

УДК 534.29

Численно-экспериментальное моделирование стоячих волн в жидкости

Кожарин Николай Юрьевич^()*

negesti@mail.ru

Павлов Григорий Иванович

pavlov16@mail.ru

Степанов Роман Валерьевич

sroma6415@gmail.com

КНИТУ-КАИ им. А.Н.Туполева, Казань, Россия

Аннотация. Физические явления, обусловленные интерференцией акустических волн, находят широкое практическое применение в различных областях. Особый интерес вызывают стоячие волны. В отличие от бегущей волны при которой энергия переносится вдоль направления распространения, в стоячей волне перенос энергии отсутствует. В результате вдоль распространения волны образуются зоны повышенного (пучности) и пониженного (узлы) акустического давления в среде. Данное явление применяется в частности в космической индустрии для манипуляции объектами в условиях микрогравитации на станциях. В производстве: применяется для создания композитов без физического контакта, улучшая качество материалов. Применение стоячих волн перспективно в экологических технологиях для очистки воздуха и воды от загрязнителей. В работе представлено описание экспериментального стенда, вычислительной модели на базе Comsol Multiphysics, методики выполнения экспериментов и краткий анализ полученных результатов.

Ключевые слова: стоячие волны, пузырьки газа, численное моделирование стоячих волн

Numerical and experimental modeling of standing waves in a liquid

Kozharin Nikolay Yurievich^()*

negesti@mail.ru

Pavlov Grigoriy Ivanovich

pavlov16@mail.ru

Stepanov Roman Valeryevich

sroma6415@gmail.com

KNRTU—KAI named after A.N. Tupolev, Kazan, Russia

Abstract. The physical phenomena caused by the interference of acoustic waves find wide practical application in various fields. Standing waves are of particular interest. Unlike a traveling wave, in which energy is transferred along the direction of propagation, there is no energy transfer in a standing wave. As a result, zones of increased (antinodes) and decreased (nodes) acoustic pressure in the medium are formed along the wave propagation. This phenomenon is used in particular in the space industry to manipulate objects in microgravity at stations. In production: it is used to create composites without physical contact, improving the quality of materials. The use of standing waves is promising in environmental technologies for purifying air and water from pollutants. The paper presents a description of an experimental stand, a computational model based on Comsol Multiphysics, a methodology for performing experiments, and a brief analysis of the results obtained.

Keywords: standing waves, gas bubbles, numerical simulation of standing waves

Введение. Одним из основных путей обеспечения надежной, экономичной и безаварийной работы гидравлических систем является предупреждение и устранение колебаний, возникающих в результате периодического характера работы нагнетательных установок, изменение режима их работы, срабатывания запорной аппаратуры, аварийных отключений электропитания и ошибочных действий обслуживающего персонала. Например, колебания давления могут нарушить работу элементов автоматики, расходомеров [1–3] или явиться причиной нарушений линейности статических характеристик гидравлических узлов систем автоматического регулирования паровых и газовых турбин [4]. Однако возникновение стоячих волн в гидравлических трактах помимо негативного эффекта так же имеют прикладное промышленное применение. В этой связи актуальным является вопрос о методах и способах управления энергией стоячей волны.

Методы и материалы. В условиях учебно-исследовательского центра КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева (г. Казань) проводятся эксперименты по изучению образования стоячих волн в жидкости под действием вибраций. Цель исследований — визуализировать возникновение стоячей волны в лабораторных условиях с численным моделированием наблюдаемых процессов. Эксперименты проводились на специально сконструированном стенде с проведением фотофиксации. Общий вид экспериментального стенда приведен на рис. 1.

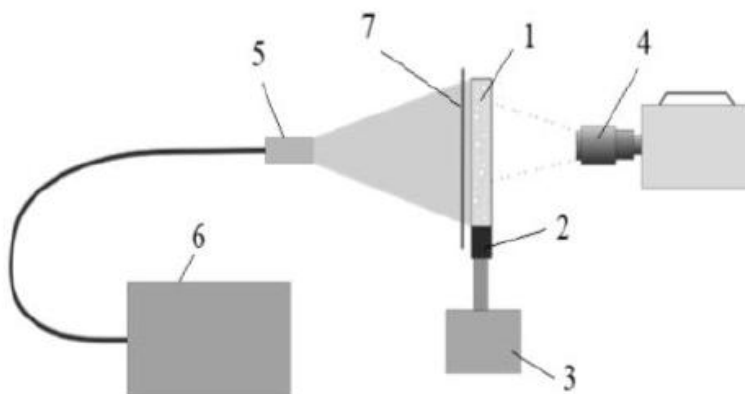


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального стенда:

Стенд включал в себя следующие основные элементы: 1 — объект исследования, стеклянная труба с одним открытым концом; 2 — поршень; 3 — вибростол; 4 — скоростная кинокамера; 5 — источник лазерной подсветки; 6 — блок генератора лазерного излучения; 7 — матовый экран

В целях визуализации поведения акустической волны в столб жидкости осуществлялась подача газа из баллона со сжатым газом, обработка результатов экспериментов выполнялась на персональном компьютере. В качестве газа использовался инертный газ — азот. Предполагается, что исследуемая труба является акустическим контуром — четвертьволновым резонатором, на одном конце которой (закрытом) происходит жесткое отражение, на открытом конце — мягкое. Визуализация стоячих волн осуществлялась при ча-

стоте вибраций 200 Гц и амплитуде сигнала 400 мВ. Данные условия были подобраны опытным путем и наиболее явно отражали возникновение пучностей и узлов по высоте столба жидкости. Опыты проведены при различном газосодержании среды, что позволило судить не только о картине образования стоячей волны при различной скорости среды, но и о влиянии газосодержания на наблюдаемые процессы.

Численное моделирование выполнено на базе специализированного программного комплекса Comsol Multiphysics, модуль акустики давления в частотной области (acpr). Данный модуль используется для вычисления изменений давления при распространении акустических волн в жидкостях в фоновых условиях покоя. На базе указанного модуля построены различные примеры задач визуализации стоячих волн, в частности [5]. Физический интерфейс решает уравнение Гельмгольца в частотной области для заданных частот [5]:

$$\nabla * \left(-\frac{1}{\rho_c} (\nabla p_t - q_d) - \frac{k_{eq}^2 p_t}{\rho_c} \right) = Q_m; \quad (1)$$

$$p_t = p + p_b;$$

$$k_{eq}^2 = \left(\frac{\omega}{c_c} \right)^2;$$

$$c_c = c; \rho_c = \rho,$$

где q_d — дипольный источник, Н/м³; Q_m — монополярный источник, 1/с²; k — волновое число, 1/м; ω — круговая скорость (циклическая) = $2\pi f$; c — скорость звука в среде, м/с; ρ — плотность среды, кг/м³.

В качестве граничных условий заданы:

на стенке: Sound Hard Boundary (Wall) — звуковая жесткая граница (стена) добавляет граничное условие для звуковой твердой границы или стены, которая является границей. Аналог стены. На границе с таким условием нормальная компонента скорости равна нулю;

с открытого конца трубы: Sound Soft Boundary — звуковая мягкая граница добавляет граничное условие для звуковой мягкой границы, где акустическое давление исчезает: $p_t = 0$. Это подходящее приближение для границы раздела жидкость-газ.

с закрытого конца трубы: Normal Acceleration — Нормальное ускорение. Представляет внешний источник звука. Опытное значение виброускорения поршня, измеренное переносным виброметром, составило 101,8 м/с². Это значение принято в качестве расчетного.

Исходными данными для выполнения расчета в модели являются: газосодержание среды (%), скорость звука в среде (м/с), высота столба жидкости (м) и значение ускорения (м/с²).

Скорость звука в среде определялась расчетным способом по формуле [6]:

$$c_m^2 = \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{c_2^2}{\varphi(1-\varphi)}, \quad (2)$$

где c_m — скорость звука в пузырьковой среде; C_2 — скорость звука в воздухе, принято 343 м/с; ρ_2 — плотность воздуха, принято 1,3 кг/м³; ρ_1 — плотность воды, принято 1000 кг/м³; φ — объемное содержание воздуха в пузырьковой среде, %.

Газосодержание φ в условиях опытов определялось по разнице уровня жидкости без подачи пузырьков газа и уровня при условии подачи газа. При известных габаритах стеклянной колбы рассчитывался объем газопузырьковой жидкости. Полученные результаты соотносились к объему чистой воды без подачи пузырьков.

Результаты. В ходе экспериментов осуществлена фотофиксация столба жидкости в трубе при различном газосодержании φ , %. Частота вибраций и амплитуда сигнала при этом обставились низменными: 200 Гц и 400 мВ. Результаты фотофиксации представлены на рис. 2.

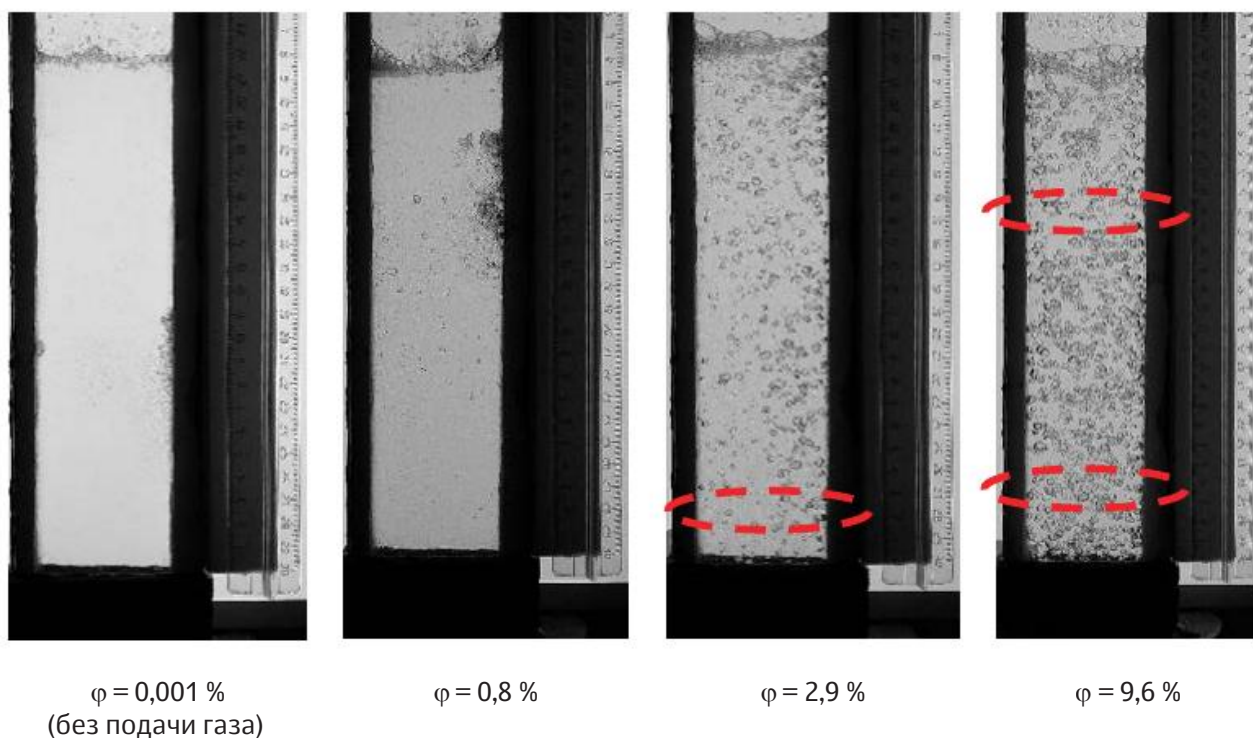


Рис. 2. Результаты фотофиксации эксперимента

Обсуждение полученных результатов. Классическая стоячая волна из учебников — картина, возникающая при интерференции двух бегущих волн одинаковой частоты, распространяющихся навстречу друг другу. В этом случае действительно образуется стоячая волна только на одной частоте — одной гармонике. Ее профиль синусоидален, все точки колеблются синфазно, а узлы неподвижны. В реальных резонаторах колебания обычно состоят из множества собственных мод (стоячих волн с разными частотами). Эти моды часто кратны основной частоте и называются гармониками.

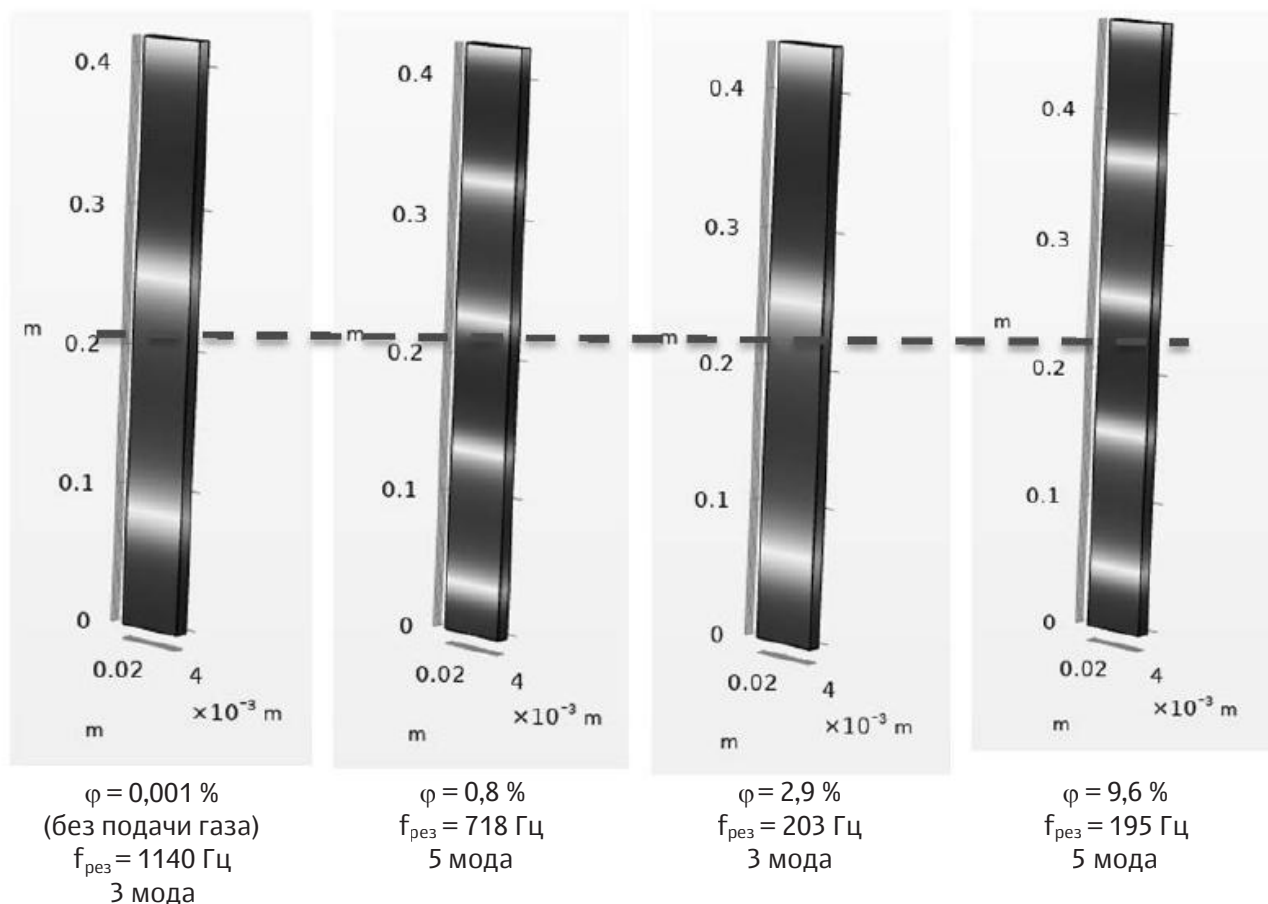


Рис. 3. Результаты численного моделирования (выше красной пунктирной линии — это видимая часть трубы, запечатленная на рис.2. Ниже это скрытая, не прозрачная часть трубы — на снимках рис.2 отсутствует). Источник вибраций расположен в основании трубы

Частоты основного и последующих тонов собственных колебаний столба жидкости в трубе можно определить по выражению [7]

$$f = (2n - 1) \frac{C}{4L}, \quad (3)$$

где n — номер гармоники; C — скорость звука в среде, м/с; L — длина трубы, м.

Так в условиях отсутствия подачи пузырьков газа явно проявляется третья гармоника (1140 Гц) основной частоты колебаний (228 Гц). Это подтверждается как визуальной картиной положения пузырьков, так и результатами численного расчета. Важно обратить внимание, что пузырьки газа не подавались: запечатленные на снимке пузырьки газа — это газ, содержащийся в исходной воде, который под действием акустического давления сконцентрировался в узлах стоячей волны. Данное явление может иметь важное практическое применение.

На других фотоснимках так же можно сопоставить картину численного моделирования расположения узлов давления стоячей волны и результатов натурного эксперимента. Однако, с увеличением газосодержания энергия волны рассеивается, снижается скорость распространения волны и в большей

степени проявляются гармоники близкие к вынужденной частоте колебаний (200 Гц).

Заключение. В результате выполнения эксперимента, путем подачи пузырьков газа в жидкость, получена визуальная картина стоячей волны в условиях лабораторного стенда. Наличие наложения волн с возникновением стоячей волны подтверждается результатами численного моделирования. Зафиксировано важное с практической точки зрения явление — газ содержащийся в исходной воде под действием акустического давления скапливается в узлах стоячей волны.

Список источников

- [1] Роскин А. Устройства для стабилизации колебаний давления и расхода в тепловых сетях. *Новости теплоснабжения*, 2004, № 2, 42 с.
- [2] Сунарчин Р.А., Машков М.А., Матросов А.В. Неустойчивость и автоколебания в гидравлических следящих приводах. *Динамика и виброакустика*, 2018, т. 4, № 3, с. 16–25.
- [3] Устьянцева О. Погрешности измерений расхода воды. *Мир измерений*, 2008, № 9, с. 49–50.
- [4] Чернявский Л. *Автоматическое регулирование паровых и газовых турбин: повышение надежности и точности систем с проточными гидроусилителями*. Санкт-Петербург, Энерготех, 2003.
- [5] Muñoz-Pérez F.M., Castro-Palacio J.C., Giménez M.H., Monsoriu J.A. Visualizing acoustic levitation with COMSOL Multiphysics and a simple experimental setup. *Computer Applications in Engineering Education*, 2024, vol. 32, no. 3, pp. 1–13.
- [6] Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г., Шрейбер И.Р. *Волновая динамика газо- и парожидкостных сред*. Москва, Энергоатомиздат, 1990, 248 с.
- [7] Яворский Б.М., Детлаф А.А., Лебедев А.К. *Справочник по физике для инженеров и студентов вузов*. Москва, Оник, 2006, 571 с.