На правах рукописи

ШАРИКПУЛОВ САИД МИРФАИСОВИЧ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПУЛЬСАЦИОННЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА ПОПЕРЕЧНО ОБТЕКАЕМЫЕ ТРУБНЫЕ ПУЧКИ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ РЕАКТОРОВ

Специальность 05.14.03 – Ядерные энергетические установки

Автореферат диссертации на соискание
учёной степени кандидата технических наук

Шарикпулов

Москва – 2000

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

Научный руководитель	–	доктор технических наук, профессор **Солонин В. И.**
Официальные оппоненты	–	доктор технических наук **Каплунов С. М.**
	–	кандидат технических наук, доцент **Гаряев А. Б.**
Ведущее предприятие	–	государственное унитарное предприятие научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники (**ГУП НИКИЭТ**)

Защита диссертации состоится 10 апреля 2000 г. в 14^{30} в аудитории 234 на заседании диссертационного совета К.053.15.08 в Московском Государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана по адресу: 107005, Москва Б-5, 2-ая Бауманская ул., дом 5.

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

.000 г.

НТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана
1565997
Шарикпулов С.М. Определени

Кутуков Ю. Н.

1565997

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. Изучение вибраций конструкций реакторных установок (РУ) (внутрикорпусных устройств, элементов оборудования) при их взаимодействии с жидкостью стала особенно актуальной в 60-е годы в связи с увеличением энергонапряжённости оборудования РУ, однако в 80-е годы до 80% остановок энергетических блоков происходило вследствие отказов теплообменных аппаратов в значительной части из-за их недостаточной вибрационной надёжности. В 90-е годы эти вопросы вновь привлекли к себе внимание в связи с разработкой РУ нового поколения и задачами прогноза остаточного ресурса действующих РУ.

Для отечественных конструкторских организаций и зарубежных фирм основная роль в выборе конструктивных решений принадлежит физическому моделированию. Используемые программные коды, как правило, позволяют рассчитывать собственные частоты конструкций, но не их вынужденные колебания из-за реально существующего динамического нагружения, определение которого является одной из наиболее актуальных и сложных задач как для продольного, так и поперечного или смешанного обтекания трубных систем.

В связи с отмеченным экспериментальное исследование и анализ условия нагружения поперечно обтекаемых трубных пучков является актуальным.

Цель работы. Целью работы является решение задач, связанных с проектно-конструкторским обоснованием РУ, содержащих поперечно обтекаемые трубные пучки с малыми относительными шагами, в части определения нагрузок на трубы, а именно:

1. Определение структуры течения в тесном поперечно обтекаемом трубном пучке и анализ механизмов нагружения труб потоком;
2. Разработка модели расчёта нагружения труб пучка потоком, верификация и валидация модели;
3. Обобщение экспериментальных данных в рамках модели расчёта в форме, используемой для численного моделирования вибраций поперечно обтекаемых трубных пучков.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Получена база данных о пульсационных и спектральных характеристиках течения в тесном поперечно обтекаемом трубном пучке, основанная на измерениях пульсаций давления на поверхности труб и кожухе модели;
2. Разработан алгоритм суммирования случайных сигналов пульсаций давления различных серий измерений, позволяющий определить

1565997

МГТУ
им. Н. Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

нестационарное силовое воздействие потока на поперечно обтекаемые трубы пучка;

3. Получены спектральные представления локальных сил, действующих на трубы, расположенные в разных областях пучка.

На защиту выносятся:

1. Метод анализа структуры течения в трубных пучках с использованием измерений пульсаций давления;
2. Результаты анализа механизмов возбуждения тесных трубных пучков потоком;
3. Модель расчёта нагружения труб пучка по пульсациям давления;
4. Модель учёта нагрузок от турбулентности потока в программном комплексе ViCAN.

Практическая значимость работы:

1. Показана важная роль случайного турбулентного нагружения в формировании вибраций тесных трубных пучков, отсутствие в нём ярко выраженных детерминированных частот при числах Рейнольдса $\mathrm{Re}_g = (4...6)\cdot 10^4$;
2. Получены характеристики нагрузок на трубы пучка, переданные в отраслевой программный комплекс ViCAN для расчёта вибраций труб парогенераторов;
3. Результаты работы использованы для анализа условий нагружения и выбора конструктивных решений парогенераторов интегральных реакторов ISIS (Европейское сообщество) и MRX (Япония) в ходе реализации Проекта №502-96 МНТЦ.

Апробация работы:

Основные результаты диссертационной работы докладывались на отраслевой конференции «Гидродинамика и безопасность АЭС» (Обнинск, 1999 г.), на XII школе-семинаре молодых учёных и специалистов «Проблемы газодинамики и тепломассобмена в энергетических установках» (Москва, 1999 г.), на студенческой научной конференции «Полярное сияние-98» (Санкт-Петербург, 1998 г.), на семинарах кафедры Э7 «Ядерные реакторы и установки» МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Научные труды:

Результаты диссертационной работы отражены в четырёх статьях и в двух научно-технических отчётах.

Объём работы:

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, основных результатов и списка использованных источников. Объём диссертации составляет 187 страниц, 99 рисунков, 21 таблицу. Список использованных источников включает 66 наименований.

Основное содержание работы

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы, научная новизна и практическая значимость работы. Кратко характеризуются основные современные подходы к решению задачи диссертации.

В первой главе проводится обзор состояния проблемы.

Среди работ, посвящённых экспериментально-теоретическому исследованию течения в тесных поперечно обтекаемых трубных пучках, отмечаются работы Чена С. С., Жукаускаса А. А., Танаки Х. и др., в которых приводятся данные по структуре течения, вибрационным откликам труб на изменение параметров потока (амплитудно-скоростные характеристики).

Проводится аналитический обзор исследований механизмов возбуждения вибраций труб пучка: турбулентного, за счёт срыва вихрей Кармана, акустического, за счёт крупномасштабных вихрей и гидроупругого. Турбулентный механизм возбуждения обусловлен турбулентными пульсациями потока на поверхности труб. Срывы вихрей Кармана вызывают детерминированные периодические силы. Во многих работах демонстрируется возможность резонансных колебаний труб пучка и кожуха теплообменного аппарата в результате акустических колебаний столба теплоносителя (в поперечном и/или продольном к потоку направлении), которые могут вызываться и срывом вихрей Кармана, турбулентностью. Причиной крупных локальных вихреобразований могут быть резкие изменения направления потока, неустойчивости течений в контуре. Последний вид возбуждения характерен для реакторных установок, теплообменного оборудования и в задачах течения за перфорированными решётками. Крупные локальные вихреобразования могут вызывать низкочастотные (до 50 Гц) пульсации давления большой амплитуды. Силы, связанные с проявлением гидроупругости, в модели Чена С. С. подразделяются на три вида: связанные с присоединёнными массами, гидродинамическим демпфированием и гидродинамической жёсткостью. Колебания любой трубы пучка, согласно этой модели, зависят от колебания каждой трубы пучка из-за наличия вышеперечисленных видов сил.

Обсуждаются механизмы возникновения и формирования сил, действующих на одиночную трубу, обтекаемую поперечным потоком.

В конце главы даны выводы и сформулирована цель исследования.

Во второй главе проводится обоснование выбора и реализация экспериментального метода исследования, описывается экспериментальная модель, первичные преобразователи и методика эксперимента, оцениваются погрешности измерений и их природа.

При теоретическом описании турбулентного течения в поперечно обтекаемых трубных пучках и определении нагрузок на его трубы требуется решение не только уравнений осреднённого турбулентного течения, но и определение пульсационных характеристик потока: u', v', w', p'. Один из путей – решение уравнений Рейнольдса совместно с принятыми более детальными модельными допущениями о случайных полях турбулентного потока. Однако, пульсационные характеристики потока, определённые по существующим в настоящее время таким моделям, дают не приемлемые различия с экспериментами. В случае колеблющихся труб, когда следует учитывать подвижные границы поля течения, нахождение как осреднённых, так и пульсационных характеристик потока сильно усложняется. Другой путь теоретического решения данной задачи – решение нестационарных уравнений Навье-Стокса для тесного пучка поперечно обтекаемых колеблющихся и/или не совершающих колебания труб. В настоящее время о получение такого решения не известно.

В силу вышеперечисленных трудностей теоретического метода решения поставленной задачи был выбран экспериментальный метод определения структуры течения в тесном поперечно обтекаемом трубном пучке и анализа механизмов нагружения труб потоком. При детальном экспериментальном исследовании изучаемого течения требуется проводить измерения осреднённых и пульсационных характеристик потока: $\bar{u}$, $\bar{v}$, $\bar{w}$, $\bar{p}$ и u', v', w', p'. В данной работе основное внимание уделялось измерениям пульсаций давления на поверхности труб пучка и его кожуха. Данное решение обусловлено следующим. При поперечном обтекании трубы с ростом числа Рейнольдса роль силы трения на поверхности трубы по сравнению с силой давления уменьшается (при $10^3 < \mathrm{Re} < 10^5$ влияние силы трения не превышает 9...3% силы давления), поэтому её ролью можно в первом приближении пренебречь и гидравлическую силу, действующую на трубу, определять как обусловленную в основном силой давления. Для определения пульсационных нагрузок на трубы пучка требуется знание именно пульсаций давления. Пульсационная сила в сечении какой-либо трубы пучка, отнесённая к единице длины трубы, равна: $\vec{F}'(z,t) = \frac{d}{2}\int_0^{2\pi} \vec{p}' d\theta$, где $\vec{p}'$ – вектор пульсации давления на поверхности трубы. Пульсации давления являются «интегральными» характеристиками потока, они обусловлены распределением истинных скоростей, имеющимся в окрестности точки измерения, и характеризуют течение в этой окрестности.

Совместный анализ пульсаций давления на периметре труб пучка и поверхности кожуха позволил установить взаимозависимость между ними, важную с практической точки зрения. В условиях промышленных испытаний по

результатам измерений пульсаций давления на стенках кожуха можно прогнозировать условия нагружения труб. Наряду с измерением пульсаций давления проводились измерения средней скорости и пульсаций скорости в поле течения в трубном пучке.

Для анализа и обработки случайных сигналов поля давления и скорости была использована информационно-измерительная система (ИИС) кафедры Э7 МГТУ им. Н. Э. Баумана, которая включает следующие системные блоки: аналогово-цифровые преобразователи (АЦП); аппаратуру сопряжения САМАС; аппаратуру, управляющую экспериментом и сбором данных ПЭВМ; локальную вычислительную сеть; аппаратуру, управляющую экспериментом и сбором данных ПЭВМ; ПЭВМ для статистической обработки экспериментальной информации.

Объектом исследования был определён поперечно обтекаемый пучок труб с числом рядов труб в поперечном к потоку направлении – *5*, числом рядов труб в продольном направлении – *15*, относительный поперечный шаг $S_y/d \cong 1.30$; относительный продольный шаг $S_x/d \cong 1.28$; модель №1 – оси труб трубного пучка имеют угол наклона к плоскости поперечного сечения модели *3°* (угол между направлением потока и осью трубы равен *87°*), и при этом направление наклона труб изменяется от ряда к ряду; модель №2 – угол между направлением потока и осями обтекаемых труб равен *90°*; наружный диаметр труб пучка $d = 31.5 мм$. Число рядов труб в поперечном к потоку направлении пучка (ряды в этом направлении обозначались A, B, C, D, E) выбиралось, исходя из требования обеспечения отсутствия влияния стенок канала, в котором расположен трубный пучок, на обтекание центрального ряда. Число рядов труб в продольном направлении (трубы в этом направлении обозначались 1, 2, 3, ... 15) выбиралось, исходя из обеспечения исследования первых (1...5) и глубинных в продольном направлении рядов труб. Обтекаемая длина труб – $l = 0.5 м$ – выбиралась из условия малого влияния стенок канала, в которых крепились трубы, на картину течения вдоль оси труб. Входное устройство обеспечивало равномерность распределения средней скорости по входному в трубный пучок сечению с величиной максимального отклонения локальной средней скорости от средней по сечению скорости не превышающей $\pm 4\%$, интенсивность пульсаций скорости в этом сечении не превышает 5%.

Для решения поставленной задачи использован экспериментальный аэродинамический стенд кафедры Э7 МГТУ им. Н. Э. Баумана по исследованию поперечного обтекания не колеблющихся трубных пучков. Данный стенд был создан в рамках международного проекта №502-96 МНТЦ.

Были использованы следующие первичные преобразователей и зонды: датчики термоанемометра; малогабаритные тензорезистивные полупроводниковые

датчики пульсационных и постоянных составляющих давления; зонды для измерения пульсаций давления на поверхности труб пучка.

Зонды для измерения пульсаций давления на поверхности труб пучка и на поверхности кожуха модели разрабатывались совместно с Лётно-исследовательским институтом им. М. М. Громова.

В ходе работы проводились измерения средней и пульсационной составляющих давления на поверхности труб пучка и на его кожухе. Измерения средней и пульсационной составляющих давления на поверхности труб пучка проводились с использованием двух измерительных зондов на базе тонкостенных труб диамстром *31.5 мм* из нержавеющей стали, длиной *1200 мм*, оснащенных малогабаритными тензорезистивными полупроводниковыми датчиками пульсационных и постоянных составляющих давления. В первом измерительном зонде установлены шесть тензорезистивных датчиков давления (ДД). В центральном диаметральном сечении установлены четыре датчика с ориентацией приемных отверстий *0°*, *95°*, *125°*, *275°* и на образующей ($\theta = 0°$) три датчика через *30 мм* один от другого (рис. 1). В первом измерительном зонде датчик ДД №1 позволял также измерять постоянную составляющую давления. Во втором измерительном зонде установлен один тензорезистивный датчик давления, позволявший выполнять измерения постоянной и пульсационной составляющей.

Путем перемещения измерительных зондов по ширине модели и поворота вокруг оси можно установить приемные отверстия ДД в требуемом положении.

Измерение пульсационной и постоянной составляющих давления на внутренней поверхности стенки модели проводились с использованием тензорезистивных датчиков давления. Принципиально их конструкция аналогична датчикам давления, установленным на трубчатых измерительных зондах.

В соответствии с имеющимися данными течение в трубных пучках характеризуется широкополосным спектром пульсаций, обусловленных неустойчивостью течения в пучке в целом, срывом вихрей из кормовой зоны труб, переходом к турбулентному течению в пограничном слое. При сравнительном анализе результатов наладочных экспериментов и первых результатов измерений в объеме трубного пучка было установлено, что в спектрах пульсаций скорости, пульсаций давления в объеме трубного пучка моделей значительная доля энергии пульсационного движения сосредоточена в области низких частот. Низкочастотные составляющие, лишь частично учитываемые в статистических анализах (из-за частотных характеристик первичных преобразователей и ограниченного времени осреднения), рассматривались как нестационарный процесс, наложенный на турбулентное пульсационное движение. В том смысле течение в трубном пучке характеризуется авторами как нестационарное, в котором присутствуют низкочастотные нестационарные движения, переносящие генерированные при

обтекании труб турбулентные структуры в объеме моделей. Случайные процессы такого вида являются статистически нестационарными и их анализ требует осреднения большого количества реализаций и учёт зависимости статистических характеристик по времени. Это требует длительного экспериментального цикла. Кроме того, для нагружения труб интерес представляют не столько статистически осреднённые характеристики течения и нагружение, полученное по ним, сколько нагрузки, определяемые частотами пульсационных движений, имеющих порядок собственных частот колебаний труб. Вибрационный «отклик» системы колеблющиеся трубы пучка – жидкость существенно зависит от амплитудно-частотного состава действующей гидродинамической силы, особенно на скорости потока, близкой к критической.

С учётом вышеперечисленных соображений было принято допущение об эргодичности пульсаций давления на поверхности труб пучка при определении характеристик нагружения и допущение о стационарности пульсаций давления при определении СКО, коэффициентов корреляции, определяемых по ним. Допущение об эргодичности пульсаций давления на поверхности труб пучка, наиболее важное для определения гидродинамических сил, приводит к погрешностям используемой математической модели, величины которых можно оценить, сравнивая полученные силы с результатами других авторов. Гейнеке Е и Мор К. эти коэффициенты определяли по результатам измерения пульсаций давления на поверхности труб пучка (для сравнения выбирался коридорный пучок – $S_x = S_y = 1.44d$, *5* рядов в плоскости, параллельной потоку воздуха, по *5* труб в ряду – наиболее близкий по геометрии к исследуемому в данной работе трубному пучку).

Оценки относительной ошибки СКО пульсаций давления, связанные с допущением о стационарности пульсаций давления, и случайной ошибкой измерения определялись с доверительной вероятностью $P_\partial = 0.9$ (ГОСТ 8.009–84):

$$\varepsilon_{\sigma_p}^{st,r} = 1.6 \cdot \left(\varepsilon_{\sigma_p}^{st,r}\right)', \left(\varepsilon_{\sigma_p}^{st,r}\right)' = \left(M\left[\left(\bar{\sigma}_p - \sigma_p\right)^2\right] / \left(\bar{\sigma}_p\right)^2\right)^{1/2}, \bar{\sigma}_p = \frac{1}{n_d}\sum_{j=1}^{n_d}\sigma_{pj},$$

$$\sigma_{pj} = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}\left(\bar{p}_j - p_{ij}\right)^2}, \; M\left[\left(\bar{\sigma}_p - \sigma_p\right)^2\right] = \frac{1}{n_d}\sum_{j=1}^{n_d}\left(\bar{\sigma}_p - \sigma_{pj}\right)^2,$$

где $\varepsilon_{\sigma_p}^{st,r}$ – относительная ошибка СКО пульсаций давления; n_d – количество реализаций пульсаций давления; N – количество точек в реализации, p_{ij} – пульсация давления в реализации j в точке i; $\bar{p}_j$ – математическое ожидание пульсации давления реализации j. Допущение о стационарности пульсаций давления при определении СКО приводит к погрешностям измерения порядка 20…50%. Эта погрешность определена в результате специальных экспериментов, в

ходе которых исследовалось изменение СКО пульсаций давления с течением времени. Оценки относительной ошибки коэффициентов корреляции проводились аналогичным образом. Для коэффициентов корреляции эта погрешность составляет 50...80%, однако наблюдались и повышенные значения этой погрешности: 90...160%.

Для режимов обтекания трубного пучка $\mathrm{Re}_g = 6 \cdot 10^4$, $\mathrm{Re}_g = 4 \cdot 10^4$ для трубы С3 в точках измерения $\theta = 0°$ и $\theta = 30°$ были оценены отклонения односторонних автоспектров пульсаций давления, $\left(D\left[G_p(f)\right]\right)^{1/2}$, от их математического ожидания, $\overline{G}_p(f)$, связанные с допущением о стационарности пульсаций давления, и случайной ошибкой измерения. Математическое ожидание одностороннего автоспектра пульсаций давления: $\overline{G}_p(f) = \frac{1}{n_d}\sum_{i=1}^{n_d} G_{pi}(f)$, дисперсия одностороннего автоспектра пульсаций давления: $D\left[G_p(f)\right] = M\left[\left(\overline{G}_p(f) - G_p(f)\right)^2\right] = \frac{1}{n_d - 1}\sum_{i=1}^{n_d}\left(\overline{G}_p(f) - G_{pi}(f)\right)^2$.

Было обнаружено что $\left(D\left[G_p(f)\right]\right)^{1/2} \approx \overline{G}_p(f)$ (количество реализаций: $n_d = 100$, число точек в реализации: $N = 2^{13}$), это может быть объяснено как погрешностью допущения о стационарности пульсаций давления, так и низкой статистической устойчивостью определения $\overline{G}_p(f)$, достаточно высокой погрешностью измерительных средств.

Было установлено, что величина погрешности не зависит от числа Рейнольдса.

В третьей главе приводятся результаты экспериментальных исследований и проводится анализ общих характеристик течения.

Для исследования были выбраны следующие режимы обтекания трубного пучка: $\mathrm{Re}_g = 6 \cdot 10^4$, $\mathrm{Re}_g = 4 \cdot 10^4$, $\mathrm{Re}_g = 2 \cdot 10^4$.

По экспериментальным данным были получены автоспектральные характеристики пульсаций давления, их СКО на поверхности труб пучка и коэффициенты корреляции пульсаций давления при углах $\theta = 90°$ и $\theta = 270°$, $\rho_{90°-270°}$.

На рис. 2 показано распределение коэффициентов избыточного среднего давления по периметру сечения труб С1 – С5, С8 для $\mathrm{Re}_g = 6 \cdot 10^4$, на рис. 3 – распределение СКО коэффициентов пульсаций давления по периметру сечения труб С1 – С5, С8, С13 для $\mathrm{Re}_g = 6 \cdot 10^4$. На рис. 4, 5 приводятся характерные

односторонние спектры мощности пульсаций давления $\overline{G}_p = \dfrac{G_p}{\left(\rho U_g^2/2\right)^2 d/U_g}$ на поверхности труб в зависимости от безразмерной частоты (определялась по скорости в зазаоре между трубами пучка).

Распределение среднего давления по периметру сечения трубы ряда С1 подобно аналогичным для поперечно обтекаемых труб. Следует отметить отрыв пограничного слоя при углах около $90°$ и $270°$ и асимметрию распределения среднего давления в области отрицательных градиентов давления в пограничном слое на трубе. Для исследованных рядов труб максимальное значение давления наблюдается в области углов $60°$ и $330°$, что соответствует характеру поперечного обтекания труб пучка.

Анализ полученных распределений пульсаций давления на поверхности труб показывает, что на образующей трубы, направленной навстречу потоку, величины пульсаций давления увеличиваются до третьего ряда труб, а затем снижаются и сохраняют постоянное значение. В кормовой зоне труб величины пульсаций давления изменяются относительно мало от ряда к ряду. В области отрыва потока от поверхностей труб отмечается наибольшая величина и асимметрия пульсаций давления, имеющая разный «знак» для разных рядов труб. Отмеченное имеет место для всех значений числа Рейнольдса.

В пульсациях давления наряду с низкочастотной составляющей присутствует турбулентная составляющая сложного состава, которая вносит вклад в силы, действующие на трубы пучка. Преобладающего узкополосного возбуждения вне низкочастотной области, аналогичного возбуждению за счёт срыва вихрей Кармана с поверхности одиночной трубы (или за счёт срыва энергонесущих вихрей другого вида) при $\mathrm{Re}_g = 6\cdot 10^4$ и $\mathrm{Re}_g = 4\cdot 10^4$, для моделей №1 и №2 не обнаружено. При $\mathrm{Re} = 2\cdot 10^4$ в спектрах пульсаций давления для труб пучка моделей №1 и №2 (см. рис. 5.) наряду с турбулентным возбуждением присутствует значительное количество энергии в области частоты $Sh_f^g \cong 0.31$, что позволяет сделать вывод о наличии узкополосного вихревого возбуждения труб при данном режиме обтекания труб пучка. Присутствие вихревого возбуждения при $\mathrm{Re} = 2\cdot 10^4$ в отличие от режимов обтекания $\mathrm{Re}_g = 6\cdot 10^4$ и $\mathrm{Re}_g = 4\cdot 10^4$ объясняется тем, что при $\mathrm{Re} = 2\cdot 10^4$ поток недостаточно турбулизирован и турбулентность «внешнего» потока не препятствует образованию узкополосных высокоэнергетических вихрей. Корреляции пульсаций давления с противоположных сторон труб мало отличаются

от нуля, что свидетельствует об отсутствии линейной статистической связи вихревых структур, свойственной вихрям Кармана.

Двухточечные коэффициенты корреляций пульсаций давления на поверхности трубы пучка, измеренные на образующей зонда №1, показывают, что квазистабилизированные значения корреляций на лобовой и кормовой образующих труб формируются после 5-го ряда. В этой области пучка коэффициенты корреляции на расстоянии *30 мм* составляют *0.4* при $\theta = 180°$ и *0.3...0.35* при $\theta = 0°$. На первых четырёх рядах труб коэффициенты корреляций существенно изменяются. На лобовой образующей 1-го ряда они близки к единице, 2-го ряда – уменьшаются до *0.2...0.1*, затем возрастают. На кормовой образующей 1-го ряда коэффициенты корреляции составляют *0.3...0.4*. Коэффициенты корреляции при $\theta = 90°$ для первых рядов труб составляют *0.5...0.7*, а после 5-го ряда принимают отрицательные значения, которые равны приблизительно – *0.2*.

Коэффициенты корреляции вдоль образующей труб позволили оценить корреляционные длины, L_c, пульсаций давления на поверхности труб пучка. При $\mathrm{Re}_g = 6 \cdot 10^4$ и $\mathrm{Re}_g = 4 \cdot 10^4$ для 1-го ряда труб $L_c / d = 5...8$, для 2-го, 3-го и 4-го величина $L_c / d = 2...3$, для последующих рядов $L_c / d \approx 1...2$. С уменьшением числа Рейнольдса от $\mathrm{Re}_g = 6 \cdot 10^4$ до $\mathrm{Re}_g = 4 \cdot 10^4$ L_c несколько возрастает.

Двухточечные коэффициенты корреляций пульсаций давления на поверхности трубы пучка, измеренные на образующей зонда №1, и величины L_c позволяют сделать вывод о падении линейной статистической связи поля потока по оси труб пучка при продвижении в глубь пучка, что сказалось на интегральных характеристиках сил. Корреляционные длины использовались для пересчёта локальных коэффициентов сил в интегральные: $\overline{C'}^{\mathrm{int}} = \overline{C'}^{local} \sqrt{2L_c / l}$.

В работе проводилось сравнение интенсивности пульсаций скорости $Tu_{u'} = \sqrt{\overline{u'^2}} / U_g$, полученные по результатам измерения пульсаций скорости за рядами труб, и интенсивности пульсаций скорости, $Tu_{P'} = \sqrt{2 \cdot \left(\overline{p'^2}\right)^{1/2} / \rho} / U_g$, полученные по результатам измерения пульсаций давления на поверхности труб пучка в точках $\theta = -120°$, находящихся на расстоянии приблизительно $0.44d$ от точки измерения скорости (рис. 6). В этих точках измерения $Tu_{u'}$ меньше $Tu_{P'}$ приблизительно на 30%...50%. Приведена величина $Tu_{u'}$ на входе в пучок и величина $Tu_{P'}$ в лобовой точке центрального сечения трубы С1. Данное сравнение подтверждает обоснованность выбора пульсации давления на поверхности труб пучка как характеристики, описывающей течение в поперечно обтекаемом пучке труб.

По результатам измерения среднего избыточного давления на поверхности кожуха вдоль трубного пучка модели №1 и модели №2 определялись соответствующие коэффициенты среднего избыточного давления, коэффициенты гидравлического сопротивления пучков моделей и проводилось их сравнение. В обеих моделях величины градиента среднего давления имеют различную величину (и даже знак) в области втекания потока в зазор «ряд труб – кожух» и в области истечения потока из этого зазора. Стабилизированные значения градиента давления устанавливаются после 5-го ряда. Коэффициент среднего избыточного давления вдоль трубного пучка нестабилизированной области течения (до 5-го ряда) для модели №2 имеет существенную зависимость от числа Рейнольдса: при его росте от $\mathrm{Re}_g = 2 \cdot 10^4$ до $\mathrm{Re}_g = 6 \cdot 10^4$ он уменьшается приблизительно на 30%. Для модели №1 такой зависимости не выявлено. Были получены зависимости коэффициентов гидравлического сопротивления пучков моделей, отнесённые к количеству рядов в пучке ($n_x = 15$) ξ_0. Экспериментальные данные по ξ_0 аппроксимируются зависимостями:

$$\xi_0 = -3.56 \cdot 10^{-7}\,\mathrm{Re}_g + 0.266,\ \ 2 \cdot 10^4 \le \mathrm{Re}_g \le 7 \cdot 10^4 \text{ – модель №1;}$$

$$\xi_0 = -1.32 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{Re}_g + 0.408,\ \ 2 \cdot 10^4 \le \mathrm{Re}_g \le 7 \cdot 10^4 \text{ – модель №2.}$$

Гидравлическое сопротивление модели №2 больше гидравлического сопротивления модели №1 приблизительно на 30%, что объясняется отличием геометрии моделей.

Величина и характер изменения коэффициента пульсаций давления по длине внутренней поверхности кожуха находятся в удовлетворительном соответствии с аналогичными зависимостями, полученными на поверхностях труб. Это подтверждает возможность использования измерений пульсаций давления на поверхности кожуха для диагностики ярко выраженных характерных структур течения в трубном пучке.

В четвёртой главе описывается предлагаемый алгоритм определения локальной пульсационной силы, действующей на трубы пучка со стороны потока, проверка корректности алгоритма с использованием выполненных на одиночной трубе измерений, приводятся результаты вычислений локальных и интегральных пульсационных сил, действующих на трубы пучка. Представляется сравнение полученных результатов и приведённых в других работах.

Для определения пульсационных аэродинамических сил, действующих на трубу пучка, была проведена серия экспериментов, в которых пульсации давления измерялись одновременно двумя датчиками пульсаций давления, импульсные отверстия которых расположены под углом 30° по отношению друг к другу, см. рис. 7. Была принята следующая схема измерений: одновременно измерялись

пульсации давления в положении 1 и 2, затем труба поворачивалась на шаг по углу $\Delta\theta$, равный $30°$, и измерения повторялись в положении 2 и 3 и так далее, конечное положение точек измерения 12 и 1. Имея одновременные измерения пульсаций давления, в любых двух соседних точках, определялись разность фаз между пульсациями давления в этих точках в исследуемом диапазоне частот, и амплитудно-частотная характеристика. Допущение об эргодичности пульсаций давления на поверхности труб позволяло считать полученные разности фаз и амплитудно-частотные характеристики, определённые по пульсациям давления в положениях 1...12 ($\theta = 0°...330°$), не зависящими от времени измерения сигналов пульсаций давления в последовательных парах точек.

Аэродинамические силы определялись в предположении, что пульсация давления на участке $\pm\Delta\theta/2$ от точки измерения не изменяется по углу θ и равна пульсации давления в точке измерения.

Отсчёт фазы сигналов вёлся от положения 1, то есть после вычисления амплитудно- и фазо-частотных характеристик, определялась разность фаз между пульсациями давления в каждых двух соседних точках измерения (разность фаз между пульсациями давления сигналов, измеренных в положении 1 и 2, 2 и 3, ..., 12 и 1), далее полагалось, что фазо-частотная характеристика в положении 1 равна нулю: $\phi_1'(f) = 0$, а фазо-частотная характеристика в i-ом положении равна: $\phi_i'(f) = \sum_{j=1}^{i} \Delta\phi_j(f)$, $i = 1,2,..,12$, где $\Delta\phi_j(f) = \phi_{j+1}(f) - \phi_j(f)$ – разность фаз между сигналами пульсаций давления, одновременно измеренными в точках измерения j и $j+1$.

Наличие амплитуды $|P_i(f)|$ и фазы $\phi_i'(f)$ сигнала пульсации давления в положениях 1...12 позволяет определить проекции пульсационной силы, действующей на трубу в предположении, что эта сила постоянна по длине трубы и равна силе, действующей в сечении:

$$F_x'(f) = \frac{d}{2} l \sum_{i=1}^{12} A_i |P_i(f)| \exp\left(-\mathrm{j}\phi_i'(f)\right),\ F_y'(f) = \frac{d}{2} l \sum_{i=1}^{12} B_i |P_i(f)| \exp\left(-\mathrm{j}\phi_i'(f)\right),$$

где $A_i = \cos(\theta_i - \Delta\theta/2) - \cos(\theta_i + \Delta\theta/2)$, $B_i = \sin(\theta_i + \Delta\theta/2) - \sin(\theta_i - \Delta\theta/2)$; $\mathrm{j} = \sqrt{-1}$.

Из анализа полученных в данной работе спектров пульсаций давления на поверхности одиночной трубы, безразмерных частот срыва вихрей Кармана, коэффициентов корреляции пульсаций давления на углах $\theta = 90°$, $\theta = 270°$ и сил следуют следующие основные выводы: число Струхаля для срыва вихрей Кармана в диапазоне чисел Рейнольдса $\mathrm{Re} = 0.9 \cdot 10^4 ... 1.89 \cdot 10^4$ лежит в диапазоне

$Sh_f = 0.23...0.26$; сила сопротивления, всегда меньшая подъёмной для $\mathrm{Re} = (1.75...2.35)\cdot 10^4$, имеет существенное количество энергии в области низких частот ($Sh_f < 0.1$), в ней присутствуют две преобладающие гармоники, характеризующиеся $Sh_f \approx 0.2$ и $Sh_f \approx 0.2 \times 2$; подъёмная сила имеет преобладающую гармонику, характеризующуюся $Sh_f \approx 0.2$ (хотя повышенное количество энергии содержится и при $Sh_f \approx 0.2 \times 2$); турбулентность оказывает существенное влияние на величины СКО подъёмной силы и особенно силы сопротивления; с ростом числа Рейнольдса (при исследованном докритическом обтекании трубы) вклад срыва вихрей Кармана в гидравлическую силу возрастает. Данные выводы находятся в хорошем соответствии с данными других авторов.

Тестирование предлагаемого алгоритма определения проекций локальной пульсационной силы проводилось путём определения по результатам специальных экспериментов на поперечно обтекаемой одиночной трубе СКО интегральных коэффициентов пульсационной подъёмной силы и силы сопротивления и их сравнения с приводящимися другими авторами. Характерные значения интегрального коэффициента силы сопротивления: 0.09…0.11, интегрального коэффициента подъёмной силы: 0.13…0.18 для $\mathrm{Re} = (1.75...2.35)\cdot 10^4$.

Сравнение показывает завышение коэффициента силы сопротивления на (89…127)% и отличие коэффициента подъёмной силы на (4…54)% (случайный разброс) относительно данных, приведённых Михелем А. и Гейнеке Е., Ченом С. С.. Такие расхождения возможны вследствие разных способов определения силовых коэффициентов по результатам измерения пульсаций давления на поверхности труб пучка (Гейнеке Е и Мор К. одновременно измеряли пульсации давления в 12 точках сечения трубы, с постоянным шагом между точками измерения), индивидуальными различиями в конструкциях и аэродинамических характеристиках стендов, существенными погрешностями измерений. Следует отметить, что данные разных авторов по характеристикам сил как для одиночной трубы, так и для пучка труб, имеют существенный разброс по тем же причинам.

По разработанному алгоритму вычислялись безразмерные спектры проекций гидродинамических сил, действующих на трубы пучка модели №1, и локальные и интегральные коэффициенты подъёмной силы и силы сопротивления. Максимальное различие для ряда С1 для $\overline{C_D'}^{\mathrm{int}}$ и $\overline{C_L'}^{\mathrm{int}}$ составило примерно 5 раз. Максимальное различие для ряда С2 для $\overline{C_D'}^{\mathrm{int}}$ составило 1.2 раза, для $\overline{C_L'}^{\mathrm{int}}$ – 2 раза. Причины таких различий аналогичны причинам расхождения с данными других авторов силовых характеристик для одиночной трубы.

Полученные зависимости безразмерных односторонних спектров мощности локальных пульсационных подъёмной силы и силы сопротивления аппроксимировались полиномиальными зависимостями.

Полученные характеристики гидродинамических сил могут быть использованы в программном коде ViCAN для расчёта вибраций труб парогенераторов.

Основные результаты и выводы:

1. Получена база данных о пульсационных характеристиках течения в трубном пучке, основанная на измерении давления на поверхности труб и кожуха модели, позволившая установить, что основная энергия возбуждения труб потоком связана с турбулентностью течения и низкочастотным возбуждением. Показано, что роль возбуждения за счёт срыва вихрей малосущественна для тесных трубных пучков в исследуемом диапазоне чисел Рейнольдса.
2. Разработана модель расчёта нестационарных гидродинамических сил в тесных трубных пучках, базирующаяся на гипотезе эргодичности течения в пучке, проведена верификация и валидация модели на полученной базе данных для тесных трубных пучков, а также для поперечно обтекаемой одиночной трубы, с использованием известных результатов.
3. Проведено обобщение результатов экспериментов в рамках разработанной модели расчёта нестационарных гидродинамических сил. Представлены зависимости коэффициентов сил и аппроксимированные спектры сил, корреляционные параметры от положения труб в пучке и чисел Рейнольдса течения. Определены максимально нагруженные трубы пучка при различных значениях числа Рейнольдса.
4. Получены новые данные о зависимости гидравлического сопротивления трубных пучков от малого меняющегося от ряда к ряду угла наклона труб к плоскости, перпендикулярной направлению потока, о связи пульсаций давления на поверхности кожуха модели.
5. Полученные характеристики гидродинамических сил использованы в программном комплексе ViCAN для расчёта колебаний трубных пучков парогенераторов проектируемых реакторов, выбора геометрических характеристик и условий закрепления трубных пучков.
6. Предложенные зависимости для спектров сил и корреляционных параметров могут быть использованы в расчётах поперечно обтекаемых трубных пучков с относительными шагами $S_x/d \cong 1.28$, $S_y/d \cong 1.30$ при числах Рейнольдса от $2 \cdot 10^4$ до $6 \cdot 10^4$.

Основные результаты диссертации отражены в следующих работах:

1. Гидродинамика течения в компактном коридорном трубном пучке неподвижных труб/ **В. И. Солонин, В. В. Перевезенцев, Н. Ф. Рекшня** и др.// Гидродинамика и безопасность АЭС: Сб. тез. докл. на отрасл. конф. – Обнинск, 1999. – С. 315 – 317.

2. **Солонин В. И., Шарикпулов С. М.** Обтекание одиночной трубы турбулентным потоком за решёткой// Гидродинамика и безопасность АЭС: Сб. тез. докл. на отрасл. конф. – Обнинск, 1999. – С. 324.

3. **Солонин В. И., Шарикпулов С. М.** Характеристики пульсаций давления при поперечном обтекании компактного коридорного трубного пучка неподвижных труб// Гидродинамика и безопасность АЭС: Сб. тез. докл. на отрасл. конф. – Обнинск, 1999. – С. 325 – 326.

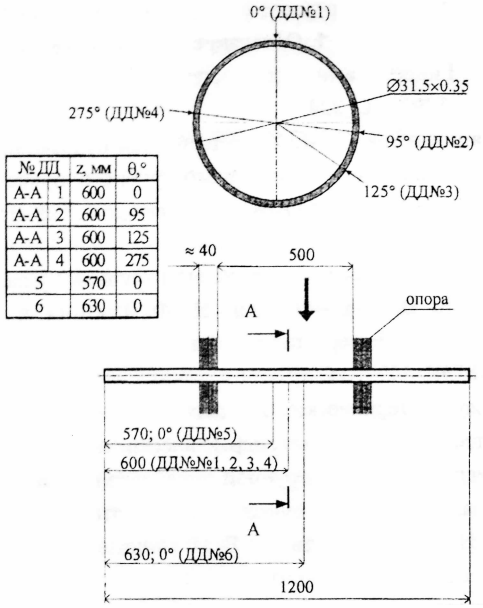
4. Гидродинамика течения в компактном коридорном трубном пучке неподвижных труб/ **В. И. Солонин, В. В. Перевезенцев, Н. Ф. Рекшня** и др.// Научные исследования в области ядерной энергетики в технических вузах России: Сб. науч. тр. – М.: Издательство МЭИ, 1999. – С. 65 – 66.

А также в двух научно-технических отчётах:

5. Теоретические и тестовые анализы гидравлически наводимых вибраций в компактных парогенераторах с трубной навивкой: экспериментальное исследование гидродинамики трубных пучков парогенераторов: Отчёт по проекту (промежуточ.)/ МГТУ. НУК Э; Руководитель **В. И. Солонин**. – №502-96 МНТЦ. – М., 1998. – 179 с.

6. Теоретические и тестовые анализы гидравлически наводимых вибраций в компактных парогенераторах с трубной навивкой: Отчет по проекту (заключ.) / МНТЦ, МГТУ. НУК Э, ОКБМ, НИКИЭТ. ИЦП: Руководитель **В. И. Солонин**. – № 502-96 МНТЦ. – М., 1999. – 119 с.

А–А (увеличено):
стрелками → обозначены места выходов импульсных трубок ДД
№1, №2, №3, №4



№ ДД		z, мм	θ,°
А-А	1	600	0
А-А	2	600	95
А-А	3	600	125
А-А	4	600	275
5		570	0
6		630	0

Рис. 1. Схема измерительного зонда №1 (ДД – датчик давления)

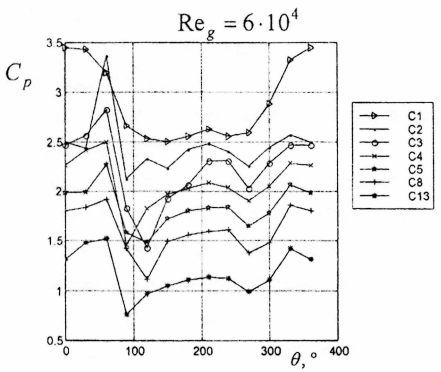


Рис. 2. Распределение коэффициента избыточного среднего давления по периметру труб C1 – C5, C6, C8 ($Re_g = 6 \cdot 10^4$), модель №1

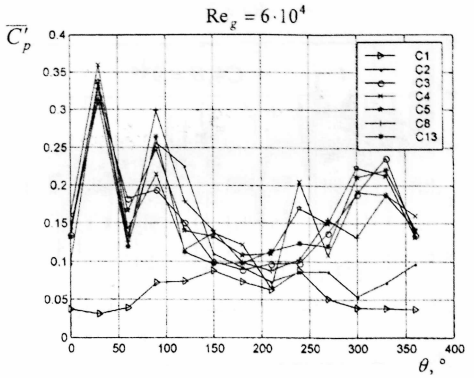


Рис. 3. Распределение СКО коэффициентов пульсаций давления по периметру сечения труб C1 – C5, C8, C13 ($\mathrm{Re}_g = 6\cdot10^4$), модель №1

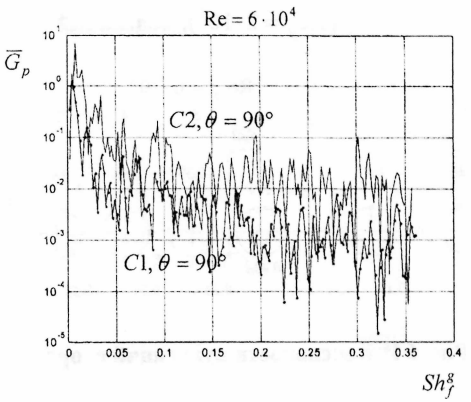


Рис. 4. Безразмерные односторонние спектры мощности пульсаций давления на поверхности труб C1 и C2 в точках, расположенных при $\theta = 90°$ ($\mathrm{Re}_g = 6\cdot10^4$), модель №1

МГТУ
им. Н. Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

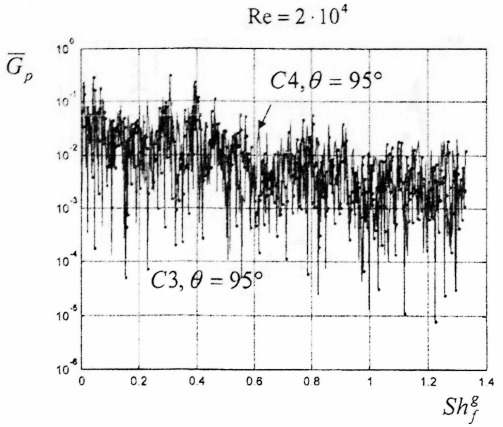


Рис. 5. Безразмерные односторонние спектры мощности пульсаций давления на поверхности труб С3 и С4 в точках, расположенных при $\theta = 95°$ ($\mathrm{Re}_g = 2 \cdot 10^4$), модель №2

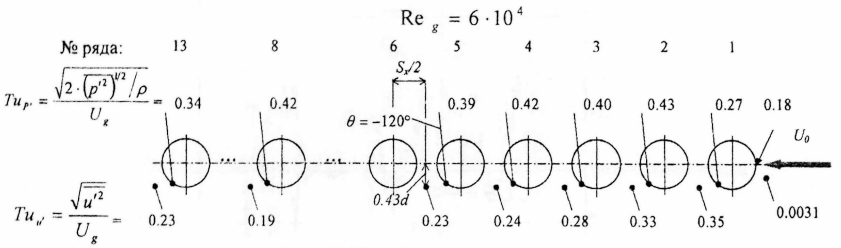


Рис. 6 Интенсивности пульсаций скорости

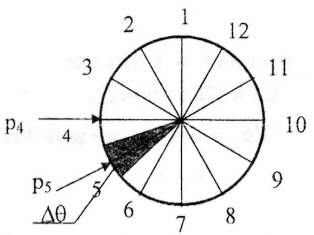


Рис. 7 Точки измерения пульсаций давления

Подписано в печать 28.02.2000г. Формат 60x84/16
Тираж 100 экз. Заказ 44 Объем 1,1 п.л.

ООО «Техполиграфцентр» ПЛД № 53-477 Тел./факс: 151-26-70, 151-26-35