fretting Wear. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2009, vol. 46, no. 2, pp. 149–157.
- [4] Perevezentsev V.V., Solonin V.I., Sorokin F.D. Nestatsionarnye gidrodinamicheskie nagruzki i vibratsii puchka TVELOv v TVS VVER-440 [Stationary Hydrodynamic Loadings and Fuel Rods Beam Vibrations in Fuel Assembly WWER-440]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika* [Proceedings of Universities. Nuclear Power]. 2008, no. 4, pp. 104–112.
- [5] Solonin V.I., Perevezentsev V.V. Vliianie gidrodinamicheskikh nagruzok na vibratsii puchkov TVELOv teplovydeliaiushchikh sborok reaktorov tipa VVER [Influence of hydrodynamic loads on the vibration bundles of fuel assemblies of VVER reactors]. *Problemy mashinostroeniia i nadezhnosti mashin* [Journal of Machinery Manufacture and Reliability]. 2009, no. 4, pp. 92–97.
- [6] Dragunov Iu.G., Solonin V.I., Perevezentsev V.V., Petrov I.V. Eksperimental'nye issledovaniia dinamicheskikh kharakteristik puchkov tvelov TVS VVER v turbulentnom potoke teplonositel'ia [Experimental the Analyses of the Fuel Rods Beams Dynamic Characteristics of the ВВЭР Fuel Assemblies in the Coolant Turbulent Flow]. *Atomnaia energiya* [Atomic Energy]. 2012, vol. 113, no. 4, pp. 237–240.
- [7] Dragunov Iu.G., Solonin V.I., Perevezentsev V.V., Petrov I.V. Vibratsii puchkov TVELOV v TVS VVER, vzbuzhdaemye turbulentnym potokom teplonositel'ia [Vibrations of the Fuel Elements Beams in ВВЭР Fuel Assembly, Excited by Turbulent Coolant Flow]. *Atomnaia energiya* [Atomic Energy]. 2012, vol. 113, no. 3, pp. 127–134.
- [8] Qing M., Jinghui Z. Orifice-induced Wall Pressure Fluctuations and Pipe Vibrations: Theory and Modeling of Fluid Excitations. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2007, vol. 79, iss. 1, pp. 25–40.
- [9] Bendat Dzh., Pirsol A. *Prikladnoi analiz sluchainykh dannykh* [Applied analysis of random data]. Moscow, Mir publ., 1989. 540 p.

Статья поступила в редакцию 27.02.2015

Информация об авторе

ПЕРЕВЕЗЕНЦЕВ Владимир Васильевич (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Ядерные реакторы и установки». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: vladimirperevezencev@rambler.ru).

Information about the author

PEREVEZENTSEV Vladimir Vasilievich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Nuclear Reactors and Installations. BMSTU (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: vladimirperevezencev@rambler.ru).