

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВИБРАЦИЙ КОНСТРУКЦИИ, ВЫЗВАННЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИМИ ИСТОЧНИКАМИ

Д. А. Куликов, А. И. Патрушева, М. Ю. Гантман, Е. И. Шмелев

АО «ОКБМ Африкантов», г. Н. Новгород

Введение

Гидродинамические силы, возникающие при обтекании потоком жидкости поверхностей конструкций реакторных установок, приводят к вибрации конструкций. В ряде случаев, например, для пучка труб теплообменного оборудования, топливных сборок, подобные силы могут неблагоприятно сказываться на прочности и усталостной долговечности конструкций. Как следствие, на этапе проектирования данных конструкций целесообразно проводить численные расчеты гидродинамики и вибрации.

В последнее время, с развитием CFD расчетов появились возможности детального изучения процессов обтекания с численными оценками гидродинамических сил, действующих на конструкцию. Решение связанной задачи гидродинамики потока и колебаний конструкции позволит выполнять оптимизацию конструкции, направленной на снижение виброактивности оборудования.

В настоящем докладе приведены результаты расчетно-экспериментальных исследований вибрации на простой геометрической модели плохообтекаемого тела, позволяющей максимально использовать возможности перспективных систем измерений и визуализации потока.

1. Конструкция плохообтекаемого тела.

Принципиальная схема испытательного стенда

Для верификации связанных расчетов гидродинамики и вибрации предлагается следующая конструкция плохообтекаемого тела (рис. 1). Конструкция тела представляет собой полый металлический цилиндр диаметром 7,1 мм с толщиной стенки 0,3 мм. Длина цилиндра – 190 мм. Внутренняя полость цилиндра используется для уменьшения собственной частоты тела, а так же для расположения миниатюрных акселерометров, применяемых для измерения вибрации тела. Внутреннее расположение акселерометров является необходимым условием для того, чтобы не изменялась гидродинамика течения в окрестности тела.

Тело размещалось в прямоугольном канале циркуляционной трассы стенда, через которую был организован поток рабочей среды. В канале испытываемое тело имело одну точку закрепления снизу. Закрепление было жестким.

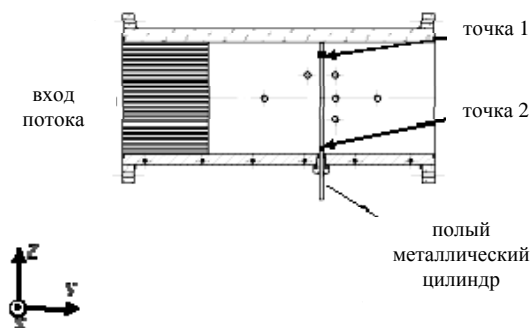


Рис. 1. Конструкция плохообтекаемого тела. Схема расположения точек измерений вибрации

Принципиальная схема стенда приводится на рис. 2.

Стенд состоит из циркуляционной петли с насосом, систем измерения статического давления, пульсаций давления и виброускорений. Изменение расхода обеспечивалось за счет изменения частоты вращения насоса с помощью преобразователя частоты. В качестве рабочей среды стенда использовалась вода. Расход рабочей среды варьировался от 1 до 20 м³/ч.

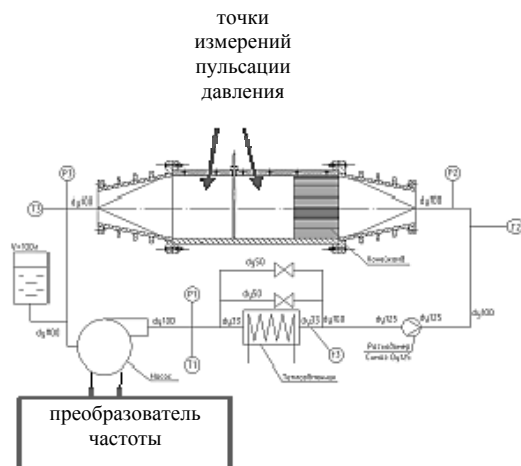


Рис. 2. Принципиальная схема стенда. Схема расположения точек измерения пульсаций давления

В процессе испытаний регистрировались зависимости виброускорений и пульсаций давления от времени. При измерениях был использован следующий комплект аппаратуры:

– акселерометры (вибропреобразователи) AP19 фирмы «ГлобалТест»;

- гидрофоны типа 8103 фирмы «B&K»;
- многоканальный программно-аппаратный комплекс LMS SCADAS Mobile SCM;
- портативный компьютер со специализированным программным обеспечением.

Вибропреобразователи располагались в точках 1 и 2 во внутренней полости тела в направлениях перпендикулярных оси тела (в направлениях X и Y).

Для проведения исследований гидродинамики потока с использованием бесконтактных оптических методов прямоугольный канал, в котором был установлен цилиндр, изготавливался из оргстекла.

Исследования гидродинамики течения осуществлялось с помощью метода измерения полей скоростей, основанного на технологии лазерной подсветки и видеосъемки перемещений специальных частиц-трассеров, находящихся в исследуемом потоке (метод PIV измерений). В качестве лазерной системы применялась система DTL-413, с высокоскоростной камерой Fastec HiSpec 5. Подсветка трассеров в требуемом сечении осуществлялась с помощью лазерного «ножа».

2. Результаты исследований гидродинамики потока в окрестности тела

Для численного определения вибрации тела с консольным креплением на первом этапе проводился CFD расчет обтекания тела. Геометрия канала с цилиндром, представлена на рис. 3.

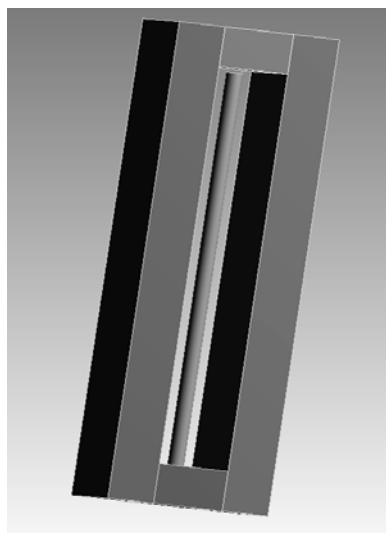


Рис. 3. Геометрическая модель канала

CFD расчет выполнялся в предположении отсутствия влияния колебаний тела на гидродинамику потока. В качестве модели для описания турбулентности рассматривалась LES модель. Время расчета составило порядка 2 с, временной шаг – 0,0001 с. Сетка содержала порядка 7 млн. элементов.

В результате расчета были вычислены поле скорости в непосредственной близости от исследуемого цилиндра, а также поле давления на поверхности

цилиндра и канала. На рис. 4 и рис. 5 представлены профили скорости за цилиндром, полученные расчетным и экспериментальным (с помощью метода PIV) путями при расходе 8 м³/ч. Из рис. 4 и рис. 5 видно, что область с максимальной скоростью потока находится в зазоре между цилиндром и стенкой канала. За испытываемым телом прослеживается структура вихревого потока. Поле скорости, полученное двумя способами, имеет удовлетворительную сходимость.

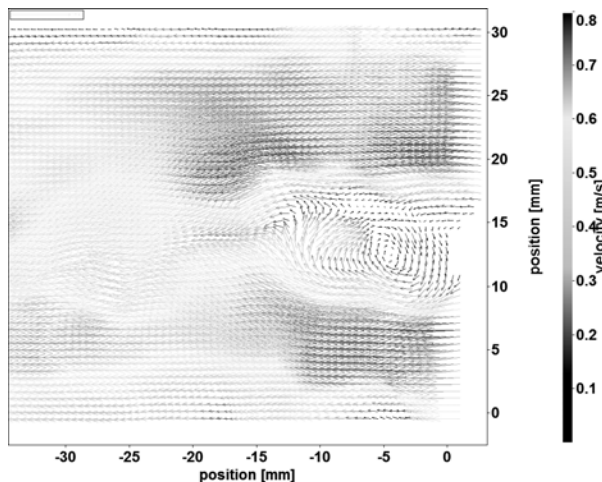


Рис. 4. Мгновенное поле скорости жидкости, полученное методом PIV измерений

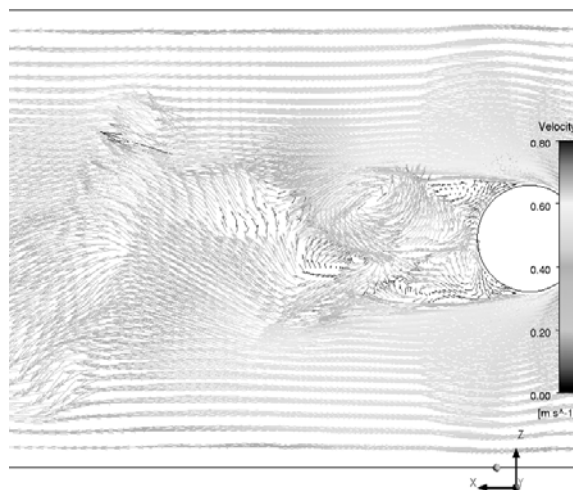


Рис. 5. Мгновенное поле скорости жидкости, полученное с помощью CFD расчета

Также были построены спектры пульсаций абсолютной скорости в точке за цилиндром (см. рис. 6, 7). На спектрах можно выделить частоту срыва вихрей, возникающую при обтекании цилиндра. В расчете при расходе 8 м³/ч данная частота равна 15 Гц, в эксперименте – 13,3 Гц. Разница между экспериментальным и численным значениями может быть объяснена достаточно большим шагом по частоте. Амплитуды пульсаций скорости на данных частотах имеют близкое значение.

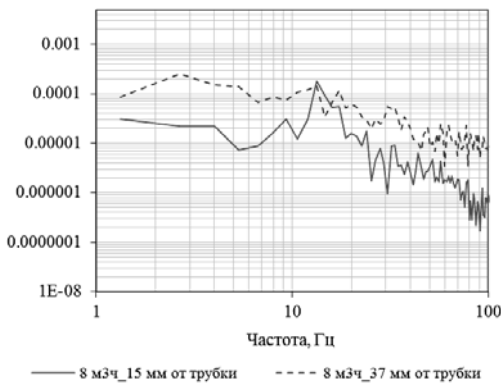


Рис. 6. Спектр пульсаций скорости в точке за цилиндром, полученный при помощи PIV измерений

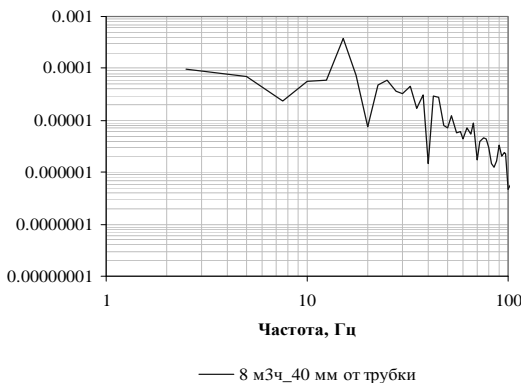


Рис. 7. Спектр пульсаций скорости в точке за цилиндром, полученный при помощи CFD расчета

3. Результаты численного расчета вибрации от гидродинамического воздействия

Конечно-элементная модель для расчета вибрации состояла из тетраэдров. Общее количество структурных элементов – порядка 100 тыс. элементов.

Численный расчет показал, что собственная частота (СЧ) цилиндра в канале с учетом воды составила 69 Гц. Закрепление цилиндра в канале моделировалось как абсолютно жесткое. Результат экспериментального определения собственных частот, полученных при искусственном возбуждении тела на стенде, приводится на рис. 8. Значение первой собственной частоты цилиндра составило 71 Гц, что на 2 Гц выше расчетного значения.

Необходимо отметить, что под действием потока воды колебания конструкции преимущественно происходят на СЧ (рис. 8). На частоте 71 Гц форма колебаний имеет преимущественно изгибный характер с максимальными уровнями вибрации в точке 1. Динамика изменений уровней виброускорений при увеличении расхода с 2 до 10 м³/ч приводится на рис. 9. Как следует из рисунка, увеличение расхода сопровождается ростом уровней вибрации на собственной частоте. Зависимость среднеквадратических значений амплитуды виброускорений в полосе частот от 60 до 80 Гц в точке 1У от расхода рабочей среды приведена на рис. 10. Необходимо отметить, что для данной конструкции плохообтекаемого тела на расходе 10 м³/ч

имеет место резкое увеличение амплитуды вибрации, что, по-видимому, связано с режимом синхронизации гармоники частоты срыва вихрей с собственной частотой цилиндра. Начиная с расхода 10 м³/ч, в спектре пульсаций давления (рис. 11) присутствует частота, значение которой совпадает с собственной частотой испытываемого тела. Следствием синхронизации является существенное увеличение составляющей нестационарной гидродинамической силы на собственной частоте тела и увеличение виброускорений и виброперемещений тела.

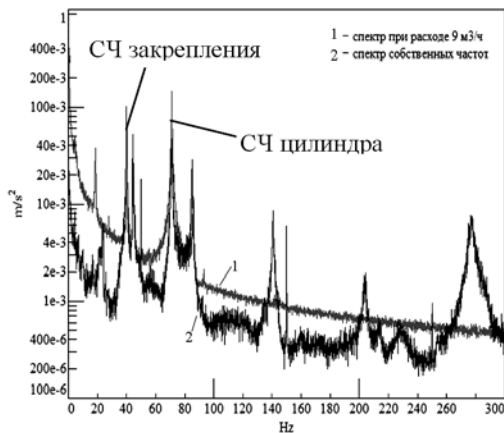


Рис. 8. Спектр уровней в виброускорений в точке 1У при расходе 9 м³/ч и спектр собственных частот

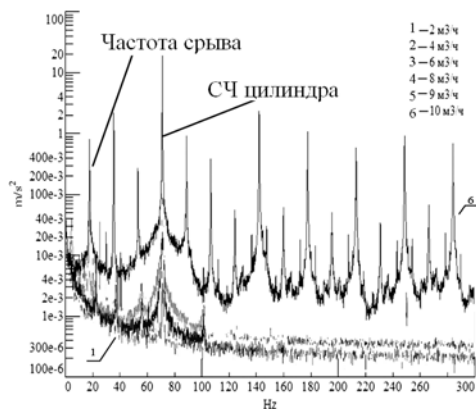


Рис. 9. Спектры уровней виброускорений в точке 1У при расходах 2, 4, 6, 8, 10 м³/ч

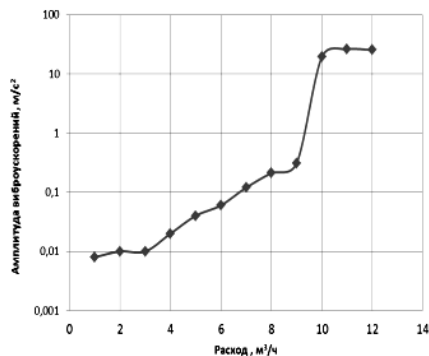


Рис. 10. Зависимость среднеквадратических значений амплитуды виброускорений в полосе частот от 60 до 80 Гц в точке 1У

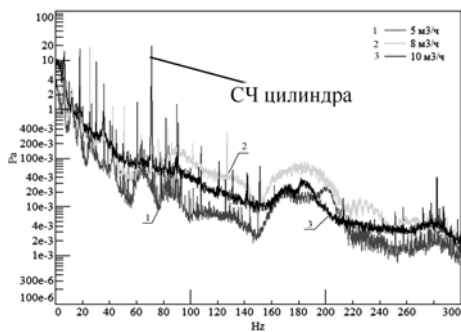


Рис. 11. Спектр среднеквадратических пульсаций давления в точке за телом

Полученные в результате CFD расчетов пульсации давления на поверхности цилиндра и корпуса канала использовались в качестве нагрузки для численного расчета вибрации. В качестве примера на рис. 12 приводится поле давления. Спектр пульсаций давления, полученный расчетным путем при $8 \text{ м}^3/\text{ч}$, в точке на цилиндре представлен на рис. 13. Расчет вибрации проводился в физических координатах в частотной области. Преобразование Фурье выполнялось на этапе передачи данных с CFD сетки на структурную сетку. Данные из узла гидродинамической сетки передавались в ближайший узел, либо несколько узлов структурной сетки. Применяемый в работе метод реализован в специализированном программном обеспечении.

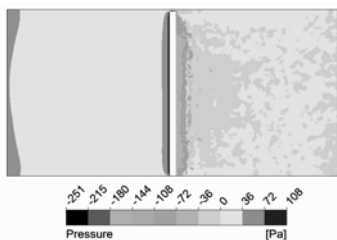


Рис. 12. Распределение давления при обтекании модели тела с консольным креплением, полученное путем CFD расчетов при расходе $8 \text{ м}^3/\text{ч}$

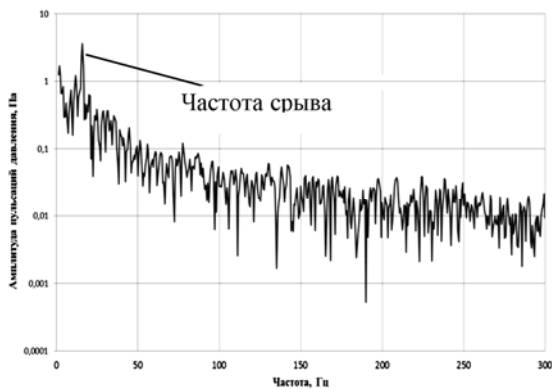


Рис. 13. Спектр среднеквадратических пульсаций давления в точке на поверхности тела

Спектры виброускорений, полученные экспериментальным и расчетным путями для расхода рабочей среды $8 \text{ м}^3/\text{ч}$ изображены на рис. 14.

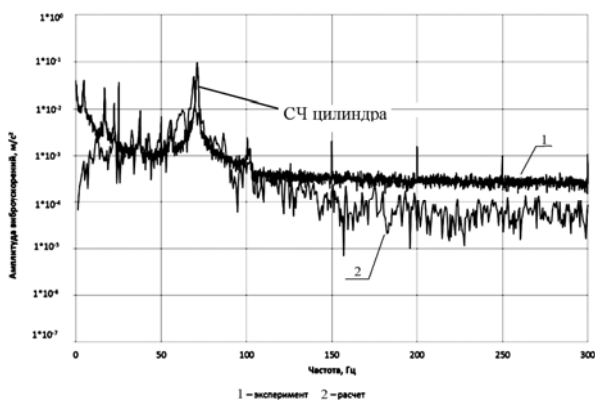


Рис. 14. Спектр уровней виброускорений в точке 1Y при расходе $8 \text{ м}^3/\text{ч}$, полученный расчетным и экспериментальными путями

При низких расходах рабочей среды при условии отсутствия синхронизации частоты срыва вихрей с собственной частотой тела результаты сравнения численных расчетов с экспериментальными данными свидетельствуют об удовлетворительной сходимости. Дополнительная верификация структурной модели, учитывающей реальные условия закрепления цилиндра в канале, позволит улучшить сходимость в низкочастотной области.

Необходимо отметить, что рассматриваемый в работе способ проведения численного расчета вибрации не позволяет выполнить оценки колебаний цилиндра в режиме синхронизации, сопровождающейся взаимным влиянием потока рабочей среды на динамику конструкции.

Выводы

В настоящей работе приведены результаты расчетно-экспериментальных исследований вибрации на простой геометрической модели плохообтекаемого тела. Рассматриваемая конструкция тела обеспечила эффективное возбуждение колебаний поперечным потоком и позволила максимально использовать возможности перспективных систем измерений.

Первые результаты численных расчетов колебаний модели, вызванных потоком, показывают удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными при относительно низких расходах рабочей среды. Дополнительная верификация структурной модели, учитывающей реальные условия закрепления цилиндра в канале, позволит улучшить сходимость в низкочастотной области.

Необходимо отметить, что применяемый в работе метод численного расчета вибрации под действием потока справедлив для режимов с отсутствием синхронизации.

Полученные данные могут быть использованы для дальнейшей верификации связанных расчетов при описании вибрации пучка трубок, обусловленной обтеканием потока в теплообменном оборудовании, топливных сборках.