

УДК: 534.213.4
OECD: 2.03 IU

Оценка возможности моделирования вибро-шумовых характеристик трубопровода и их элементов методом компьютерного моделирования

Ремшев Е.Ю.^{1*}, Павлов А.С.², Храмова Д.А.³, Митчин Н.А.⁴
^{1,4} К.т.н., доцент, ^{2,3} Старший преподаватель
^{1,2,3,4} Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, РФ

Аннотация

В статье рассмотрены основные положения и проблемы при прогнозировании вибро-шумовых характеристик различных элементов трубопроводных систем. Предложен один из возможных путей для последовательного решения задач по расчету параметров гидродинамического и акустического шума как в самом трубопроводе, так и в окружающей его зоне. Для исследования вибро-шумовых характеристик трубопроводных систем рекомендовано на основе платформы Ansys Workbench использовать связку модулей Fluent, Modal (Modal Acoustics) и Harmonic Responce (Harmonic Acoustics). Представлены результаты компьютерного моделирования для элементов трубопроводов, таких как труба с фланцем, колено, трубопровод переменного сечения и т.д. Отмечено, что результаты моделирования имеют высокую сходимость с натурными испытаниями.

Ключевые слова: трубопровод, вибрации, шум, прогнозирование, компьютерное моделирование.

Evaluation of the possibility of modeling the vibration-noise characteristics of the pipeline and their elements by the method of computer simulation

Remshev E.Yu.^{1*}, Pavlov A.S.², Khramova D.A.³, Mitchin N.A.⁴
^{1,4} Ph.D., assistant professor, ^{2,3} Senior lecturer,
^{1,2,3,4} Baltic State Technical University 'VOENMEH' named after D.F. Ustinov, Saint-Petersburg, Russia

Abstract

The article discusses the main provisions and problems in predicting the vibration and noise characteristics of various elements of pipeline systems. One of the possible ways for the sequential solution of problems of calculating the parameters of hydrodynamic and acoustic noise both in the pipeline itself and in the surrounding area is proposed. To study the vibration and noise characteristics of pipeline systems, it is recommended to use a combination of Fluent, Modal (Modal Acoustics) and Harmonic Responce (Harmonic Acoustics) modules based on the Ansys Workbench platform. The results of computer simulation for pipeline elements, such as a pipe with a flange, an elbow, a pipeline of variable cross-section, etc. are presented. It is noted that the simulation results have a high convergence with field tests.

Keywords: pipeline, vibration, noise, predicting, computer simulation

Введение

Прогнозирование вибро-шумовых (ВШХ) различных технических устройств, как правило, представляет собой сложную задачу, решение которой находится в сочетании теоретических и экспериментальных исследований.

ВШХ являются для технических устройств нормируемыми величинами, определяющими текущее состояние исследуемого объекта, переходные процессы, происходящие в нем, степень соответствия устройства его целевому назначению. Для трубопроводной арматуры ВШХ определяют пригодность применения устройств.

В вопросах прогнозирования и экспериментального подтверждения ВШХ основными способами исследований являются, со второй половины 20-го века, теоретические основы общей акустики, гидродинамики, виброметрии. Наиболее общие исследования в области гидродинамики, акустики различных сред, виброметрии были выполнены известными учеными как в Советском Союзе, так и за рубежом [1-9].

1. Гидродинамические исследования явлений в трубопроводной арматуре

Источниками акустического шума могут служить любые колебания в твёрдых, жидких и газообразных средах; в технике основные источники шума — различные двигатели и механизмы. Источниками шума на производстве является транспорт, технологическое оборудование, системы вентиляции, пневмо- и гидроагрегаты, а также источники, вызывающие вибрацию. Понятие вибрация тесно связано с понятиями шум и звук [1-3].

Источником гидравлического шума (ГДШ) является нерегулярный и флутующий поток жидкости. Флуктации давления, связанное с нерегулярным потоком, могут проявляться непосредственно в виде звука на некотором расстоянии или же, что более существенно, вызывать вибрацию [5-6]. Вид гидродинамического шума, называемый шумом потока, возникает при обтекании гладких тел или полостей потоком вязкой жидкости, к которой можно отнести воду. Шум потока может излучаться непосредственно или путем возбуждения потоком колебаний элементов, частей конструкции соприкасающихся с потоком.

Второй процесс – возбуждение потоком колебаний элементов конструкции зависит от: 1) параметров флуктации давления в турбулентном слое, 2) местной чувствительности элементов конструкции к этим флуктациям, 3) излучения звука сопряженными вибрирующими элементами конструкции.

Существующие аналитические методы расчета содержат большое количество ограничений, упрощений, эмпирических поправок и позволяют качественно описывать процессы лишь в линейной постановке для областей простой формы. Использование их для количественного описания процессов в сложных трубопроводных системах, предназначенных в т.ч. для работы в импульсных режимах, крайне затруднительно. Усложняет задачу и анализ систем, требующих проведения связанного междисциплинарного анализа (исследования в области гидродинамики, акустики, механики деформируемого твердого тела).

Создание перспективных систем, поиск научно-технических решений в короткие сроки на начальном этапе проектирования, а также минимизация затрат на разработку, проведение лабораторных исследований и натурных испытаний требуют новых решений и подходов. К таким решениям можно отнести проведение вычислительного эксперимента с использованием САЕ-систем инженерного анализа, реализующих универсальные численные методы решения уравнений математической физики. Особое распространения

в задачах вычислительной гидрогазодинамики получил метод конечных объемов (МКО).

2. Моделирование уровня ВШХ трубопроводной арматуры методом компьютерного моделирования

Вычислительная гидрогазодинамика (CFD) в ANSYS представлена модулями Ansys Fluent и Ansys CFX, объединенными в единую оболочку подготовки расчетной модели и обработки результатов Fluid. Обе платформы позволяют использовать для расчета формулировку МКО на структурированных и неструктурированных сетках. Расчетная схема может быть расширена расчетными эмпирическими и физическими моделями шума, позволяющими рассчитывать как уровень акустической мощности, так и уровень звукового давления на заданном расстоянии. Эмпирические методы основаны на эмпирических соотношениях или на решении осредненных по Рейнольдсу стационарных уравнений Навье-Стокса (RANS) вместе со специальными эмпирическими моделями источников звука. Использование таких методов в сложных неизученных процессах течения крайне затруднено. Физические методы расчета шума основаны на прямом численном моделировании (DNS), методе моделирования вихрей (LES) и совместных RANS/LES методах. В качестве расчетных подходов применяют и методы прямого моделирования, и интегральные методы. При использовании прямых методов в рамках единой системы газодинамических уравнений происходит совместный расчет генерации шума турбулентным потоком жидкости и распространения звуковых волн до границ контрольной поверхности. При использовании интегральных методов расчет турбулентного течения и распространения шума выполняются отдельно. Информация о характеристиках флуктуирующего потока сохраняется на контрольных поверхностях, затем производится расчет распространения звука до границ расчетной области с использованием интегральных формулировок. Такой подход наиболее актуален при анализе шумовых характеристик на значительных расстояниях от источника звука. Очевидно, что первый подход, основанный на методах прямого моделирования, для обеспечения устойчивости численного решения, предъявляет повышенные требования к пространственной дискретизации исследуемой области и, как следствие, к затрачиваемым вычислительным ресурсам. Второй подход этого недостатка лишен. К таким методам можно отнести метод Кирхгофа и метод Фокса Вильямса-Хокинса, позволяющий размещать контрольную поверхность около границ области с выраженными турбулентными пульсациями.

2.1. Предлагаемая последовательность решения задач

Для анализа задач исследования вибро-шумовых характеристик трубопроводных систем рекомендуется на основе платформы Ansys Workbench использовать связку модулей Fluent, Modal (Modal Acoustics) и Harmonic Responce (Harmonic Acoustics), а также интеграции ее с системами автоматического проектирования или другими САЕ-системами (в т. ч. с системами MathCad или Matlab /Simulink).

Первым этапом предлагается проводить анализ параметров распределения ГДШ изделия, предположим крана, в программном пакете Ansys Fluent. Этот этап требуется условно разделить на два подэтапа (расчета): 1) На первом подэтапе выполняется расчет элемента трубопровода в стационарной постановке с турбулентным режимом течения рабочей среды. Задача предварительного гидродинамического анализа заключается в оценке акустического воздействия турбулентного потока воды на внутренние стенки кингстона в стационарной постановке и выбор расчетной схемы для нестационарного моделирования. 2) Второй подэтап – проведение нестационарного численного моделирования течения воды через клапан и оценка турбулентных пульсаций

на внутренних стенках клапана с последующим определением на них акустического воздействия в заданном в ТЗ частотном диапазоне.

Следующий этап заключается в моделировании корпуса кингстона и подходящих к нему труб с опорами. На внутренние поверхности кингстона прикладывается нагрузка (давление), полученное на предыдущем этапе. Анализ проводится в модуле Harmonic/Modal и позволяет вычислить:

- Распределение уровней звукового давление в корпусе трубопроводного элемента;
- Значение вибраций на фланцах изделия.

Распределение уровней звукового давления в корпусе элемента необходимо для последующего анализа уровня воздушного шума.

Окончательный этап представляет собой создание модели воздушного объема с вырезанной из центральной части исследуемой геометрии. К наружным поверхностям прикладывается акустическая нагрузка, полученная на предыдущем этапе, и, тем самым, создается (задается) акустический источник. Анализ проводится в модуле Acoustic и позволяет вычислить искомые параметры.

2.2. Результаты расчетов вибро-акустических параметров

Ниже представлены (рис. 1-3) результаты проведения вычислительного эксперимента для различных типах трубопроводных элементах (краны, трубопровод-колени и т.д.) в соответствии с предлагаемыми этапами решения задач.

Опыт применения предлагаемой методики оценки вибро-акустических параметров трубопроводной арматуры показывает, что отклонение составляет не более 20 %, расчетные характеристики превышают экспериментальные, получаемые по специализированной методике [11], в диапазоне от 5 до 1000 Гц. Характер распределения уровней шумовых характеристик по расчетным и экспериментальным данным подобен.

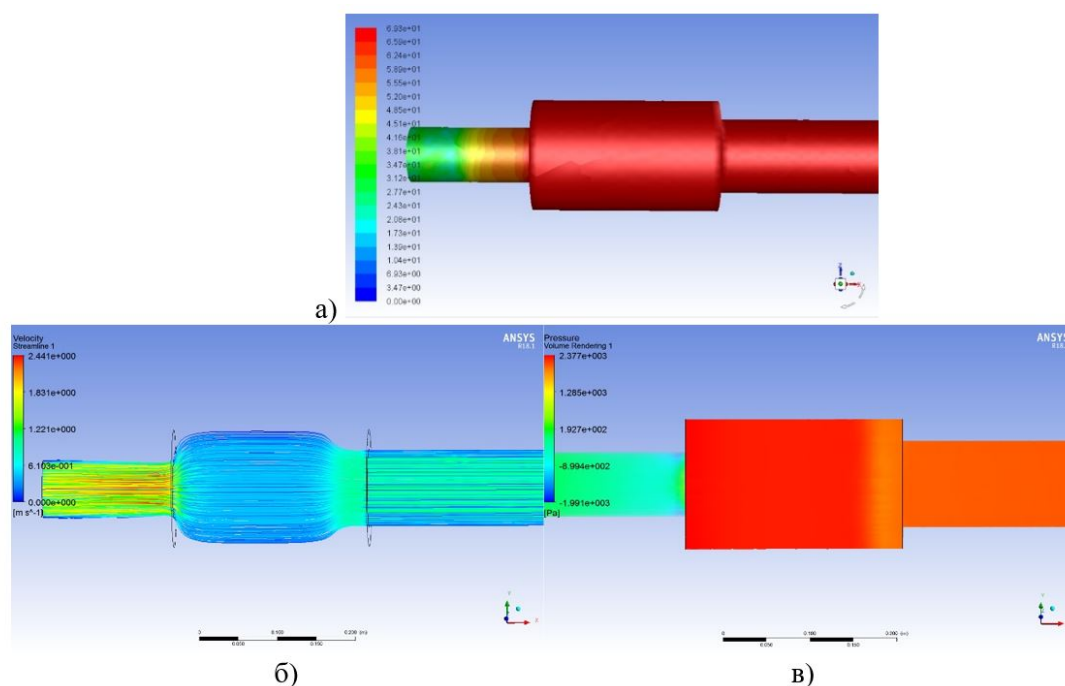


Рис. 1. Характер распределения: а - уровня звукового давления, б - линий тока и в - давлений трубы произвольной формы

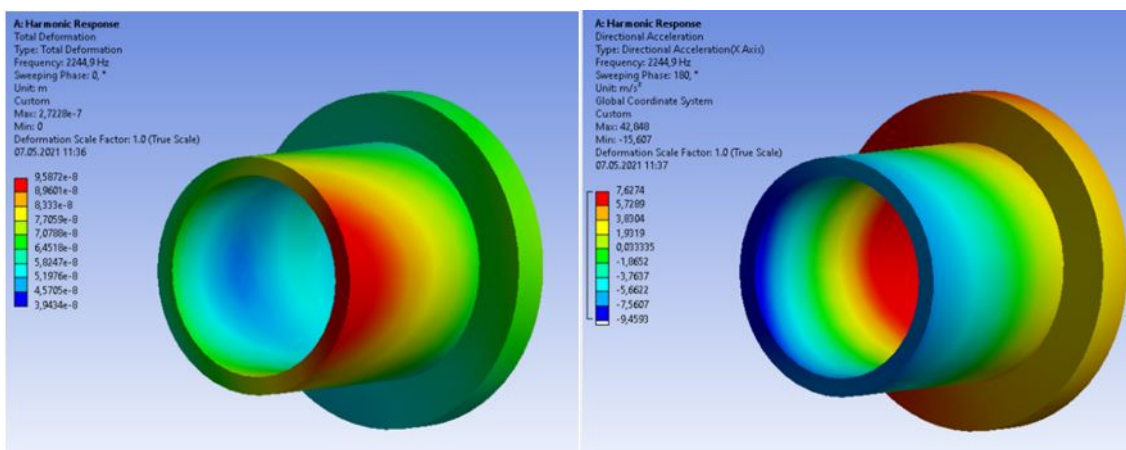


Рис. 2. Расчет амплитуды колебаний при заданном акустическом давлении

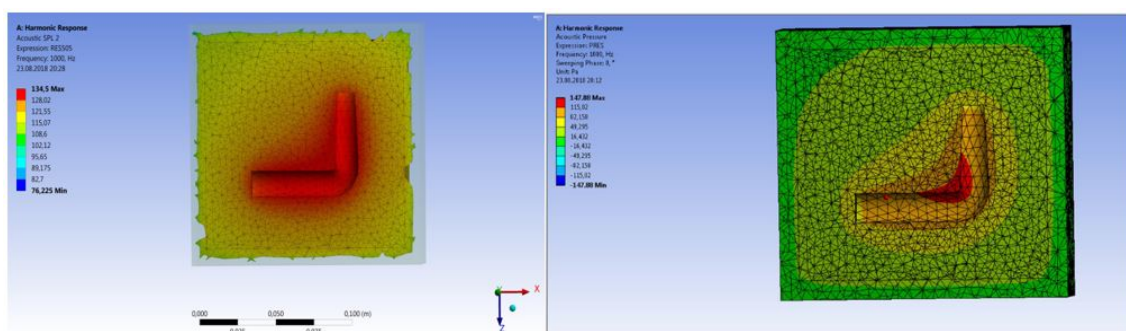


Рис. 3. Распределение звукового давления от возбужденного трубопровода

Заключение

Предлагаемая методика расчета гидродинамического шума, вибраций, вызванных протекающим потоком и акустического шума, генерируемого гидродинамическим шумом, передаваемым в воздух материалом трубопроводного элемента позволяет на стадии проектирования новых трубопроводных систем оценивать и прогнозировать их вибро-шумовые характеристики, выбирать наиболее оптимизированные варианты конструкций без предварительных трудоемких экспериментальных исследований.

Список литературы

1. Тэйлор Р. Шум. Пер. с англ. Д. И. Арнольда. Под ред. М. А. Исаковича. М, «Мир», 1978. 308 с. с ил.
2. Crocker M.J., Arenas J.P. Engineering Acoustics: Noise and Vibration Control // Wiley, 2021. — 785 p. — (Wiley Series in Acoustics Noise and Vibration). — ISBN 9781118496428.
3. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. / Ред. совет: В41 В. Н. Челомей (пред.). — М.: Машиностроение, 1978— Т. 1. Колебания линейных систем/ Под ред. В.В. Болотина. 1978. 352 с, ил.
4. Физическая энциклопедия/Гл. ред. А. М. Прохоров. Ред. кол. Д. М. Алексеев, А. М. Балдин, А. М. Бонч-Бруевич, А. С. Боровик-Романов и др.—М.: Сов.энциклопедия. Т. II. Добротность—Магнитооптика. 1990. 703 с, ил. ISBN 5-85270-061-4
5. Роберт Дж. Урик. Основы гидроакустики. Судостроение. 1978 г

6. Фирсов Ю. Г. «Основы гидроакустики и использования гидрографических сонаров» — СПб.: Нестор-История, 2010. — 348 с. ISBN 978-5-98187-644-8.
7. Справочник о технической акустике. М. Хекл и Х.А. Мюллер, Судостроение, 1980 г.
8. М.А. Исакович. Общая акустика, Наука, Москва, 1973 г.
9. А.С. Вольмир. Оболочки в потоке жидкости и газа, Наука, 1976 г.
10. Куличкова Е.А. Снижение импульсной вибрации трубопроводной арматуры // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2016. Т. 15, №2. С. 145-151. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-2-145-151
11. Методика контроля импульсной вибрации арматуры и гидравлической аппаратуры на заводских стендах (МКИВС-95А). СПб.: ЦНИИ им. академика А. Н. Крылова, 1995. 13 с.

References

1. Taylor R. Noise. Per. from English D.I. Arnold. Ed. M. A. Isakovich. M, "Mir", 1978.308 p. with silt.
2. Crocker M.J., Arenas J.P. Engineering Acoustics: Noise and Vibration Control // Wiley, 2021. - 785 p. - (Wiley Series in Acoustics Noise and Vibration). - ISBN 9781118496428.
3. Vibrations in Technology: A Handbook. In 6 volumes / Ed. advice: B41 V.N. Chelomey (previous). - M.: Mashinostroenie, 1978 - Т. 1. Oscillations of linear systems / Ed. V.V. Bolotin. 1978. 352 p, ill.
4. Physical encyclopedia / Ch. ed. A.M. Prokhorov. Ed. count D.M. Alekseev, A.M. Baldin, A.M. Bonch-Bruevich, A.S. Borovik-Romanov et al. - M.: Soviet encyclopedia. Т. II. Quality factor — Magneto-optics. 1990.703 s, ill. ISBN 5-85270-061-4
5. Robert J. Urik. Fundamentals of hydroacoustics. Shipbuilding. 1978 year
6. Firsov Yu. G. "Fundamentals of hydroacoustics and the use of hydrographic sonars" - SPb.: Nestor-History, 2010. - 348 p. ISBN 978-5-98187-644-8.
7. Handbook of technical acoustics. M. Heckl and H.A. Müller, Shipbuilding, 1980
8. M. A. Isakovich. General acoustics, Nauka, Moscow, 1973
9. A.S. Volmir. Shells in the flow of liquid and gas, Science, 1976
10. Kulichkova E.A. Reducing impulse vibration of pipeline fittings // Bulletin of the Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolev (National Research University). 2016.Vol. 15, No. 2. S. 145-151. DOI: 10.18287 / 2412-7329-2016-15-2-145-151
11. Methods for monitoring impulse vibration of fittings and hydraulic equipment at factory stands (MKIVS-95A). SPb.: TsNII im. Academician A. N. Krylov, 1995.13 p.