

Перевезенцев Владимир Васильевич

**СЛУЧАЙНЫЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ, ВИБРАЦИИ
И ДЕМПФИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ПУЧКОВ ТВЭЛОВ ТВС
РЕАКТОРОВ ВВЭР В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ**

Специальность 05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая
проектирование, эксплуатацию и снятие с эксплуатации

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



Москва – 2012

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Данилов В.Л. (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

доктор технических наук, профессор Митрофанова О.В. (НИЯУ МИФИ)

доктор технических наук, ст. научн. Федотовский В.С. (ФГУП «ГНЦ РФ-сотр. ФЭИ»)

Ведущая организация: ФГУП ОКБ «ГИДРОПРЕСС» (г. Подольск)

Защита диссертации состоится 24 октября 2012 года в 14.00 на заседании диссертационного совета Д 212.141.08 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Лефортовская наб., д.1, корп. «Энергомашиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просьба высылать по адресу: 105005, Москва, 2-ая Бауманская ул., д.5, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.08

Автореферат разослан “___” _____ 2012 г.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1997084

Перевезенцев В.В. Случайные

Заместитель председателя
диссертационного совета

доктор технических наук, профессор

Солонин В.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Обеспечение надежности и безопасности эксплуатации ядерных реакторов в значительной степени связано с вибрационными процессами в элементах конструкции под воздействием потока теплоносителя. Одной из наиболее важных механических систем, определяющих безаварийную работу ядерных реакторов, являются тепловыделяющие сборки (ТВС). В ТВС со стержневыми тепловыделяющими элементами (ТВЭлами) их вибрации при продольном их обтекании турбулентным потоком теплоносителя приводят

- к циклическим изгибным деформациям оболочек ТВЭлов с возможностью образования и развития дефектов из-за коррозионно-усталостных процессов;

- к динамическому взаимодействию оболочек ТВЭлов с дистанционирующими решетками (ДР) и развитию фреттинг-износа, повреждению твердыми частицами (дебриз – износ) оболочек в зоне их контакта с пучковками ДР;

- к повышенным циклическим напряжениям в зоне крепления хвостовиков ТВЭлов в нижней опорной решетке, способствующим инициированию и дальнейшему развитию механического износа хвостовиков.

Для всестороннего обоснования надежности новых конструкций и долгосрочного прогнозирования поведения существующих ТВС необходим комплексный анализ вибрационных процессов, включающий стендовые исследования, расчетное моделирование и вибрационный контроль при пуско-наладочных испытаниях и в условиях эксплуатации.

ТВС ядерных реакторов с точки зрения их вибропрочности необходимо рассматривать как гидроупругую колебательную систему, состоящую из механической части и гидродинамической подсистемы. Сложный характер их взаимодействия, необходимость описания процессов формирования случайных гидродинамических нагрузок на обтекаемые поверхности, влияние характеристик потока на динамические свойства механической подсистемы и обуславливают отсутствие универсальных методик прогнозирования вибрационного поведения ТВС. В настоящее время наиболее изученной и поддающейся достаточно надежному расчетному анализу является механическая подсистема. Значительный вклад в разработку расчетных моделей напряженно-деформированного состояния конструкций ТВС внесли отечественные ученые Тутнов А.А., Данилов В.Л.. Однако эффекты взаимодействия турбулентного потока с ТВС как механической системой (случайные гидродинамические нагрузки на элементы конструкции, рассеяние энергии колебаний) изучены в существенно меньшей степени. Наиболее изученными являются процессы гидродинамического возбуждения вибраций при продольном обтекании, либо одиночных стержней, либо пучков стержней без учета их механической связи друг с другом за счет ДР. Конструктивные элементы ТВС перед пучком ТВЭлов (дрессельные шайбы, антидебризные фильтры, нижняя опорная решетка) и геометрия проточной части хвостовика

оказывают существенное влияние на осредненные и пульсационные характеристики потока на входе в пучок твэлов. На начальном гидродинамическом участке в пределах нескольких первых пролетов пучка твэлов происходит развитие всех характеристик потока и формирование установившегося течения. При этом условия гидродинамического нагружения пучка твэлов в зависимости от конструктивных особенностей области течения перед входом в пучок также оказываются различными при одинаковых расходах теплоносителя (скоростях течения) через ТВС.

Систематическое изучение структуры течения, его осредненных и пульсационных характеристик в проточных частях ядерных реакторов проводилось в работах М. С. Фомичева. Однако результаты выполненных экспериментальных исследований не могут быть использованы непосредственно для анализа процессов гидродинамического нагружения обтекаемых поверхностей (в частности, пучков твэлов ТВС) и возникающих при этом вибраций. В работах Патрашева А.Н. отмечается существенная роль крупных вихревых структур в процессах гидродинамического нагружения обтекаемых теплоносителем поверхностей. При этом показаны возможности и условия формирования таких структур (крупных вихрей) под днищем активной зоны на входе теплоносителя в ТВС. Федотовским В.С. выполнены теоретические и экспериментальные исследования влияния течения на динамические характеристики (собственные частоты и коэффициенты демпфирования колебаний) продольно обтекаемых одиночных стержней и пучков стержней. Однако, эффекты гидродинамического демпфирования колебаний отдельных стержней или пучков с ограниченным числом стержней не всегда могут быть использованы для расчета коэффициентов гидродинамического демпфирования пучков твэлов в ТВС.

В рамках традиционных представлений считается, что при изгибных деформациях стержневых систем реализуются дискретные их формы. При этом каждой форме соответствует собственная частота, а для определения абсолютных значений прогибов в любом сечении пучка достаточно знать его значение только в одном сечении. Указанные особенности проявляются при условиях, когда изгибные деформации сопровождаются поворотом сечения при отсутствии сдвиговых смещений между соседними сечениями. Такой механизм изгибных деформаций справедлив либо для отдельного стержня, либо для стержневых систем с высокой сдвиговой жесткостью. В то же время изгибные деформации стержневых систем при малой сдвиговой жесткости могут происходить с относительными смещениями сечений, величина которых пропорциональна действующим усилиям. В этом случае формы изгибных деформаций не соответствуют общепринятым представлениям в рамках модели балки Бернулли-Эйлера. Уровни виброперемещений пучка за счет сдвиговых смещений могут оказаться более высокими вблизи зоны крепления хвостовиков твэлов в нижней опорной решетке (т.е. на первых пролетах пучка) по сравнению с серединой пучка в условиях, когда случайные гидродинамические нагрузки вблизи нижней опорной решетки существенно превышают соответствующие значения вдали от нее. При реализации указанных

особенностей изгибных деформаций для получения полной картины распределения виброперемещений по длине пучка необходима информация о случайных гидродинамических нагрузках по всей длине пучка твэлов.

Таким образом, для комплексного обоснования вибрационного поведения новых и находящихся в эксплуатации ТВС в реакторных установках в условиях изменения с течением времени жесткостных и гидродинамических характеристик конструктивных элементов необходимы дальнейшие исследования процессов гидродинамического возбуждения вибраций ТВС. При этом особое внимание должно уделяться исследованиям влияния гидродинамики потока теплоносителя на возбуждение вибраций элементов (прежде всего, пучка твэлов) конструкции ТВС. Наиболее полная информация о вибрационном поведении ТВС может быть получена на основе сочетания теоретических исследований и экспериментальных методов получения отдельных параметров изучаемых процессов, а также необходимых для верификации теоретических моделей. Результаты экспериментальных исследований, полученные с использованием полномасштабных моделей ТВС при обеспечении идентичности их условий закрепления в реакторе и формировании одинаковых гидродинамических нагрузок, могут быть непосредственно использованы для анализа поведения при эксплуатации ТВС в реакторе.

Цели диссертационной работы состоят в следующем:

1. Исследование влияния осредненных и пульсационных характеристик (пульсаций давления) потока теплоносителя на вибрации пучков твэлов в ТВС реакторов ВВЭР в стендовых условиях при частичном моделировании условий воздействия турбулентного потока теплоносителя (температура, давление, акустические характеристики контура циркуляции).

2. Определение случайных гидродинамических нагрузок на пучки твэлов при различных условиях формирования гидродинамики потока на входе в пучок.

3. Исследование закономерностей распределения уровней гидродинамических нагрузок и их спектрального состава по длине пучка твэлов.

4. Разработка модели рассеяния энергии колебаний пучка твэлов в макронеподвижной жидкости и в турбулентном потоке теплоносителя и оценка соответствующих коэффициентов гидродинамического демпфирования

5. Изучение закономерностей формирования характеристик пульсаций давления на обтекаемых поверхностях и использование их для анализа вибраций пучка твэлов.

6. Выработка общих принципов уменьшения гидродинамического нагружения и, как следствие, снижения вибраций твэлов в ТВС ВВЭР.

Для достижения указанных целей необходимо проведение комплексных теоретических и экспериментальных исследований гидродинамических процессов возбуждения вибраций ТВС реакторов ВВЭР и **решение следующих задач**:

1. Провести экспериментальные исследования вибраций пучка твэлов (с использованием полномасштабных макетов ТВС ВВЭР-440) в турбулентном потоке воды при существенно различных осредненных (числа Рейнольдса до $7 \cdot 10^4$) и пульсационных (пульсационные числа Эйлера до $\sim 1,0$) характеристиках потока на входе в пучок. Определить динамические характеристики (собственные частоты, коэффициенты демпфирования) пучка в воздухе, макронеподвижной воде и при ее течении в широком диапазоне скоростей вплоть до всплытия макета ТВС.

2. Разработать модель баланса энергий подводимой к пучку и рассеиваемой при колебаниях пучка и на ее основе получить соотношение для обобщения экспериментальных данных по виброперемещениям пучка с использованием измеренных пульсаций давления на входе в пучок.

3. Определить воздействующие на пучок твэлов случайные гидродинамические нагрузки на основе результатов измерений пульсаций давления по периметру периферийного ряда пучка. Обобщить экспериментальные данные по виброперемещениям с использованием полученных данных по случайным гидродинамическим нагрузкам.

4. Разработать модель возбуждения вибраций пучков твэлов ТВС ВВЭР под действием случайных гидродинамических нагрузок, сформированных пульсациями давления в турбулентном потоке теплоносителя. На базе предложенной модели получить расчетные значения виброперемещений на начальном гидродинамическом участке вблизи нижней опорной решетки и в области установившегося течения теплоносителя в пучке.

5. Разработать механизм явлений диссипации энергии (демпфирования) колебаний пучка твэлов в макронеподвижной жидкости и при течении теплоносителя.

6. По результатам измерений пульсаций давления в области течения теплоносителя в ТВС (на внутренней поверхности хвостовика и чехла), а также распределений осредненной скорости в сечениях перед нижней опорной решеткой и в области пучка твэлов выявить особенности структуры потока, определяющие условия гидродинамического нагружения пучка твэлов. На основе полученных результатов сформулировать требования к структурным характеристикам потока теплоносителя, обеспечивающим снижение случайных гидродинамических нагрузок на пучки твэлов ТВС реакторов типа ВВЭР.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Впервые показано качественное и количественное влияние гидродинамических пульсаций давления в турбулентном потоке теплоносителя на вибрационные процессы в ТВС при продольном обтекании пучка твэлов. Скорость течения не определяют однозначно условия гидродинамического нагружения и характеристики вибраций пучка твэлов. На основе классических представлений о турбулентных течениях показана связь между пульсациями давления в любом сечении в каналах за решетками и такими характеристиками потока как статическое давление, осредненная и пульсационная скорости в том же сечении. С использованием баланса пульсационной энергии в турбулентном потоке получено соотношение, описывающее распределение

среднеквадратичных значений пульсаций давления при турбулентном течении в каналах за решетками или дроссельными шайбами.

2. На основе баланса подводимой к пучку твэлов пульсационной энергии потока и рассеиваемой при механических колебаниях пучка энергии получено соотношение, для оценки среднеквадратичных значений виброперемещений, позволяющее обобщить экспериментальных данные по виброперемещениям пучков твэлов.

3. С использованием измеренных мгновенных значений пульсаций давления по периметру внешнего ряда твэлов пучка получены случайные гидродинамические нагрузки при различных условиях по гидродинамике потока на входе в пучок. В широком диапазоне чисел Рейнольдса до $7 \cdot 10^4$ в пучке твэлов и пульсационных чисел Эйлера до $\sim 1,0$ определены среднеквадратичные значения и спектральные характеристики случайных гидродинамических нагрузок.

4. На базе представлений механической модели пучка твэлов как балки с низкой сдвиговой жесткостью (балки Тимошенко С.П.) разработана математическая модель, описывающая виброперемещения пучка твэлов под воздействием случайных гидродинамических нагрузок и согласующаяся с экспериментальными данными.

5. Разработана методика обобщения экспериментальных данных по виброперемещениям пучка твэлов в зависимости от воздействующих на него случайных гидродинамических нагрузок, основанная на известных аналитических соотношениях для прогиба балки, нагруженной распределенной по ее длине статической нагрузкой. Обнаружены две характерные области влияния случайных гидродинамических нагрузок на уровни виброперемещений.

6. Предложена модель гидродинамического демпфирования колебаний пучка твэлов в макронеподвижной жидкости, в соответствии с которой совершаемая при колебаниях пучка работа затрачивается на перераспределение вязкой жидкости по периметру внешнего ряда твэлов. Полученные расчетные значения коэффициентов демпфирования колебаний согласуются с экспериментальными данными. Оценка влияния продольного течения жидкости в ТВС на эффекты диссипации энергии колебаний выполнена также в рамках созданной модели с введением зависящей от скорости течения турбулентной вязкости вместо молекулярной для макронеподвижной жидкости.

Практическая ценность заключается в следующем:

1. Результаты комплексного исследования гидродинамически возбуждаемых вибраций позволили показать, что проблемы снижения интенсивности вибраций должны решаться не только путем совершенствования механической части гидроупругой системы, т.е. конструкции ТВС, но и правильной организацией течения в трактах подвода теплоносителя к пучку твэлов.

2. Экспериментальные данные по вибрационным характеристикам пучков твэлов полномасштабных макетов ТВС ВВЭР-440 в широких диапазонах скоростей течения воды вплоть до всплытия макета в восходящем потоке

теплоносителя используются на отраслевых предприятиях ОКБ "Гидропресс", ОАО "Машиностроительный завод", ОАО "ТВЭЛ" и концерна "Росэнергоатом" для анализа поведения ТВС ВВЭР-440 в реакторных условиях, и при обосновании возможности продления сроков эксплуатации истерпевших назначенные сроки службы блоков АЭС.

3. Полученные по измеренным пульсациям давления в ТВС ВВЭР-440 случайные гидродинамические нагрузки позволяют расчетным путем оценить прогибы пучка твэлов и других конструкций ТВС ВВЭР (ТВС-2М, УТВС, ТВСА, РК-3) при возбуждаемых турбулентным потоком теплоносителя колебаниях. На основе полученных данных по пульсациям давления и случайным гидродинамическим нагрузкам показана роль конструктивных элементов (дрессельные шайбы, антидебризные фильтры и др.) на входе в пучок твэлов в формировании структуры осредненного течения и пульсационных характеристик потока и их влиянии на вибрационные процессы.

4. Получены необходимые для расчетных анализов вибраций количественные данные по динамическим свойствам (собственным частотам, присоединенным массам, эффектам демпфирования) пучка твэлов в воздухе, макронеподвижной жидкости и при течении воды в ТВС.

5. Разработанная модель вибрационного поведения пучка твэлов на основе представлений балки с низкой сдвиговой жесткостью (балки Тимошенко С.П.), и полученные повышенные уровни гидродинамических сил на начальном гидродинамическом участке течения теплоносителя позволили впервые показать возможность возникновения более интенсивных вибраций в пределах первых нескольких пролетов пучка по сравнению с его серединой.

6. Полученные в экспериментах с высокой турбулизацией потока на входе в ТВС и подтвержденные расчетным анализом более высокие уровни виброперемещений в сечениях пучка вблизи нижней опорной решетки по сравнению с соответствующими значениями в середине пучка объясняют наблюдавшуюся на ряде блоков АЭС с ВВЭР-440 массовую разгерметизацию твэлов именно на первых трех пролетах пучка.

7. Установленные в результате теоретических анализов и комплексных экспериментальных исследований закономерности возбуждаемых турбулентным потоком теплоносителя вибраций пучка твэлов переданы в отраслевые предприятия Росатома (ОАО "Машиностроительный завод", г. Электросталь, ЗАО "Диапром", концерн "Росэнергоатом", ОАО "ТВЭЛ" и ОАО "ВНИИАЭС") и используются для дальнейшего совершенствования конструкций ТВС ВВЭР, а также организации рациональной гидродинамики потока на входе в ТВС с целью снижения воздействующих на пучок твэлов случайных гидродинамических нагрузок.

8. Методики и результаты комплексных экспериментальных исследований вибраций твэл в ТВС ВВЭР используются в лабораторном практикуме в курсах "Расчет и проектирование реакторных установок" и Конструирование реакторных установок" для студентов кафедры "Ядерные реакторы и установки" МГТУ им. Н.Э. Баумана.

На защиту выносятся

1. Результаты комплексных экспериментальных исследований гидродинамически возбуждаемых вибраций в ТВС ВВЭР. Выявленные особенности распределения изгибных деформаций по длине пучка твэлов, заключающиеся в соизмеримых или даже более высоких уровнях его виброперемещений на начальном гидродинамическом участке вблизи нижней опорной решетки по сравнению с серединой пучка в условиях высокой турбулизации потока на входе в ТВС.

2. Модель баланса подводимой к пучку пульсационной энергии и рассеиваемой при колебаниях пучка твэлов механической энергии, на базе которой получено соотношение для определения виброперемещений пучка твэлов по данным о пульсациях давления в турбулентном потоке теплоносителя на входе в пучок твэлов.

3. Методика и результаты определения случайных гидродинамических нагрузок по экспериментальным данным о пульсациях давления на внутренней поверхности шестигранного чехла с возможностью распространения этой методики на бесчехловые ТВС.

4. Модель возбуждения вибраций пучка на базе его описания как балки с низкой сдвиговой жесткостью (балки Тимошенко С.П.) при воздействии случайных гидродинамических нагрузок на внешний ряд твэлов пучка. Результаты расчетного определения виброперемещений пучка твэлов в широком диапазоне скоростей течения теплоносителя в ТВС (вплоть до всплывтия в восходящем потоке теплоносителя) и различных условиях по структуре потока на входе в пучок твэлов.

5. Результаты обобщения экспериментальных данных по виброперемещениям твэлов в ТВС ВВЭР-440 в зависимости от уровней случайных гидродинамических нагрузок и их использование для оценок интенсивности вибраций твэлов для других конструкций ТВС ВВЭР (ТВС- 2М, УТВС, ТВСА, РК-3).

6. Модель гидродинамического демпфирования колебаний пучка твэлов в макронеподвижной жидкости и при течении теплоносителя, основанная на определении затрат энергии механических колебаний на перераспределение жидкости по периметру внешнего ряда твэлов пучка.

Апробация работы

Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на: Отраслевой конференции "Гидродинамика и безопасность АЭС" (Теплофизика-99), Обнинск, 28-30 сентября 1999 г.; Международном совещании по перспективам реакторов ВВЭР "Technical innovations for next century", Чехия, Прага, 17-20 апреля 2000 г.; Отраслевом семинаре "Фундаментальные исследования по гидродинамике ЯЭУ", Обнинск, сентябрь 2000 г.; Пятой Международной конференции по проблемам колебаний, Москва, 8-10 октября 2001 г.; Отраслевой конференции "Теплогидравлические коды для энергетических реакторов (разработка и верификация). Теплофизические аспекты безопасности АЭС" (Теплофизика-2001), Обнинск, 29-31 мая 2001 г.; Седьмой, одиннадцатой и двенадцатой Международных конференциях

"Безопасность АЭС и подготовка кадров", Обнинск, 8-11 октября 2001 г., 29 сентября- 2 октября 2009 г. и 4-7 октября 2011 г.; Третьей международной научно-технической конференции "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР", Подольск, 26-30 мая 2003 г.; Международном симпозиуме "Образование через науку", Москва, МГТУ им.Н.Э.Баумана, 16-19 мая 2005 г.; Всероссийском семинаре "Динамика конструкций гидроупругих систем. Численные методы", ИМАШ РАН, Москва, 16-17 апреля 2008 г.; Межведомственном семинаре "Теплогидравлические аспекты безопасности активных зон, охлаждаемых водой и жидкими металлами" (Теплофизика-2008), Обнинск, 15-17 октября 2008 г., а также на научно-технических семинарах кафедры "Ядерные реакторы и установки" МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 40 работ, в том числе 15 в журналах из Перечня ВАК и одна монография Пристеночные пульсации давления при турбулентном течении газа в каналах/ В.В.Перевезенцев [и др.]. М.: Изд-во МГТУ 1992. 96 с.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, шести глав, списка литературы, включающего 118 работ. Работа содержит 289 страниц, 45 иллюстраций, 5 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность проблемы обоснования надежности ТВС ядерных реакторов, связанной с вибрационными процессами. Приведены факты разгерметизации оболочек твэлов, наблюдавшиеся при эксплуатации реакторов ВВЭР-440, вызванные интенсивными вибрациями пучка твэлов в турбулентном продольном потоке теплоносителя. При этом износ оболочек твэлов происходил, в основном, в зоне контактов с несколькими первыми ДР от нижней опорной решетки. В удаленной от входа области пучка твэлов такие дефекты практически отсутствовали. Для снижения вибронегативности ТВС были предприняты меры для уменьшения расхода теплоносителя через реактор. Кроме того, за счет ряда конструктивных решений предпринимались меры по увеличению жесткости конструкции ТВС.

В целом проводимые исследования в области гидродинамического нагружения ТВС, вибрационных процессов под действием турбулентного потока теплоносителя не отличались систематичностью, недостаточное внимание уделялось изучению взаимодействия потока с обтекаемыми поверхностями. Конструктивные решения, направленные на повышение жесткости конструкции, принимались, как правило, без учета влияния гидродинамических характеристик течения на свойства механической системы. Это свидетельствует о том, что ТВС в потоке теплоносителя не рассматривалась как единая гидроупругая система.

В первой главе кратко рассмотрены основные результаты теоретических и экспериментальных исследований гидродинамически возбуждаемых вибраций стержней и пучков стержней в продольном турбулентном потоке.

Показано, что экспериментальные исследования ограничиваются, в основном, использованием моделей пучков с ограниченным количеством стержней и без воспроизведения реальных условий их дистанционирования. При этом характеристики осредненного и пульсационного течения на входе в пучок твэлов натуральных ТВС также не моделируются. Конструкционное демпфирование колебаний модельных пучков существенно отличается от реализуемых в натуральных условиях колебательных процессов в ТВС.

Результаты экспериментальных исследований обобщаются с использованием безразмерных критериев, полученных на основе анализа уравнений, описывающих как движение жидкости, так и колебания обтекаемых стержней. Расчетные оценки уровней вибраций по эмпирическим зависимостям отличаются на несколько порядков. Влияние степени турбулизации потока непосредственно учитывается только в одном соотношении (Paidoussis M.P.) в виде численного коэффициента, увеличивающего в 5 раз интенсивность вибраций в высокотурбулизированном потоке. В большинстве теоретических моделей не учитывается влияние скорости течения на эффекты демпфирования колебаний.

Одной из наиболее удачных теоретических моделей возбуждения вибраций стержня при его обтекании продольным турбулентным потоком жидкости является модель Reavis J.R., которая была в дальнейшем развита в работах Chen Y.N. и Wambsgans M.W., Gorman D.J. В предположении, что колебания стержня происходят под действием распределенной по длине случайной нагрузки и реализуется первая основная форма колебаний, получено выражение для среднеквадратичной амплитуды изгибных виброперемещений в середине стержня. Для практического использования полученных соотношений необходимо иметь данные о пульсациях давления на поверхности стержня. Наиболее подробная экспериментальная информация по статистическим характеристикам полей пульсаций давления на поверхности цилиндрического стержня в четырехугольной упаковке при продольном обтекании турбулентным потоком воды получена Curling L.R. и Paidoussis M.P. Данные по распределениям пульсаций давления в узком диапазоне частот 10...50 Гц по периметру и длине стержня использованы для характеристики случайных гидродинамических нагрузок. Характерно, что измерялась непосредственно разность мгновенных значений пульсаций давления в одном сечении цилиндра на его противоположных образующих. Именно эта разность и определяет уровни случайных гидродинамических нагрузок на цилиндр в заданном направлении. При этом нормированные на динамический напор значения разности пульсаций давления не превышают 3% и уменьшаются с ростом скорости потока.

Таким образом, для анализа процессов гидродинамического нагружения ТВС необходимы подробные сведения о характеристиках пульсаций давления по тракту движения теплоносителя, включая непосредственно проточную часть ТВС. Измерения пульсаций давления проводились при проведении пусконаладочных работ на реакторах ВВЭР-440 на 1 и 2 блоках КолАЭС, а также на 3 и 4 блоках НВАЭС. Датчики пульсаций давления размещались по

всему тракту движения теплоносителя от входных патрубков до днища шахты и камеры защитных труб. Установлено, что уровни пульсаций давления напротив входного патрубка достигают значений от 7 кПа (1 блок КолАЭС) до 20 кПа (3 и 4 блоки НВАЭС) в диапазоне частот 5...10 Гц при скорости воды во входных патрубках около 10 м/с. Наибольшая нестабильность потока с образованием крупномасштабных вихревых структур наблюдалась в районе днища шахты. Так на первом блоке КолАЭС уровни пульсаций давления в районе плоского днища шахты достигали 40 кПа с характерными частотами 1,5- и 10 Гц. Для устранения условий формирования крупных вихрей и значительной неравномерности поля скоростей теплоносителя на входе в активную зону в последующих проектах ВВЭР-440 в нижней камере была установлена перфорированная эллиптическая решетка. Непосредственно на входе и в области пучка твэлов измерения пульсаций давления при пусконаладочных испытаниях не проводились.

В целом, исследования гидродинамически возбуждаемых вибраций в ТВС водоохлаждаемых реакторов характеризуются достаточно большим объемом измерений собственно вибрационных характеристик и недостаточным количеством данных по влиянию гидродинамики потока на вибрационные процессы. В заключение первой главы на основе анализа ранее выполненных исследований гидродинамически возбуждаемых вибраций в ТВС сформулированы основные цели и задачи диссертационной работы.

Во второй главе установлены общие закономерности формирования полей пульсаций давления в турбулентном потоке и их развития на начальном гидродинамическом участке за решетками. Необходимость понимания таких закономерностей обусловлена определяющей ролью пульсаций давления в формировании случайных гидродинамических нагрузок на пучки твэлов и другие элементы конструкции ТВС.

Используя соотношения для полного давления в турбулентном потоке в некоторой точке области течения в виде суммы статического и динамического давлений

$$P = P_{cm} + p_d = P_{cm} + \rho \cdot (U + u')^2 / 2 \quad (1)$$

и в виде суммы осредненной и пульсационной составляющих

$$P = \bar{P} + p', \quad (2)$$

получена зависимость для распределения среднеквадратичных значений пульсаций давления по длине канала

$$\langle p'^2 \rangle^{1/2} / \langle p_\infty'^2 \rangle^{1/2} = \frac{2\sqrt{3}}{Tu_\infty^2} \cdot \frac{\langle u_z'^2 \rangle^{1/2}}{\langle u_\infty'^2 \rangle^{1/2}} \cdot \sqrt{\frac{P_{cm,z}}{\rho \cdot V_\infty^2 / 2} + 3 \cdot \frac{V_z^2}{V_\infty^2}}. \quad (3)$$

Полученное соотношение отражает связь пульсаций давления с осредненными скоростями потока, статическим давлением и уровнем пульсаций скорости. Из (3) следует, что пульсации давления в потоке в значительной

степени определяются структурой осредненного и пульсационного течения. Результаты измерений пристеночных пульсаций давления в круглой трубе за входными решетками согласуются с расчетом по (3) с использованием экспериментальных данных по осредненным и пульсационным скоростям и распределению статического давления.

Для анализа процесса развития пульсаций давления в турбулентном потоке после возмущающего воздействия различных конструктивных элементов (входные решетки, дроссельные шайбы, антидебризные фильтры и т.д.) разработана модель, основанная на балансе пульсационной энергии в заданном сечении канала. Энергия турбулентных пульсаций в любой точке за входной решеткой складывается из энергии пульсаций перед решеткой E_0 , доли потерь энергии осредненного течения собственно на решетке, преобразующихся в энергию турбулентных пульсаций, и, наконец, вклада процесса диссипации энергии турбулентности в потоке до заданного сечения канала

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (\bar{u}'^2 + \bar{v}'^2 + \bar{w}'^2) = E_0 + k \cdot \Delta P_0 - \rho \cdot \int_0^x \varepsilon \cdot dz / V, \quad (4)$$

где u', v', w' - мгновенные значения пульсационных скоростей по направлениям z, x, y ; ε - скорость диссипации энергии турбулентности; ΔP_0 - потери статического давления на входной решетке; k - доля потерь энергии осредненного течения на решетке, трансформирующуюся в пульсационную энергию.

В приближении однородной изотропной турбулентности с учетом пропорциональности пульсаций давления на стенке канала уровню энергии пульсаций скорости $\langle p'^2 \rangle^{1/2} \sim \rho \langle u'^2 \rangle$, получено выражение для обобщения экспериментальных данных по продольному распределению среднеквадратичных значений пристеночных пульсаций давления в турбулентном потоке за входными решетками:

$$\langle p_z'^2 \rangle^{1/2} / \langle p_\infty'^2 \rangle^{1/2} = 1 + C \cdot \xi_p \cdot \frac{P_d}{\langle p_\infty'^2 \rangle^{1/2}} \cdot \exp \left[-A \frac{z}{V \cdot D^2 / (10 \cdot \nu)} \right], \quad (5)$$

ξ_p - коэффициент гидравлического сопротивления входной решетки;

Результаты обработки экспериментальных данных по пристеночным пульсациям давления при турбулентном течении воздуха в канале круглого сечения диаметром 50 мм за решетками – перфорированными дисками с круглыми отверстиями показывают, что при $A = 8300$ и $C = 0,018$ предложенная модель хорошо описывает экспериментальные данные (рис. 1).

В третьей главе приведено описание гидродинамического стенда, измерительных средств, методик проведения экспериментальных исследований вибрационных процессов в ТВС ВВЭР под воздействием турбулентного потока воды с использованием полномасштабных макетов. Представлены характеристики датчиков для измерения пульсаций давления на внутренних

поверхностях хвостовика и шестигранного чехла макета ТВС; вибрации твэлов измерялись с помощью двухкомпонентных пьезорезистивных

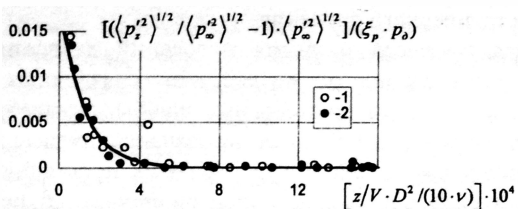


Рис.1. Обобщение экспериментальных данных по продольному распределению пульсаций давления на стенке круглой трубы при турбулентном течении воздуха за решетками: 1- решетка с пористостью 0,26; 2- решетка с пористостью 0,39

виброакселерометров с выходом сигнала либо по виброускорениям, либо по виброперемещениям. В последнем случае в составе измерительных каналов имелись аналоговые интегрирующие усилители. Изложены методики проведения экспериментов, обработки экспериментальных данных; приведены оценки погрешностей результатов экспериментальных исследований.

Стендовые испытания полномасштабных макетов ТВС ВВЭР-440 с воспроизведением реакторных условий их закрепления проводились на гидродинамическом стенде – замкнутом циркуляционном контуре с вынужденной циркуляцией воды с температурой 10...50 °С и давлением до 0,3 МПа при объемных расходах до 223 м³/ч (скорости течения в пучке твэлов до 7 м/с, числа Рейнольдса до 7·10⁴). Для изменения гидродинамической структуры потока теплоносителя на входе в хвостовик устанавливались различные входные устройств – дроссельные шайбы, антидебризные фильтры и т.д.

Пьезорезистивные виброакселерометры устанавливались и фиксировались внутри твэльной трубки в заданном сечении пучка твэлов. Пьезорезистивные виброакселерометры в составе измерительных каналов с интегрирующими усилителями позволяют получать экспериментальные данные по виброперемещениям в частотном диапазоне более 1,5 Гц с разрешающей способностью в несколько микрометров. Измерительные каналы с пьезорезистивными виброакселерометрами и интегрирующими усилителями обеспечивают измерения абсолютных виброперемещений в двух диапазонах ±500 мкм и ±2000 мкм в интервале частот 1,5...200 Гц.

Для измерения пульсаций давления на внутренней поверхности хвостовика перед опорной решеткой и на внутренней поверхности чехла выполнены отборы давления, соединенные импульсными линиями малого диаметра (2,5 мм) и длиной не более 0,5 м с пьезорезистивными датчиками пульсаций давления. Перед опорной решеткой пульсации давления измерялись на внутренней поверхности конической части хвостовика. В области пучка твэлов пульсации давления измерялись в пяти сечениях по длине на внутренней поверхности чехла. Впервые в практике экспериментальных

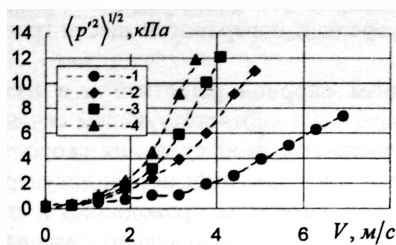
исследований для идентификации условий гидродинамического нагружения пучка твэлов проводились одновременные измерения пульсаций давления в одном сечении по периметру пучка на внутренней поверхности шести граней чехла.

Распределения скорости воды перед нижней опорной решеткой и в пучке твэлов измерялись с помощью перемещающегося в соответствующем сечении плоского зонда. Перед нижней опорной решеткой распределения скоростей были получены на расстоянии 7,5 мм до нее в направлении перпендикулярно граням чехла. Непосредственно в пучке твэлов измерения проводились в двух сечениях в пределах первого пролета в направлении параллельно диагонали нижней опорной решетки на расстоянии 38 мм и 106 мм от выходного торца нижней опорной решетки. Измерения выполнены в условиях формирования структуры течения дроссельными шайбами, коническим антидебризным фильтром и их совместном влиянии.

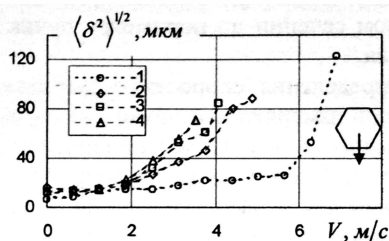
Автоматизация процесса управления ходом эксперимента, контроля параметров и сбора данных осуществлялась посредством специализированного программного обеспечения, составленного в среде разработки приложений LabVIEW фирмы National Instruments. Определение статистических характеристик случайных процессов вибраций и пульсаций давления осуществлялось с использованием пакета комплексного анализа временных рядов WING, разработанного в ЗАО "Диапром". С учетом дополнительных погрешностей, обусловленных неточностью установки направлений измерительных осей, влиянием поперечных составляющих сигнала погрешность измерений виброперемещений в частотном диапазоне 1,5...200 Гц оценивается в 10...12% от текущего значения параметра. Погрешность измерений пульсаций давления пьезорезистивными датчиками с учетом влияния импульсных линий составляет 15%.

В четвертой главе: на основе экспериментальных данных по вибрационным характеристикам твэлов в ТВС ВВЭР и пульсациям давления показана роль гидродинамики турбулентного потока на входе и в области пучка твэлов на вибрационные процессы. Показано качественное соответствие интенсивности вибраций уровням пульсаций давления на входе в пучок (рис. 2). Результаты экспериментов свидетельствуют о неоднозначной связи вибраций только с осредненными характеристиками турбулентного потока. В частности, скорость течения не может служить единственной гидродинамической характеристикой, определяющей амплитуды вибраций твэлов. Из рис. 2 видно, что интенсивность вибраций определяется не только скоростью течения в пучке, но и существенно зависит от пульсационных характеристик потока.

Для анализа роли пульсаций давления в возбуждении вибраций твэлов в турбулентном потоке теплоносителя разработана энергетическая модель этого процесса. Модель основана на представлениях о балансе подводимой к пучку пульсационной гидродинамической энергии и расходуемой механической энергии при колебаниях пучка твэлов в стационарных условиях.



а



б

Рис. 2. Зависимости среднеквадратичных значений пульсаций давления перед нижней опорной решеткой ($z = -109$ мм) (а) и виброперемещений пучка твэлов в направлении перпендикулярном грани в сечении $z=72$ мм (б) от скорости течения V при различных гидродинамических условиях на входе в ТВС: 1 - невозмущенный турбулентный поток; 2- дроссельная шайба 52 мм; 3- 48,5 мм; 4- 45 мм

В первом приближении можно считать, что диссипация механической энергии связана с колебаниями пучка твэлов по первой форме, для которой поперечные виброперемещения при условиях шарнирного закрепления концов описываются выражением

$$y(z, \tau) = y_0 \cdot \sin\left(\frac{\pi z}{l}\right) \sin(2\pi f_0 \tau), \quad (6)$$

где y_0 - амплитуда виброперемещений; f_0 - собственная частота колебаний пучка твэлов по первой форме.

При смещении участка dz пучка твэлов на величину dy при вибрации происходит рассеяние энергии в количестве

$$dE_{\text{дисс}} = f_{\text{дисс}}(z, \tau) \cdot dz \cdot dy. \quad (7)$$

Независимо от природы процессов рассеяния энергии при вибрациях сила сопротивления колебаниям может быть представлена в виде

$$f_{\text{дисс}}(z, \tau) = 2f_0 \cdot \Delta(V) \cdot M \cdot \partial y(z, \tau) / \partial \tau, \quad (8)$$

где $\Delta(V)$, M - логарифмический декремент колебаний и полная (с учетом присоединенной массы жидкости) масса на единицу длины пучка твэлов.

Тогда за период времени $T = 1/f_0$ средняя мощность диссипативных сил при вибрациях пучка твэлов длиной l с учетом (6), (8) составит

$$\langle N_{\text{дисс}} \rangle = \frac{\int_0^T \int_0^l dE}{T} = f_0 \cdot \int_0^T \int_0^l dE = 2\pi^2 \Delta(V) M \langle y_0^2 \rangle f_0^3 l. \quad (9)$$

Подвод энергии от потока теплоносителя к пучку твэлов обусловлен переносом пульсационной энергии вдоль их боковой поверхности. Пульсации давления $p' \sim \rho \cdot u'^2/2$ характеризуют объемную удельную пульсационную энергию потока теплоносителя. При объемном расходе теплоносителя Q в единицу времени к пучку твэлов подводится пульсационная энергия

$$N_{зудр}(z=0) = Q \cdot \langle p'^2(z=0, f) \rangle^{1/2}, \quad (10)$$

где $\langle p'^2(z=0, f) \rangle^{1/2}$ - среднеквадратичные значения пульсаций давления в частотном диапазоне от 0 до f на входе в пучок твэлов.

Пульсационная энергия распределяется по боковой поверхности внешнего ряда твэлов и расходуется на возбуждение и поддержание изгибных колебаний пучка в целом. Тогда подводимая к пучку твэлов за счет гидродинамических сил мощность может быть представлена в виде

$$\langle N_{воз} \rangle = q \cdot S_{бок} \sim V \cdot P \cdot l \cdot \langle p'^2(z=0, f) \rangle^{1/2}, \quad (11)$$

где $q = N_{зудр}/F_{np}$ - плотность потока пульсационной энергии; F_{np} - площадь проходного сечения пучка твэлов; $S_{бок} \cdot P$ - площадь боковой поверхности внешнего ряда пучка твэлов и его периметр соответственно.

Часть мощности гидродинамических сил затрачивается на возбуждение вибрационных процессов в пучке твэлов, и, следовательно, в условиях стационарных процессов вибраций должен сохраняться баланс подводимой и расходуемой энергии:

$$\langle N_{диск} \rangle = C \cdot \langle N_{воз} \rangle, \quad (12)$$

Из (12) следует соотношение для оценки (с точностью до постоянной C) среднеквадратичных значений виброперемещений по первой форме колебаний в середине пучка твэлов

$$\langle y_0^2 \rangle^{1/2} = \sqrt{\frac{C \cdot V \cdot P \cdot \langle p'^2(z=0, f) \rangle^{1/2}}{2\pi^2 \cdot \Delta(V) \cdot M \cdot f_0^3}}. \quad (13)$$

Экспериментальные значения виброперемещений пучка твэлов по первой форме колебаний определялись путем цифровой фильтрации сигналов виброакселерометров в окрестности собственной частоты f_0 колебаний пучка. Следует отметить, что при заданной форме колебаний для восстановления уровней прогибов пучка по всей его длине достаточно знать значения виброперемещений в любом сечении пучка твэлов. Поэтому разработанная модель может быть проверена по экспериментальным данным о виброперемещениях в любом сечении пучка твэлов. При значении постоянной $C = 1,5 \cdot 10^{-2}$, характеризующей долю энергии пульсаций давления, расходуемой на возбуждение и поддержание вибраций пучка твэлов, расчет

удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными по виброперемещениям в сечении $z = 72 \text{ мм}$. Таким образом, предложенная энергетическая модель наглядно показывает определяющее влияние пульсаций давления на интенсивность вибраций обтекаемых поверхностей и, в частности, пучка твэлов ТВС.

В пятой главе на основе измерений пульсаций давления по периметру внешнего ряда твэлов пучка в одном сечении получены экспериментальные данные по случайным гидродинамическим нагрузкам при различной структуре осредненного и пульсационного течения на входе в пучок. Воздействующие на внешний ряд твэлов пульсации давления, в основном, и формируют случайные гидродинамические нагрузки на пучок в целом. В свою очередь, указанные случайные гидродинамические нагрузки определяют вибрационные процессы твэлов в ТВС. Случайные гидродинамические нагрузки получены по измерениям пульсаций давления на внутренней поверхности чехла макета ТВС ВВЭР-440. В соответствие 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 внешнего ряда твэлов пучка

$$\vec{f}_g(z, \tau) = - \int_P p'(z, P, \tau) \cdot \vec{n} \cdot dP, \quad (14)$$

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

Практически компоненты случайной гидродинамической силы в двух взаимно перпендикулярных направлениях x и y определялась по одновременно измеренным мгновенным значениям пульсаций давления на внутренней поверхности шести граней чехла ТВС (рис. 3)

$$\begin{aligned} f_{g_x}(z, \tau) &= \sum_{i=1}^6 p'(z, \tau) \cdot \cos \varphi_i \cdot a; \\ f_{g_y}(z, \tau) &= \sum_{i=1}^6 p'(z, \tau) \cdot \sin \varphi_i \cdot a \end{aligned}, \quad (15)$$

где a – ширина грани внешнего ряда твэлов; φ_i - угол между направлением x и нормалью к поверхности грани внешнего ряда твэлов.

Представленные на рис. 4 результаты определения в соответствие с (15) одной из компонент случайных гидродинамических сил (среднеквадратичные значения) свидетельствуют о существенном влиянии на них структуры турбулентного потока теплоносителя на входе в ТВС. Возмущающее воздействие дроссельных шайб на течение теплоносителя заключается в формировании крупномасштабных вихревых структур в пристеночной области цилиндрической части хвостовика. Образующиеся за дроссельными шайбами

различных диаметров вихри в пристеночной области и струйное течение с разными скоростями в центральной области определяют существенные отличия в интенсивности и спектральном составе пульсаций давления в пучке твэлов и, как следствие, разные действующие на пучок случайные

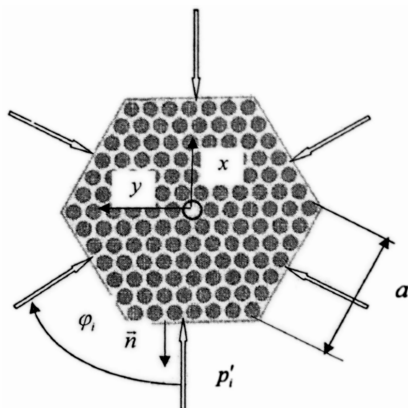


Рис. 3. Схема определения действующих на пучок твэлов случайных гидродинамических нагрузок по одновременно измеренным мгновенным значениям пульсаций давления на внутренней поверхности шестигранного чехла ТБС

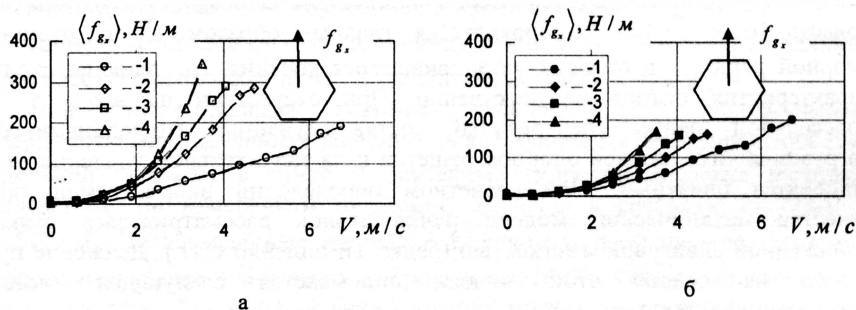


Рис. 4. Зависимость среднеквадратичных значений гидродинамических сил в направлении перпендикулярно грани пучка от скорости течения воды в пучке на начальном гидродинамическом участке $z = 72 \text{ мм}$ (а) и в области установившегося течения $z = 1527 \text{ мм}$ (б) для различных условий формирования структуры потока на входе в ТБС: 1- невозмущенное турбулентное течение (без дроссельной шайбы на входе в ТБС); 2- дроссельная шайба 52 мм; 3- 48,5 мм; 4- 45 мм

гидродинамические нагрузки. При одинаковых скоростях потока воды в пучке наибольшие 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. Возмущающее воздействие проявляется тем дальше вдоль пучка, чем меньше диаметр дроссельной шайбы.

В спектрах гидродинамических нагрузок можно выделить две характерные области резонансных увеличений спектральных плотностей (рис. 5). Низкочастотная область $f < 100$ Гц проявляется только на начальном

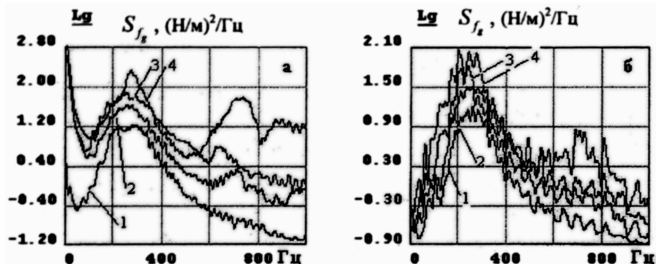


Рис. 5. Спектры гидродинамических сил, воздействующих на пучок в сечениях $z = 72$ мм (а) и $z = 1527$ мм (б) для различных условий формирования структуры потока на входе в ТВС при скорости воды в пучке 3,14 м/с: 1- невозмущенное турбулентное течение (без дроссельной шайбы на входе в ТВС); 2- дроссельная шайба 52 мм; 3 - дроссельная шайба 48,5 мм; 4-дроссельная шайба 45 мм

гидродинамическом участке при формировании вихревой структуры потока входными устройствами (например, дроссельными шайбами). Высокочастотная область $100 < f < 400$ Гц проявляется, главным образом, вдали от нижней опорной решетки в области установившегося течения, где влияние входных характеристик потока не существенно. При отсутствии на входе в ТВС дроссельной шайбы спектральный состав случайных гидродинамических нагрузок вблизи нижней опорной решетки и на значительном удалении от нее становятся близкими. При расчетном определении виброперемещений в качестве механической модели пучка твэлов рассматривалась балка с пониженной сдвиговой жесткостью (балка Тимошенко С.П.). Движение пучка твэлов на основе этой модели описывается следующей системой дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} \frac{\partial \delta}{\partial z} &= -\vartheta + \frac{Q}{GA_{\varphi}} \\ \frac{\partial \vartheta}{\partial z} &= \frac{M}{EJ} \\ \frac{\partial Q}{\partial z} &= -f_g \\ \frac{\partial M}{\partial z} &= Q \end{aligned} \quad (16)$$

где δ – поперечное перемещение; ϑ – поворот сечения; Q – внутренняя поперечная сила; M – внутренний изгибающий момент; f_g – внешняя поперечная распределенная нагрузка с учетом распределенных сил инерции; GA_{φ} – жесткость сечения на сдвиг; EJ – жесткость сечения на изгиб.

Все величины в системе (16) представляются в виде разложения в тригонометрические ряды, а решение задачи сводится к интегрированию по времени системы обыкновенных дифференциальных уравнений для коэффициентов разложения функции прогибов δ_k

$$\left(\frac{\left(\frac{k\pi}{L} \right)^4 EJ}{\frac{EJ}{GA_{\varphi}} \left(\frac{k\pi}{L} \right)^2 + 1} - v^2 \alpha \rho A \left(\frac{k\pi}{L} \right)^2 \right) \delta_k + (n m_T + \alpha \rho A) \frac{d^2 \delta_k}{dt^2} + \zeta \frac{d \delta_k}{dt} + 2 v \alpha \rho A \sum_j B_{kj} \left(\frac{j\pi}{L} \right) \frac{d \delta_j}{dt} = f_{\{k\}}$$

где $B_{kj} = \begin{cases} \frac{4k}{\pi(k^2 - j^2)}, & (k+j) = 2m+1 \\ 0, & (k+j) = 2m \end{cases}$; V – скорость осевого потока

жидкости; ρ – плотность жидкости; A – площадь сечения жидкости вытесненного пучком; α – коэффициент присоединенной массы (т.е. $\alpha \rho A$ – присоединенная масса жидкости на единицу длины); m_T – удельная на единицу длины масса одного твэла (кг/м), n – количество твэлов в пучке

При интегрировании системы уравнений (17) использовалась экспериментально полученная зависимость коэффициента демпфирования ζ от продольной скорости в пучке и случайные гидродинамические нагрузки, определенные по измерениям пульсаций давления в сечениях $z=72\text{ мм}$ и $z=1527\text{ мм}$. Представленные на рис. 6 результаты расчетов согласуются с экспериментальными значениями виброперемещений пучка твэлов в области первого пролета. Для условий формирования потока дроссельными шайбами характерно существенное превышение гидродинамических нагрузок в области первых пролетов пучка по сравнению с серединой пучка. Это обстоятельство в ряде случаев приводит к более высоким интенсивностям вибраций вблизи опорной решетки по сравнению с серединой пучка

Распределение пристеночных пульсаций давления по длине канала за входными решетками, а, следовательно, и среднеквадратичных значений случайных гидродинамических нагрузок по длине пучка твэлов имеет экспоненциальный характер. При этом максимальные уровни пульсаций давления пропорциональны гидравлическим сопротивлениям решеток или других входных устройств. Распределение среднеквадратичных значений случайных гидродинамических нагрузок по длине пучка твэлов в условиях формирования структуры потока на входе в пучок твэлов нижней опорной

решеткой, дроссельными шайбами, (или каким-либо другими входными устройствами) можно представить следующим образом

$$\langle f_g^{\text{эм}}(z) \rangle \sim C \cdot a \cdot (\Delta P_{\text{эм}} + \Delta P_{\text{оп}}) \cdot \exp(-\lambda \cdot z) + \langle f_g^{\infty} \rangle, \quad (18)$$

где C – эмпирическая константа; $\Delta P_{\text{эм}}$, $\Delta P_{\text{оп}}$ – потери статического давления на дроссельной шайбе и нижней опорной решетке; $\langle f_g^{\infty} \rangle$ – среднеквадратичное значение случайной гидродинамической нагрузки на участке установившегося течения; λ – коэффициент диссипации пульсационной энергии потока.

При значениях $C = 9,6 \cdot 10^{-2}$ и $\lambda = 10,6 \cdot \text{Re}^{-0,25} \text{ м}^{-1}$ ($\text{Re} = V d_z / \nu$, где d_z – гидравлический диаметр пучка твэлов, ν – коэффициент кинематической вязкости воды) среднеквадратичные значения случайных гидродинамических нагрузок в сечениях $z = 72 \text{ мм}$ и $z = 1527 \text{ мм}$ (рис. 7) для всех исследованных дроссельных шайб согласуются с экспоненциальной зависимостью (18). В области установившегося течения влияние возмущающих течение входных устройств отсутствует и генерация пульсаций давления, а, следовательно, и уровни случайных гидродинамических нагрузок определяются градиентом потерь статического давления по длине пучка твэлов, т.е.

$$f_g^{\infty} \sim \frac{dP_{\text{эм}}}{dz} \cdot S_{\text{np}} = \xi \cdot \frac{S_{\text{np}}}{d_z} \cdot \frac{\rho V^2}{2}, \quad (19)$$

где ξ – коэффициент гидравлического сопротивления трения в пучке твэлов; S_{np} – площадь проходного сечения пучка твэлов; d_z – эквивалентный гидравлический диаметр пучка твэлов.

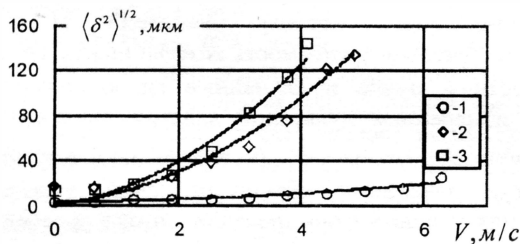


Рис. 6. Сопоставление экспериментальных и расчетных среднеквадратичных значений виброперемещений пучка твэлов в сечении $z = 72 \text{ мм}$ в области первого пролета для различных гидродинамических условий на входе в пучок: 1 – невозмущенный турбулентный поток; 2 – дроссельная шайба 52 мм; 3 – 48,5 мм (линии – расчет)

В диапазоне чисел Рейнольдса $\text{Re} = V d_z / \nu = 6 \cdot 10^3 \dots 7 \cdot 10^4$ экспериментальные данные по среднеквадратичным значениям случайных гидродинамических нагрузок в области установившегося течения в сечении $z = 1527 \text{ мм}$ в условиях невозмущенного входными устройствами потока обобщаются соотношением

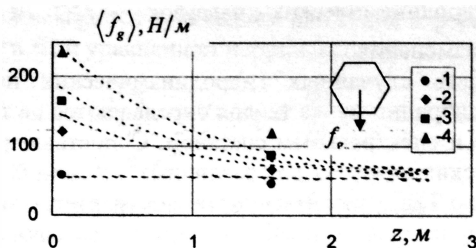


Рис. 7. Сопоставление экспериментальных среднеекватичных значений случайных гидродинамических нагрузок в двух сечениях пучка твэлов с обобщающей зависимостью (18) для различных гидродинамических условий на входе в ТВС: 1 - невозмущенный турбулентный поток; 2- дроссельная шайба 52 мм; 3- 48,5 мм; 4- 45 мм

$$\frac{\langle f_g^2 \rangle}{(\rho V^2 / 2) \cdot a} = C \cdot Re^{-0.25}, \quad (20)$$

где $C = 1,7$.

Экспериментальные данные по виброперемещениям пучка твэлов под действием случайных гидродинамических нагрузок в соответствующих направлениях обобщались на основе соотношения

$$\langle \delta^2(z) \rangle^{1/2} / l = C(z) \cdot \frac{\langle f_g^2 \rangle^{1/2} \cdot l^3}{E \cdot I}, \quad (21)$$

где $\langle \delta^2(z) \rangle^{1/2}$ - среднеекватичные значения виброперемещений пучка твэлов в сечении z ; $C(z)$ - константа, для заданного сечения z ; l - длина пучка твэлов; E - модуль упругости конструкционного материала оболочек твэлов; I - момент инерции сечения пучка твэлов.

Это выражение представляет собой зависимость безразмерных среднеекватичных 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 рис. 8 представлены результаты обобщения экспериментальных данных по виброперемещениям пучка твэлов. Можно выделить две характерные области влияния безразмерных случайных гидродинамических нагрузок на интенсивность вибраций пучка твэлов. На начальном гидродинамическом участке в области низких относительных случайных гидродинамических нагрузок (менее $4 \cdot 10^{-3}$) виброперемещения увеличиваются $\sim f_g^{0.2}$, а в области высоких $\sim f_g^{0.5}$. Вдали от входа в пучок виброперемещения зависят от уровней

случайных гидродинамических нагрузок $\sim f_g^{0,85}$ и $\sim f_g^{2,2}$ в указанных диапазонах их изменения.

Способность случайных гидродинамических нагрузок возбуждать и поддерживать вибрации пучка твэлов определяются не только их абсолютными значениями, но и спектральным составом. Сопоставление спектров случайных гидродинамических нагрузок для различных условий формирования структуры потока на входе в ТВС (рис. 9) наглядно показывает, что только при наличии на входе в ТВС дроссельных шайб или других создающих крупномасштабные вихревые структуры входных устройств в низкочастотной области появляются выраженные резонансы на начальном гидродинамическом участке. В удаленной от нижней опорной решетки области пучка проявляется вклад только высокочастотных составляющих при всех условиях формирования структуры потока на входе в ТВС.

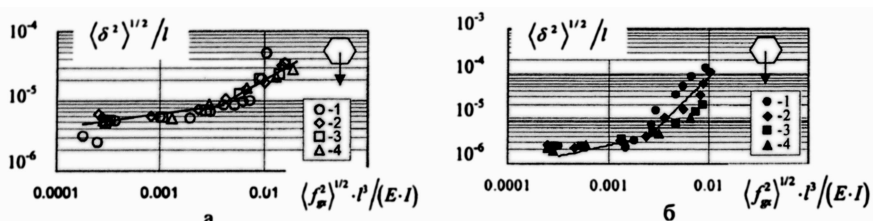


Рис. 8. Обобщение экспериментальных данных по среднеквадратичным значениям виброперемещений пучка твэлов на начальном гидродинамическом участке $z = 72 \text{ мм}$ (а) и в области установившегося течения $z = 1277 \text{ мм}$ (б): 1- невозмущенный турбулентный поток; 2- дроссельная шайба 52 мм; 3- 48,5 мм; 4- 45 мм

В шестой главе приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований динамических характеристик (собственные частоты, присоединенные массы и коэффициенты демпфирования колебаний) пучков твэлов ТВС ВВЭР. Демпфирование (конструкционное и гидродинамическое) и действующие со стороны потока случайные гидродинамические нагрузки определяют интенсивность вибраций пучка твэлов и ТВС в целом. Динамические характеристики пучка твэлов определялись в воздухе, в макронеподвижной воде и при течении воды со скоростями до 7 м/с в условиях закрепления головки и хвостовика ТВС ВВЭР-440, аналогичных реакторным условиям.

Разработана модель гидродинамического демпфирования колебаний пучка твэлов на основе представлений о затратах энергии механических колебаний на перераспределение жидкости по периметру внешнего ряда твэлов пучка. Виброперемещения пучка твэлов как единого целого приводят к возникновению периодических перемещений жидкости в шестигранном зазоре (рис. 10) между внешним рядом твэлов и внутренней поверхностью чехла (для чехловых ТВС) или между внешними рядами твэлов соседних ТВС (для безчехловых ТВС). Течение в шестигранном канале можно рассматривать как

одномерное, которое описывается уравнением движения в форме Лагранжа для перемещений жидкости $\mathbf{u}$, и уравнением неразрывности

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial \tau^2} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \tau}, \quad (22)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0,$$

где $\mathbf{u}$ – вектор перемещений жидкости относительно неподвижной системы координат.

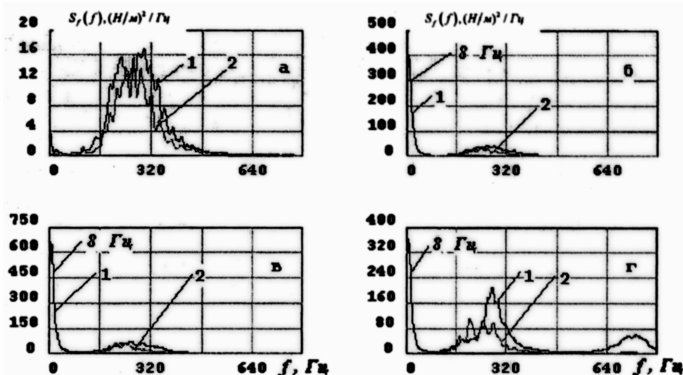


Рис. 9. Спектральные плотности случайных гидродинамических нагрузок на пучок твэлов в направлении перпендикулярно грани пучка на начальном гидродинамическом участке (1 - $z=72$ мм) и в области установившегося течения (2 - $z=1527$ мм) при скорости течения в пучке твэлов 3,14 м/с: а – невозмущенное турбулентное течение (без дроссельной шайбы на входе в ТВС); б - на входе дроссельная шайба 52 мм; в - 48,5 мм; г- 45 мм

Давление по ширине канала постоянно, а по длине меняется линейно. По распределениям действительной $p_0(l)$ и мнимой $p_1(l)$ составляющих давления можно найти соответствующие им нагрузки на единицу длины пучка твэлов

$$F_0 = -4 \left\{ \int_0^{a/2} p_0(l) dl + \sin 30^\circ \cdot \int_{a/2}^{3a/2} p_0(l) dl \right\}, \quad (23)$$

$$F_1 = -4 \left\{ \int_0^{a/2} p_1(l) dl + \sin 30^\circ \cdot \int_{a/2}^{3a/2} p_1(l) dl \right\}.$$

Эти составляющие формально можно рассматривать как динамическую и вязкую реакции на движение, т.е.

$$m_0 \frac{d^2\delta}{d\tau^2} + \zeta \frac{d\delta}{d\tau} = -(F_0 \cos \omega\tau + F_1 \sin \omega\tau) = -\operatorname{Re}[(F_0 - iF_1)e^{i\omega\tau}], \quad (24)$$

где m_0 - удельная (на единицу длины) присоединённая масса ($\kappa\text{г}/\text{м}$), ζ - удельный (на единицу длины) коэффициент демпфирования ($\text{Н}\cdot\text{с}/\text{м}^2$), Re - оператор выделения действительной части.

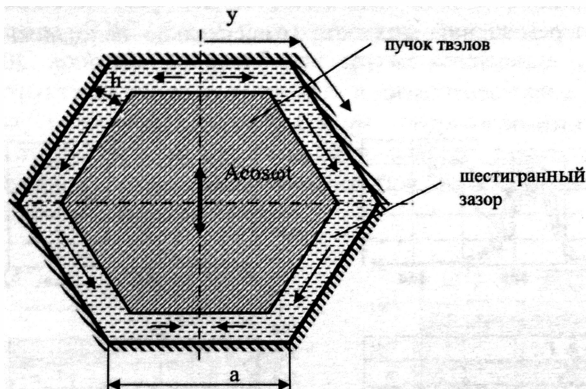


Рис. 10. Виброперемещения пучка твэлов в заполненном жидкостью шестигранном зазоре между пучком твэлов и чехлом или пучками соседних ТВС

Из уравнения (24) следует соотношения для присоединенной массы жидкости и коэффициента демпфирования

$$m_0 = \frac{F_0}{A\omega^2}; \quad \zeta = \frac{F_1}{A\omega}. \quad (25)$$

Расчетные оценки коэффициента присоединенной массы составляют $\alpha = 13,6$, а коэффициента гидродинамического демпфирования $\zeta = 256 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}^2$. Оценки на основе экспериментальных значений декремента колебаний пучка твэлов в макронеподвижной воде дают для коэффициента демпфирования $\zeta \approx 500 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}^2$. Естественно, это значение включает и эффекты конструкционного демпфирования.

Разработанная модель гидродинамического демпфирования колебаний пучка твэлов в макронеподвижной жидкости может быть распространена и на условия течения теплоносителя в ТВС. При этом повышение демпфирующих свойств турбулентного потока жидкости можно рассматривать как следствие увеличения эффективной вязкости в модели для макронеподвижной жидкости. Течение в зазоре между чехлом и внешним рядом твэлов пучка или между пучками твэлов соседних ТВС описывается уравнениями Навье - Стокса для стационарного течения жидкости в плоском канале с эффективной вязкостью $\mu_{эф}$:

$$\mu_{эф} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{\partial p}{\partial z}; \quad \frac{\partial p}{\partial y} = 0. \quad (26)$$

Из уравнений (26) следует оценка коэффициента эффективной вязкости $\mu_{\text{эф}}$ жидкости, в которой происходят колебания пучка твэлов:

$$\mu_{\text{эф}} = \frac{h^2}{12 \cdot V} \cdot \frac{dp}{dz}, \quad (27)$$

где h - ширина зазора между чехлом и внешним рядом твэлов пучка (чехловые ТВС) или между пучками твэлов соседних ТВС (безчехловые конструкции). Результаты расчетов декрементов колебаний на основе модели для макронеподвижной жидкости с эффективной вязкостью $\mu_{\text{эф}}$ согласуются с экспериментом в пределах 35% (рис. 11). Таким образом, полученные данные свидетельствуют о значительном влиянии турбулентного течения теплоносителя в ТВС на эффекты демпфирования колебаний пучка твэлов, что способствует ограничению амплитуд вибраций при высоких скоростях потока.

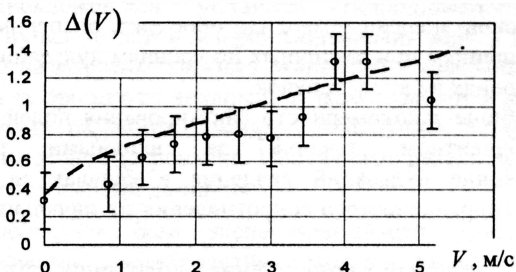


Рис. 11. Сопоставление результатов расчета декрементов колебаний пучка твэлов с экспериментальными значениями в зависимости от скорости течения теплоносителя в ТВС: - - - - расчет; о – эксперимент

ОСНОВНЫЕ ВЫВООДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Впервые проведены комплексные теоретические и экспериментальные исследования гидродинамического возбуждения вибраций пучков твэлов в ТВС водоохлаждаемых реакторов, раскрывающие механизмы взаимодействия пучка твэлов как механической колебательной системы с гидродинамикой турбулентного потока теплоносителя. Установлено, что 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. Показано, что скорости течения теплоносителя не определяют однозначно вибрации пучка твэлов. Важное значение имеют пульсационные характеристики потока. Для снижения интенсивности вибраций твэлов в ТВС ВВЭР необходимо совершенствовать тракты подвода теплоносителя к ТВС с целью снижения уровней пульсаций давления на входе в пучок и формирования их спектров без резонансов в низкочастотной области.

1. Существенное влияние на вибрационные процессы оказывают структурные характеристики течения, пульсации давления на входе в пучок. Получены многочисленные систематические экспериментальные данные по виброускорениям и виброперемещениям в различных сечениях пучка твэлов с использованием полномасштабных макетов ТВС ВВЭР-440 для гидродинамических условий с различными уровнями и спектральным составом пульсаций давления на входе в ТВС.

2. Обнаружена особенность изгибного деформирования пучка твэлов, заключающаяся в том, что при высокой турбулизации потока на входе в пучок амплитуды виброперемещений вблизи нижней опорной решетки могут быть соизмеримы или даже превышать соответствующие значения в середине пучка. Такая особенность реализуется, например, при размещении на входе в хвостовик ТВС дроссельных шайб малого диаметра.

3. Разработанная «энергетическая» модель баланса подводимой пульсационной энергии турбулентного течения и рассеиваемой при колебаниях пучка твэлов механической энергии позволила обобщить экспериментальные данные по виброперемещениям при различных по уровням пульсаций давления гидродинамических условиях на входе в пучок.

4. Установлены общие закономерности формирования полей пульсаций давления при турбулентном течении за входными решетками: экспоненциальное снижение пульсаций давления в каналах за входными решетками, влияние ее гидравлического сопротивления на начальный уровень пульсаций давления.

5. Предложенный механизм возбуждения колебаний пучка твэлов заключается в том, что воздействие случайных гидродинамических нагрузок на внешний ряд твэлов пучка вызывает его изгибные деформации как единого целого. При этом случайные гидродинамические нагрузки формируются, в основном, турбулентным течением в зазоре между внутренней поверхностью шестигранного чехла (чехловые ТВС ВВЭР-440) или в зазоре между ТВС (безчехловые конструкции) и внешним рядом твэлов пучка.

6. Предложен способ экспериментального определения случайных гидродинамических нагрузок по измеренным одновременно пульсациям давления на внутренних поверхностях шести граней чехла в одном сечении пучка и получены их статистические характеристики. Показано, что высокие уровни случайных гидродинамических нагрузок характерны для начального гидродинамического участка пучка твэлов вблизи нижней опорной решетки в условиях высоких уровней турбулизации потока на входе в пучок твэлов.

7. В спектрах случайных гидродинамических нагрузок на начальном гидродинамическом участке при высоких уровнях турбулизации потока на входе присутствуют, главным образом, низкочастотные (до 100 Гц) составляющие. При низких уровнях возмущения потока на входе в ТВС указанная низкочастотная резонансная область отсутствует. В области установившегося течения, где влияние входных условий не проявляется, в спектрах случайных гидродинамических нагрузок проявляется только высокочастотная (100...400 Гц) резонансная область.

8. Использование механической модели пучка твэлов на основе представлений о балке с пониженной сдвиговой жесткостью (балка Тимошенко С.П.), нагруженной распределенной случайной гидродинамической силой, позволило получить расчетные значения виброперемещений, которые хорошо согласуются с экспериментальными данными.

9. Предложенная полуэмпирическая модель, позволила показать влияние различной структуры турбулентного потока на входе в пучок на распределение случайных гидродинамических нагрузок по длине пучка твэлов.

10. Разработанная методика обобщения экспериментальных данных по виброперемещениям позволила выявить две характерные области влияния случайных гидродинамических нагрузок на вибрации. Получены эмпирические зависимости, связывающие безразмерные среднеквадратичные виброперемещения с безразмерными среднеквадратичными случайными нагрузками.

11. Предложенный механизм гидродинамического демпфирования колебаний пучка твэлов в макронеподвижной воде и в турбулентном потоке, основанный на затратах энергии механических колебаний на перераспределение жидкости в зазоре между чехлом и пучком твэлов или между пучками соседних ТВС, позволил разработать модель и получить количественные данные по коэффициентам демпфирования. Полученные результаты расчетов согласуются с экспериментальными данными.

12. Обширная база экспериментальных данных по вибрационным характеристикам характеристикам пучков твэлов передана в отраслевые организации ОКБ "Гидропресс", ОАО "Машиностроительный завод", ЗАО "Диапром", концерн "Росэнергоатом" и ОАО "ТВЭЛ" для использования в работах по обоснованию работоспособности существующих конструкций ТВС и дальнейшего совершенствования их конструкций. Впервые полученные данные по полям пульсаций давления используются в отраслевых организациях Росатома для анализа условий гидродинамического нагружения элементов конструкций ТВС ВВЭР-1000, ВВЭР-1200 и ВВЭР-1500.

Основные результаты диссертации изложены в 42 работах:

1. Перевезенцев В.В., Самошкин Ю.А., Селиховкин С.В. Математическая модель формирования полей осредненных и спектральных характеристик турбулентного осесимметричного потока// Вестник МГТУ. Машиностроение. 1990. №1. С. 73-79.

2. Перевезенцев В.В., Самошкин Ю.А., Селиховкин С.В. Распределение пристеночных пульсаций давления по длине круглой трубы в турбулентном потоке воздуха за решетками// Вестник МГТУ. Машиностроение. 1990. №1. С.102-106.

3. 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.23-29.

4. Опыт разработки и использования пьезорезистивных виброакселерометров для измерения вибрационных характеристик тепловыделяющих сборок водоохлаждаемых ядерных реакторов/В.В. Перевезенцев [и др.]// Датчики и системы. 2006. №10. С.25-29.

5. 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.

6. Солонин В.И., Сорокин Ф.Д., Перевезенцев В.В. Демпфирование колебаний пучка твэлов чехловых тепловыделяющих сборок водоохлаждаемых реакторов// Вестник МГТУ. Машиностроение. 2008. №3. С.75-85.

7. Солонин В.И., Сорокин Ф.Д., Перевезенцев В.В. Демпфирование колебаний пучка твэлов тепловыделяющих сборок водоохлаждаемых реакторов в потоке теплоносителя // Вестник МГТУ. Машиностроение. 2009. №3. С. 57-65.

8. Перевезенцев, В.В. Возбуждение колебаний пучка твэлов реакторов ВВЭР турбулентным потоком теплоносителя// Вестник МГТУ. Машиностроение. 2009. №4. С.78-88.

9. 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.

10. Солонин В.И., Перевезенцев В.В. Гидродинамическое и гидромеханическое возбуждение вибраций пучков твэлов ТВС ВВЭР-440// Вопросы атомной науки и техники. Обеспечение безопасности АЭС: Сб. ст. (Подольск), 2009. Вып.25. С.50-61.

11. Перевезенцев В.В. Пульсации давления, случайные гидродинамические нагрузки и вибрации пучков твэлов в ТВС ВВЭР: [Электронный ресурс]//Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2011. №9. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/166963.html> (дата обращения 07.02.2012).

12. Перевезенцев В.В. Экспериментальные исследования динамических характеристик пучков твэлов ТВС ВВЭР-440: [Электронный ресурс]//Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2011. №10. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/166963.html>. (дата обращения 07.02.2012).

13. Перевезенцев В.В. Распределение случайных гидродинамических нагрузок по длине пучка твэлов ТВС ВВЭР// Вестник МГТУ. Машиностроение. 2011. №4. С.103-110.

14. Перевезенцев В.В. Вибрации и повреждения твэлов в турбулентном потоке теплоносителя в тепловыделяющих сборках ВВЭР//Безопасность в техносфере. 2011. №6. С.11-17

15. Солонин В.И., Перевезенцев В.В. Исследования влияния вибрации и гидродинамических нагрузок на пучки твэлов в тепловыделяющих сборках реакторных установок АЭС с ВВЭР// Теплоэнергетика. 2012. №5. С. 40-45.

16. Пристеночные пульсации давления при турбулентном течении газа в каналах/ В.В. Перевезенцев [и др.]. М.: Изд-во МГТУ, 1992. 96с.

17. Мелешко Ю.П., Наливаев В.И., Перевезенцев В.В. Экспериментальное исследование пристеночных пульсаций давления при течении воздуха в круглой трубе// Труды МВТУ им. Н.Э. Баумана. 1985. №444. С. 70-78.

18. Перевезенцев В.В., Самошкин Ю.А., Селиховкин С.В. Экспериментальное исследование пристеночных пульсаций давления при стабилизированном турбулентном течении воздуха в трубе за решетками// Современные проблемы гидродинамики и теплообмена в элементах энергетических установок и криогенной технике: Межвуз. сб. науч. тр. М.: Изд-во ВЗМИ, 1987. С.93-96.

19. Распределение пристеночных пульсаций давления по длине круглой трубы в турбулентном потоке воздуха за решетками/ В.В. Перевезенцев [и др.]// Инженерно-физический журнал. 1987. Т.53. №1. С.149-150.

20. Определение динамических характеристик пневматических измерительных линий/В.В. Перевезенцев [и др.]// Современные проблемы гидродинамики и теплообмена в элементах энергетических установок и криогенной технике: Межвуз. сб. науч. тр. М.: Изд-во ВЗМИ, 1987. С.102-105.

21. Мелешко Ю.П., Перевезенцев В.В., Селиховкин С. В. Пульсации давления при турбулентном течении газа в трубах с концевыми устройствами//Труды МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1988. №505. С.44-51.

22. Ислентьев С.А., Перевезенцев В.В., Самошкин Ю.А. Поведение пульсационных характеристик потока за решетками// Современные проблемы гидродинамики и теплообмена в элементах энергетических установок и криогенной технике: Межвуз. сб. науч. тр. М.: Изд-во Моск. ин-та приборостроения, 1989. С.32-35.

23. Перевезенцев В.В., Прус В.В. Спектральные характеристики гидродинамически возбуждаемых вибраций продольно омываемых пучков труб// Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тез. докл. V междунар. научно-технич. конф. студентов и аспирантов. М. 1999. Т. 2. С.358-359.

24. Перевезенцев В.В., Столотнюк С.В. Амплитудно-частотные характеристики пульсаций давления на поверхности продольно обтекаемого пучка стержней в треугольной решетке// Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тез. докл. V междунар. научно-технич. конф. студентов и аспирантов. М., 1999. Т. 2. С.364-365.

25. Экспериментальные исследования гидродинамического воздействия потока теплоносителя на конструктивные элементы ТВС ВВЭР-440/В.В. Перевезенцев [и др.]// Гидродинамика и безопасность АЭС (Теплофизика-99): Тез. докл. отраслевой конф. Обнинск, 1999. С.306-308.

26. Перевезенцев В.В., Столотнюк С.В. Амплитудно-частотные характеристики пульсаций давления в продольно обтекаемых пучках цилиндрических элементов //Гидродинамика и безопасность АЭС (Теплофизика-99): Тез. докл. отраслевой конф. Обнинск, 1999. С.315-317.

27. Перевезенцев В.В., Столотнюк С.В. Модель формирования пульсаций давления в продольно обтекаемом пучке твэлов ТВС водоохлаждаемого реактора // Теплогидравлические коды для энергетических реакторов

(разработка и верификация). Теплофизические аспекты безопасности АЭС (Теплофизика-2001): Тез. докл. отраслевой конф. Обнинск, 2001. С.261-263.

28. Перевезенцев В.В., Столотнюк С.В. Амплитудно-частотные характеристики пульсаций давления в продольно обтекаемых пучках цилиндрических элементов// Научные исследования в области ядерной энергетики в технических вузах России: Сб. ст. М.: Изд-во МЭИ, 1999. С.57-59.

29. Стенд для экспериментальных исследований гидродинамических и вибрационных процессов в ТВС ВВЭР-440/В.В. Перевезенцев [и др.]/Научные исследования в области ядерной энергетики в технических вузах России: Сб. ст. М.: Изд - во МЭИ, 1999. С.59-61.

30. Экспериментальные исследования гидродинамического воздействия потока теплоносителя на конструктивные элементы ТВС ВВЭР-440/В.В. Перевезенцев [и др.]/Научные исследования в области ядерной энергетики в технических вузах России: Сб. ст. М.: Изд - во МЭИ, 1999. С.63 - 65.

31. Измерение пульсаций давления и вибраций в пучках стержней/ В.В. Перевезенцев [и др.] /Научные исследования в области ядерной энергетики в технических вузах России: Сб. ст. М.: Изд - во МЭИ, 1999. С.61-62.

32. Experimental study of hydrodynamically induced vibrational processes in VVER-440 fuel assemblies/V.V. Perevezentcev [et al.] // Technical innovations for next century: Proc. International Topical Meeting on VVER. Prague, 2000. P. 221-229.

33. Солонин В.И., Перевезенцев В.В. Расчетно-экспериментальные исследования вибрационного поведения тепловыделяющих сборок водоохлаждаемых реакторов в условиях комбинированного гидромеханического нагружения// Безопасность АЭС и подготовка кадров: Тез. докл. 7 междунар. конф. Обнинск, 2001. С.19-20.

34. Расчетно-экспериментальные исследования вибрационного поведения тепловыделяющих сборок водоохлаждаемых реакторов в условиях комбинированного гидромеханического нагружения/ В.В. Перевезенцев [и др.]/ 5 Международная конференция по проблемам колебаний (ICOVP-2001).: Сб. докл. М., 2001. С.433-437.

35. Экспериментальное определение гидродинамических и вибрационных характеристик тепловыделяющих сборок (ТВС) водоохлаждаемых реакторов: Автоматизированный лабораторный практикум с удаленным доступом / В.В. Перевезенцев [и др.]/Современная образовательная среда: Тез. докл. Всероссийская конф. М., 2002. С.106-107.

36. Методика стендовых гидромеханических испытаний макетов ТВС ВВЭР-440 для определения динамического нагружения твэлов пучка /В.В. Перевезенцев [и др.]/ Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: Тез. докл. 3 междунар. научно-технич. конф. Подольск, 2003. С.47.

37. Солонин В.И., Павелко В.И., Перевезенцев В.В. Влияние условий гидродинамического возбуждения на гидроупругие колебания пучка твэлов ТВС ВВЭР-440// Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: Тез. докл. 3 междунар. научно-технич. конфер. (Подольск). 2003. С.54.

38. Перевезенцев, В.В. Влияние условий гидродинамического возбуждения на гидроупругие колебания пучка твэлов ТВС ВВЭР-440// Образование через науку: Тез. докл. междунар. конф. М., 2005. С.476.

39. Влияние расхода и пульсационных характеристик расхода теплоносителя на вибрации пучка твэлов и решетки опорной макета ТВС ВВЭР-440/ В.В. Перевезенцев [и др.]//Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики: Тез. докл. 5 междунар. научно-технич. конф. М., 2006. С.61-63.

40. Солонин В.И., Перевезенцев В.В. Гидродинамические нагрузки на пучок твэлов в условиях различной структуры турбулентного потока на входе в ТВС ВВЭР-440// Теплогидравлические аспекты безопасности активных зон, охлаждаемых водой и жидкими металлами (Теплофизика-2008): Тез. докл. межведом. сем. Обнинск, 2008. С. 56-58.

41. Перевезенцев В.В. Статистические характеристики пульсаций давления и гидродинамические нагрузки на пучок твэлов ТВС ВВЭР-440// Безопасность АЭС и подготовка кадров: Тез. докл. XI междунар. конф. Обнинск, 2009. Т.2. С.170-173.

42. Solonin V., Perevezentsev V. Hydrodynamic load impact on vibrations of fuel element clusters in water-moderated water-cooled power reactor (VVER) fuel assemblies// Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2009. V.38, № 4. P. 388-392.

43. Перевезенцев В.В. Случайные гидродинамические нагрузки и вибрации твэлов в турбулентном потоке теплоносителя ТВС ВВЭР// Безопасность АЭС и подготовка кадров: Тез. докл. XII междунар. конф. Обнинск, 2011. С.47-49.