

Для вытяжки напряжение σ_z является средним для всего очага деформации и по гипотезе максимальных касательных напряжений не оказывает влияния на условие перехода в пластическое состояние.

Уравнение пластичности в приведенном выше написании совместно с уравнением (1) позволяет получать решения, более точно отражающие действительность при значительно меньших относительных радиусах кривизны срединной поверхности, по сравнению с решениями, в которых уравнение пластичности соответствует плоскому напряженному состоянию.

Библиографические ссылки

1. **Сторожев М. В.** Основы теории обработки металлов давлением / М. В. Сторожев. – М., 1959. – 539 с.
2. **Попов Е. А.** Основы теории листовой штамповки / Е. А. Попов. – М., 1968. – 283 с.

Надійшла до редколегії 29.06.2016

УДК 534-6

Г. И. Сокол, В. Ю. Котлов, К. С. Щербина

Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В РУПОРЕ НА ИНФРАЗВУКОВЫХ ЧАСТОТАХ

В данной работе путем измерений экспериментально получены амплитудно-частотные характеристики функций колебательной скорости, звукового давления и фазовых соотношений между ними в горле рупора катеноидальной формы на инфразвуковых частотах. Анализ полученных результатов позволил выявить резонансные явления и определить их частоты.

Ключевые слова: акустические колебания, инфразвук (ИЗ), рупор, катеноидальная форма, эксперимент, резонансные явления.

В цій роботі шляхом вимірювань експериментально отримано амплітудно-частотні характеристики функцій коливальної швидкості, звукового тиску і фазових відношень між ними в горлі рупору катеноїдальної форми на інфразвукових частотах. Аналіз отриманих результатів дозволив виявити резонансні явища та визначити їх частоти.

Ключові слова: акустичні коливання, інфразвук (ІЗ), рупор, катеноїдальна форма, експеримент, резонансні явища.

In this paper, the experimentally obtained by measuring the amplitude and frequency characteristics of the functions of the vibration velocity, of sound pressure and phase relationships between them in the throat of the kathenoid form horn on infrasonic frequencies. Analysis of the results revealed a resonance phenomenon and determine their frequency.

Keywords: acoustic vibrations, infrasound (IS), horn of the kathenoid form, experiment, resonance phenomena.

Введение. Актуальность настоящей работы определяется возросшим интересом ученых к акустическим сигналам на инфразвуковых (ИЗ) частотах. Инфразвук – важный индикатор приближающихся природных катастроф: торнадо, тайфунов, землетрясений [12].

В приборах, улавливающих инфразвуковые сигналы, часто используются рупора. Например, известен установленный на палубе корабля рупор, который медленно вращался. При обнаружении штормовой зоны рупор останавливался, указывая направление, откуда движется шторм. Предупреждение шторма возможно за 10–15 часов до его начала [12].

Целью данной работы является экспериментальный анализ распространения акустических сигналов в катеноидальном рупоре конечной длины на инфразвуковых частотах.

Основная часть. Аналитический обзор. Применение рупоров в акустических генераторах. Исследованию излучения звука акустическими излучателями с рупорами, а также методам расчета величины акустической мощности таких генераторов посвящено довольно много работ. Рэлей осветил проблему колебаний воздуха внутри рупора конического сечения. Он применил теорию распространения волн в трубах к объяснению распространения акустических волн в коническом рупоре [10].

А. Г. Вебстер ввел понятие акустического сопротивления [15]. Он получил, что при некоторой частоте акустического сигнала, названной критической, в рупоре экспоненциальной формы (при условии отсутствия отражения сигнала от устья рупора, то есть в приближении рупора «бесконечной длины»), происходит как бы акустическое «запирание». Распространение акустического сигнала в полости рупора согласно этой теории возможно только тогда, если частота сигнала выше некоторого критического значения.

А. Б. Крендалл [7] на основе теории А. Г. Вебстера дал полное описание распространения волн в коническом и экспоненциальном рупорах в приближениях бесконечной и конечной длины. Показано, что в рупоре конечной длины возникает явление резонанса. Причем резонанс в коническом рупоре отмечается на тех же частотах, что и в цилиндрической трубе. А. Б. Крендаллом разработана методика расчета акустической мощности акустического генератора с рупором экспоненциальной формы конечной длины. Моделью устья рупора принята или труба с бесконечным фланцем, или полусфера в бесконечном экране, что не оправдано для излучения акустических сигналов длинноволнового диапазона.

Ф. Морз [8] привел расчетные формулы для определения звукового давления, колебательной скорости, импеданса в звуковом поле внутри рупора бесконечной и конечной длины катеноидальной формы (обводы рупора выполнены по функции гиперболического косинуса), а также вывел формулу для расчета акустической мощности генератора при использовании катеноидального рупора. Для сравнения характеристик рупоров различных форм Ф. Морз ввел коэффициент отдачи, равный отношению активной части импеданса в горле рупора к удельному акустическому сопротивлению плоской волны. Математическое выражение для коэффициента отдачи, характеризующего импеданс в горле рупора с учетом отражения волн от устья, выведено в предложении, что устье рупора моделируется трубой, снабженной бесконечным фланцем, что является недостатком предложенной методики расчета для низкочастотного диапазона.

В теорию распространения волн в рупорах бесконечной и конечной длины существенный вклад внесли работы Л. Я. Гутина [3; 4]. В его работе рассмотрено

распространение волн в рупорах: коническом, экспоненциальном, параболическом. Решение для расходящейся волны внутри рупора записано через функции Бесселя, что позволяет разграничить активную и реактивную часть импеданса. Для рупоров всех трех указанных форм в приближении их конечной длины Л. Я. Гутин вывел математические выражения для расчета коэффициента излучения, который, фактически, является введенным Ф. Морзе коэффициентом отдачи и характеризует импеданс в горле рупора. Но у Л. Я. Гутина коэффициент излучения характеризует только активную составляющую часть импеданса в горле. Этот коэффициент позволяет вычислить именно полезную часть акустической мощности излучателя. Существенным моментом в работах Л. Я. Гутина явилось то, что он дал решение задачи об излучении звука из рупоров, устье которых не снабжено бесконечным экраном. В его работах модель устья – поршневая мембрана, излучающая одной стороной в безграничную среду. Решение получено для пределов параметра $0,4 \leq kR \leq 2$. Здесь k – волновое число, R – радиус излучателя. Такие параметры характерны для инфразвукового диапазона частот.

Основные работы по исследованию излучения звука рупорами опубликованы в 30-е и 40-е годы, ряд последних работ посвящен уже теории звукофикации помещений, аудиторий, концертных залов громкоговорителями с обводами рупоров, выполненных по экспоненциальной форме [6; 9; 11; 14]. В расчетах используется приближение бесконечного рупора из соображений, что излучение звука происходит на частотах, когда отражение волн от устья рупора может не учитываться.

Предложенные теории не выявляли особенностей распространения акустических сигналов в полостях рупоров на инфразвуковых (ИЗ) частотах. Проблему эффективного излучения звуков низких частот пытались решать введением ряда практических мероприятий. Так, в [13] описан метод увеличения площади устья рупора за счет размещения его в углу комнаты. В работе [13] представлены «гигантские» рупора.

В настоящее время не проведены исследования процессов, происходящих в горле рупора на частотах, близких к критической частоте, когда необходимо рассматривать взаимодействие прямой и отраженной от устья волны. Тем не менее работы эти представляют определенный интерес и необходимы при практическом решении проблемы звукофикации помещений, аудиторий, залов.

Постановка проблемы. В основу теоретических представлений о распространении акустического сигнала на инфразвуковых частотах в рупоре катеноидальной формы конечной длины положено знание о распространении волн в трубах.

В рупоре конечной длины расходящаяся от узкого конца волна подвергается отражению в широком конце. Наличие прямой и отраженной волны приводит к резонансным явлениям, наличие которых в расчетах учитывается коэффициентом излучения (А. Г. Вебстер, Л. Я. Гутин). Вывод основной формулы для расчета коэффициента излучения на основе теории рупора конечной длины, приведенной Вебстером, состоит в решении уравнения через два линейно независимых решения.

В работе [13] составлен алгоритм, разработана на ЭВМ программа для расчета амплитудно-частотной характеристики коэффициента излучения. Представлены графики изменения действительной и мнимой частей коэффициента излучения в зависимости от частоты.

Анализируя характер кривых, можно сделать вывод, что процессы излучения рупорами бесконечной и конечной длины резко отличны между собой, что

определяется наличием отраженной волны от устья рупора. Поэтому необходимо на основе экспериментов путем измерений получить величины колебательной скорости, звукового давления, рассмотреть характер кривых изменения колебательной скорости и звукового давления с частотой, построить фазовую характеристику. Затем провести анализ полученных результатов, выявить явление резонансов и определить резонансные частоты. Это даст возможность узнать, на каких частотах активная составляющая акустической мощности имеет максимальное значение. Что имеет большое значение для анализа излучения сигналов на инфразвуковых частотах, когда активная составляющая излучаемой мощности очень мала.

Существующие методы измерений характеристик акустических сигналов на инфразвуковых частотах. Методы исследования инфразвуковых полей (ИЗ полей), основанные на измерении только одной функции уровня звукового давления (УЗД) – малоэффективны. В настоящее время интенсивно развиваются новые методы анализа [5]. Проводятся работы по проектированию специально созданной для инфразвукового диапазона измерительной аппаратуры. Особенно успешно здесь работают бельгийская фирма «Брюль и Кьер» [2] и немецкая фирма, выпускающая измерительные приборы типа RFT [12].

Одним из первых прибор, регистрирующий ИЗ от морских волн, создал академик В. В. Шулейкин [12]. Перед приближением шторма оболочка метеорологического шара – зонда на корабле начинала вибрировать с частотой 6–13 Гц. Было выяснено, что резонанс возникает у шаров, наполненных водородом, и имеющих собственную частоту колебаний около 10 Гц. Акад. В.В. Шулейкин сделал вывод, что шар принимает ИЗ колебания от бушующего за сотни километров шторма. Фактически, был создан первый приемник ИЗ волн.

Для тех же целей предназначен и прибор, названный «инфра-ухо» [12]. Он состоит из рупора, который улавливает колебания порядка 6–10 Гц, резонатора, который пропускает именно эти частоты и отсеивает случайные, пьезодатчика, который преобразует колебания в импульсы электрического тока, усилителя и измерительного прибора. Установленный на палубе корабля рупор медленно вращается. При обнаружении штормовой зоны рупор останавливается, указывая направление, откуда движется шторм, за 10–15 часов до начала шторма.

В настоящее время наиболее известными и полными работами по созданию методик измерений в области инфразвуковых частот (ИЗ частот), а также в разработке измерительной аппаратуры, очевидно, следует считать работы «Брюль и Кьер» [2], Л. Пимонова [12], Э. Н. Малышева [12], В. Н. Бринзы [12]. Опубликованы обзоры по измерениям в области ИЗ диапазона частот [12]. В работе [12] представлены доклады по методикам измерений и обработке ИЗ характеристик для Комиссии по метрологии и обработке акустических сигналов.

Так как длина волны ИЗ велика, то применение обычных микрофонов для его регистрации затруднено. Микрофон для ИЗ измерений на гальваномангнитных датчиках описан в работе [12]. С. Н. Бугулавская, Е. Р. Романенко, Л. И. Холод [12] отмечают о возможности создания пьезоэлектрических инфразвуковых микрофонов. Принцип работы такого микрофона основан на регистрации пьезоэлектрическим датчиком периодических изменений температуры воздуха, обусловленных адиабатичностью процесса распространения инфразвуковой волны в воздухе. В измерительной технике для возбуждения низкочастотных колебаний используют трубку Оберста [12]. Прибор такого типа основан на резонансном методе возбуждения колебаний в трубе переменного сечения, возбуждение

осуществляется мощным громкоговорителем. Устройства для регистрации и анализа инфразвука должны удовлетворять требованиям ГОСТ 17168-82.

Измеритель высоких инфразвуковых и звуковых давлений разработан в Ленинградском институте киноинженеров [12]. Для регистрации ИЗ разработаны специальные детекторы [12].

Низкочастотные измерения с конденсаторными преобразователями представлены у Stode F. [12], у Ф. В. Семякина, А. Д. Хохлова [12], имеющие частотный диапазон начиная от 0,5 Гц и позволяющие измерять УЗД до 170 дБ. Выявлено, что для данного конденсаторного микрофона нижняя граница измеряемых частот зависит от диаметра и длины канала выравнивания статического давления, а также от остаточных утечек по резьбе капсуля. Сейсмическую помеху при работе инфразвуковых микрофонов заметил А. J. Bedard [12].

С целью моделирования фазовых соотношений в плоской ИЗ волне сконструирована камера замкнутого объема, описанная в [12].

Величины: уровень звукового давления и колебательная скорость, векторно-фазовые характеристики между ними – применяются при анализе ИЗ полей [12]. Широко применяемые в акустических измерениях приборы типа шумомеров и анализаторов спектра для анализа ИЗ полей представлены в работах [12].

Основной измеряемой величиной является уровень звукового давления (УЗД) в децибелах (дБ). УЗД может измеряться при линейной коррекции шумомера [12] (обозначается дБ Лин), при этом амплитудно-частотная характеристика шумомера линейна во всем диапазоне частот, а также при коррекции «А» шумомера (дБА), которая примерно соответствует субъективному восприятию шума. Разность этих величин $L_{\text{лин}} - L_A$, дБ, используется для ориентировочной оценки выраженности низкочастотной части спектра шума. Чаще всего используются октавные полосы частот (понятие октавы означает удвоение частоты) со среднегеометрическими частотами 2; 4; 8 и 16 Гц [12]. В соответствии с [12] допускается определять УЗД в 1/3-октавных полосах со среднегеометрическими частотами 1,6; 2; 2,5; 3,15; 4; 5; 6,3; 8; 10; 12,5; 16; 20 Гц, их следует пересчитывать в октавные в соответствии с данными работы [12].

По характеру спектра [12] инфразвук делится на:

- 1) широкополосный с непрерывным спектром шириной более одной октавы;
- 2) гармонический, в спектре которого имеются выраженные дискретные составляющие (определяются по превышению УЗД на 10 дБ и более в одной из октавных полос). Наиболее подходящими являются шумомер типа 2209, 2031, 2033, 2010, 2120 фирмы «Briel & Kjaerg» совместно с наборами фильтров 1613, 1616, 5742 и шумомеры типов 01020, 01023, 01024, 0017 и 00023 фирмы RFT с фильтром 01025 [2; 12].

Для фиксации результатов измерений применяются переносные самописцы типа 2306, 2309 фирмы «Briel & Kjaerg» и типа 02060 фирмы RFT [12].

Исследуемый шум может быть предварительно записан на измерительный магнитофон. У фирмы «Briel & Kjaerg» имеется портативный измерительный магнитофон типа 7003. Та же фирма разработала цифровой регистратор модели 7502, позволяющий запоминать аналоговые сигналы в цифровом виде.

Для выделения ИЗ волн из общего спектра применяются специальные фильтры.

Как уже отмечалось ранее, дальнейшее поле излучателя ИЗ волн начинается от поверхности излучения на большом расстоянии. Поэтому остро стоит задача проведения достоверных измерений в ближнем поле излучателя. В [5] указана

методика сотрудников МГУ в области достоверных определений векторно-фазовых характеристик инфразвуковых полей. Методика предусматривает, наряду с измерением звукового давления, регистрацию трех ортогональных компонент колебательной скорости. Это позволяет определять три компоненты акустической мощности, а также ее суммарный поток. Кроме того, предусматривается определение фазовых (в случае шумовых сигналов корреляционных) соотношений между компонентами колебательной скорости, а также между ними и звуковым давлением. На основании измерения потока акустической мощности можно определить направление на источник звука и в некоторых случаях определить расстояние до него. Указанная методика позволяет наиболее полно определить все параметры инфразвукового поля. Большой размер длины волны ИЗ предопределяет использование в измерениях антенных систем. В работе Song Zhi-yung, Iu Yan [16] проведен акустический расчет трубки с эквидистантными отверстиями. Трубка соединена с одного торца с преобразователем ИЗ, а с другого нагружена акустическим импедансом. Рассчитан отклик антенны на переменное давление в любом отверстии трубки. Даны амплитудные характеристики антенны в зависимости от радиуса трубки. Инфразвуковое следящее устройство разработано в работе [12]. Специальные устройства для приема ИЗ колебаний разработаны группой авторов: В. А. Зверевым, А. И. Калачевым [12]. Прием волн инфразвукового диапазона с частотами до 0,001 Гц осуществлен авторами работ [12]. Влияние ветра на измерения рассмотрено у Fukuhara H. [12]. Учет атмосферной турбулентности при приеме ИЗ волн рассмотрен в работе [12].

Для корректных измерений УЗД в предлагаемом нормами частотном диапазоне, начиная с октавной полосы со среднегеометрической частотой 2 Гц, вся аппаратура (и прежде всего микрофон, предусилитель и шумомер) должна иметь линейную частотную характеристику (с отклонением в пределах класса точности) начиная с частоты 1,4 Гц. Точки измерения выбирают на расстоянии не более 20 м друг от друга. Микрофон располагают на высоте 1,5 м от пола и на удалении не менее 0,5 м от человека, проводящего измерения.

При медленном измерении уровня инфразвука его значения регистрируют одновременно с хронометражем и определение эквивалентного уровня проводят по второму методу ГОСТ 20445-75. Время наблюдения (длительность реализации) при измерении октавных УЗД должно соответствовать величинам, указанным ниже.

Среднегеометрические частоты октав, Гц	2	4	8	16
Время измерения, с	30/300	15/150	8/80	4/40

В числителе – минимальное, в знаменателе – рекомендуемое.

Минимальному и рекомендуемому времени измерения соответствуют статистические погрешности оценки уровня ± 3 дБ и ± 1 дБ при доверительной вероятности 0,95.

Проведение эксперимента. Анализ полученных результатов. Для экспериментальных исследований был выбран рупор катеноидальной формы конечной длины. На рис. 1 представлен внешний вид рупора катеноидальной формы. Конструктивно рупор был исполнен из отдельных металлических секций. Диаметр горла – 0,35 м, диаметр устья – 4 м, длина рупора составляла 10 м. Оболочка обладала бесконечной жесткостью по сравнению с жесткостью воздуха в полости рупора.

Соотношения между площадями сечений горла и устья, а также между значениями продольных координат были следующие:

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{1}{130}, \quad \frac{x_1}{x_2} = \frac{30}{1},$$

где S_1 , S_2 – площади горла и устья соответственно; x_1 , x_2 – продольные координаты горла и устья вдоль оси рупора.



Рис. 1. Внешний вид рупора

На первом этапе экспериментальных работ можно было предположить, что колебательная скорость частиц в горле рупора определяется колебательной скоростью мембраны возбуждающего элемента. При очень медленно расходящемся сечении рупора (в случае рупора длиной 10 м при критической частоте 17 Гц существенная расходимость обвода начинается с длины, равной расстоянию от сечения горла 6 м) можно предположить, что в горле рупора распространяется плоская волна. Здесь достаточно иметь акселерометр, укрепленный на поверхности поршня или мембраны, и микрофон, установленный в горле рупора. Такой метод применим в случае реализации в горле рупора плоской бегущей волны.

Однако более точно определить коэффициент излучения можно только с использованием метода векторно-фазовых характеристик. Этот метод был ранее применен для исследования пространственного распределения основных характеристик инфразвукового поля в замкнутых объемах в Московском государственном университете имени М. Ломоносова [5].

Применим этот метод для определения безразмерной активной составляющей импеданса (или коэффициента излучения) в горле рупора при возбуждении его на инфразвуковых частотах. Необходимо измерить мгновенные значения звукового давления и колебательной скорости в горле рупора, а затем определить фазовые соотношения между этими двумя характеристиками на различных частотах.

Уровень внешних шумов во время проведения эксперимента не превышал 70 дБ и был ниже уровня измеряемого звукового давления на 15–50 дБ.

Предварительно была измерена амплитудно-частотная характеристика динамика, которая оказалась, практически, линейной.

Возбуждение акустических волн в полости рупора производилось динамиком.

На клеммы динамика подавался сигнал строго синусоидальной формы.

Для измерений использовался комплект аппаратуры "Брюль и Кьер", точность измерения уровня звукового давления составляла ± 1 дБ. Фазовые соотношения были определены с точностью $\pm 3^\circ$.

Измерения проводились согласно требованиям ГОСТ 17187-81 и Инструкции по эксплуатации по применению аппаратуры фирмы «Брюль и Кьер» [2].

Перед началом измерений была проведена калибровка измерительного тракта, для чего была собрана установка, состоящая из цилиндрической трубы постоянного сечения, громкоговорителя и комплекса измерительной аппаратуры (рис. 2). На рис. 2 представлена схема расположения рупора, динамика и измерительной аппаратуры. Это позволило определить погрешность, вносимую комплектом измерительной аппаратуры в измерения. С учетом данных калибровки измерительного тракта получено, что фазовый сдвиг в горле конусоидального рупора был близок к нулю градусов. Это позволило сделать вывод, что в горле рупора возбуждалась плоская волна.

С целью исключения влияния резонансных явлений электрической части громкоговорителя на чистоту экспериментальных исследований частотная характеристика звукового давления снималась при постоянной колебательной скорости диафрагмы громкоговорителя. По результатам полученных экспериментальных данных построена частотная характеристика коэффициента излучения, представленная на рис. 3.

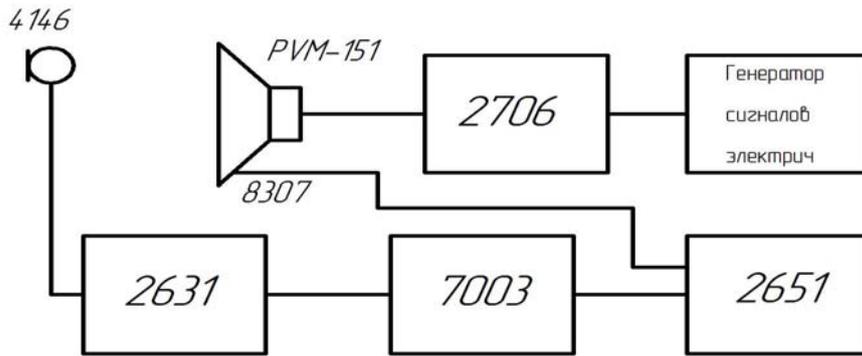


Рис. 2. Схема расстановки рупора и измерительной аппаратуры

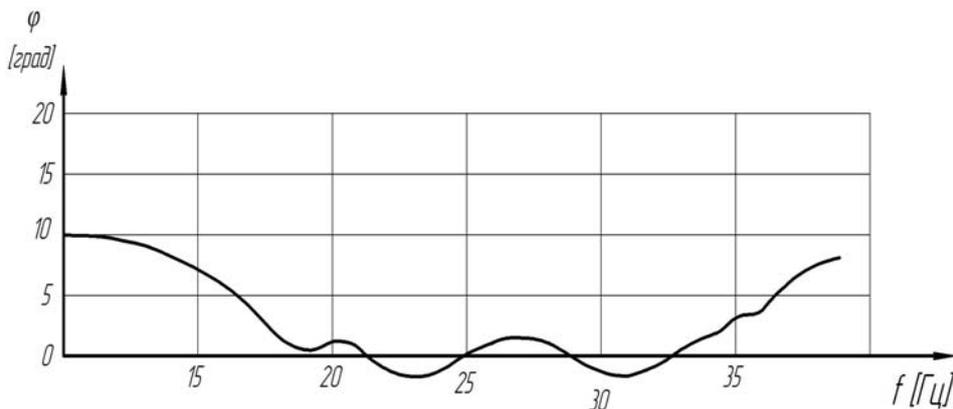


Рис. 3. Фазо-частотная характеристика в горле рупора

В качестве приемника звукового давления использовался конденсаторный микрофон 4165. Он был установлен в горле непосредственно перед диафрагмой динамика. Акселерометр 4344 был использован для измерения колебательной скорости диафрагмы. Он был установлен в центре диафрагмы динамика. Фаза между звуковым давлением и колебательной скоростью фиксировалась фазометром 2971. В процессе эксперимента было зафиксировано изменение электрической мощности в пределах 40 %. Уровень звукового давления в горле был зафиксирован в интервале 82–130 дБ. Данные измерений фиксировались на магнитографе 2631.

При подаче сигналов с задающего генератора ГЗ-47 через усилитель мощности 2706 приводилась в колебательное движение диафрагма громкоговорителя PVM-151 Model 15L, пристыкованного к горлу катеноидального рупора. В горле рупора непосредственно перед диафрагмой динамика (на расстоянии 0,1 м) был установлен микрофон 4165. Акселерометр 4344 устанавливался в центре мембраны громкоговорителя на клею. Данные измерений через предусилитель заряда 2635 и блок питания 2807 фиксировались визуально на шкалах осциллографа С1-72 и анализатора спектра 2031. Частотный диапазон измерений составил 15–50 Гц [1].

На рис. 4 представлен график изменения величины колебательной скорости в зависимости от частоты. На рисунке обозначено: V – колебательная скорость; n – отношение текущей частоты к критической, равной 17 Гц.

На рис. 5 представлен график уровня звукового давления в горле рупора в зависимости от частоты при постоянной величине колебательной скорости. На рисунке обозначено: p – звуковое давление, выраженное в паскалях; n – отношение текущей частоты к критической, равной 17 Гц.

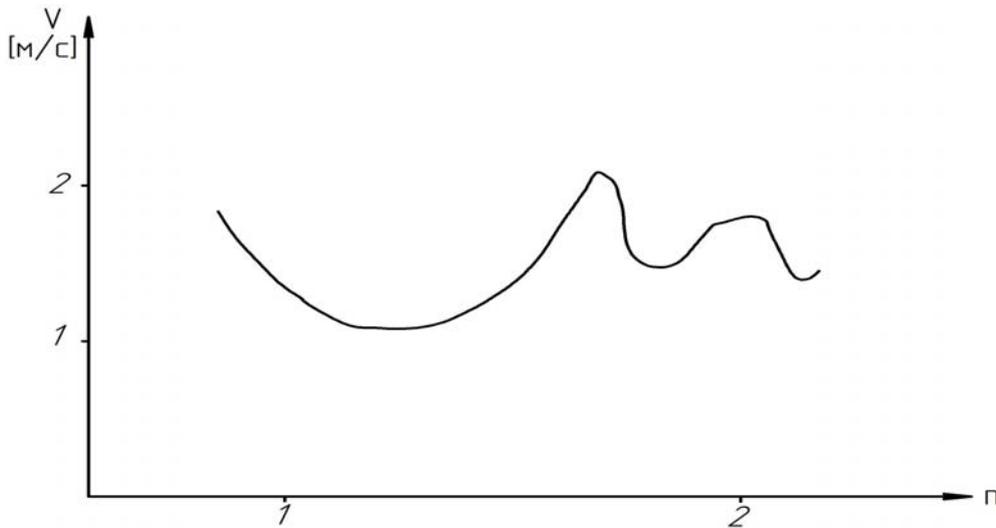


Рис. 4. График изменения колебательной скорости в горле рупора

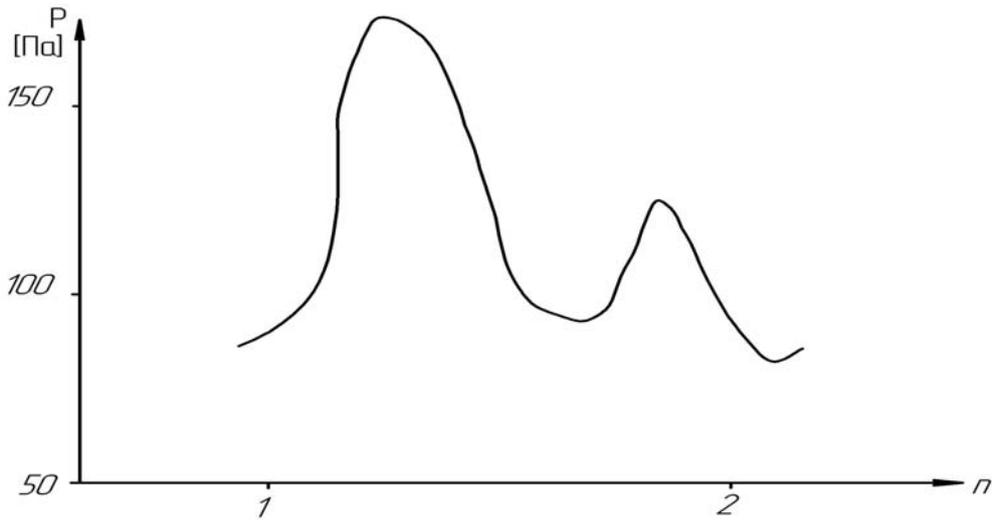


Рис. 5. График изменения звукового давления в горле рупора

По данным графиков (рис. 4, 5) были рассчитаны значения действительной и мнимой частей коэффициента излучения α .

Обсуждение результатов. Из анализа кривых экспериментальных данных можно сделать вывод, что в горле рупора катеноидальной формы конечной длины близ критической частоты проявляются резко выраженные резонансные явления, обусловленные наличием отраженной волны. Эти эффекты наблюдаются на инфразвуковых частотах, когда размеры рупора ограничены.

Данные по характеристикам звукового давления и колебательной скорости, полученные на основе натуральных измерений, позволили построить графики изменения мнимой и действительной частей (коэффициента излучения) импеданса в горле рупора. Графики этих зависимостей представлены на рис. 6, 7.

На рис. 6 обозначено: β – значение мнимой части импеданса в горле рупора; f – рабочие частоты во время эксперимента.

На рис. 7 обозначено: α – значение действительной части импеданса в горле рупора; f – рабочие частоты во время эксперимента.

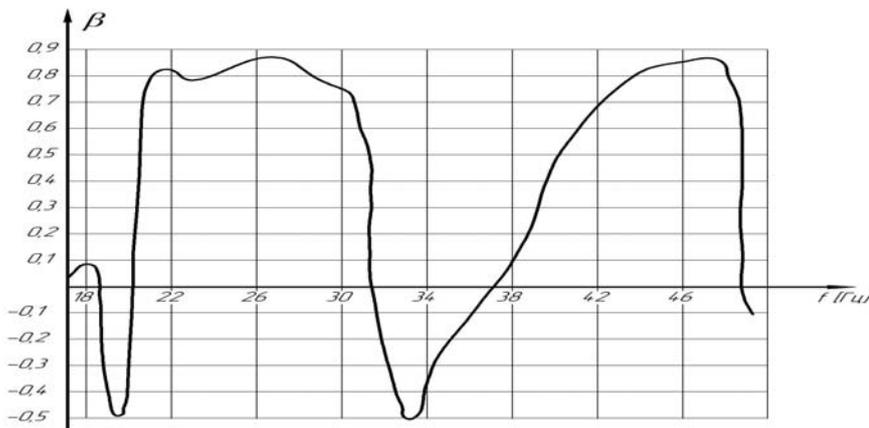


Рис. 6. Частотная характеристика безразмерной мнимой части импеданса в рупоре

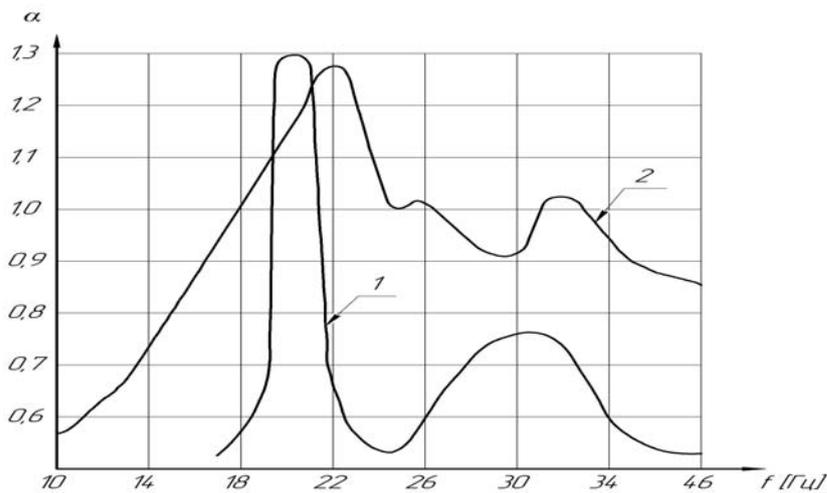


Рис. 7. Амплитудно-частотная характеристика коэффициента излучения:
1 – расчетные значения, 2 – экспериментальные для рупора $l = 10$ м, $R_1 = 0,17$ м, $R_2 = 2$ м

Заключение. Применена методика исследования амплитудно-фазовых характеристик акустического поля в рупоре на инфразвуковых частотах.

Экспериментальные данные по амплитудно-частотной характеристике коэффициента излучения близ критической частоты катеноидального рупора с параметрами: диаметры горла и устья соответственно 0,35 и 4 м, длина 10 м – подтвердили наличие резонансов в амплитудно-частотной характеристике коэффициента излучения частотах 20 Гц, 35 Гц. Разница в уровне звукового давления на первой резонансной частоте и экспериментальных данных отличается в 0,92 раза.

На основе экспериментально полученных амплитудно-частотных характеристик звукового давления и колебательной скорости рассчитана амплитудно-частотная характеристика безразмерной активной составляющей импеданса (или коэффициента излучения) в горле рупора, что позволяет определить активную составляющую излучаемой акустической мощности излучателя с рупором.

Библиографические ссылки

1. **Андреев А.И.** Исследование резонансных явлений в горле катеноидального рупора вблизи критической частоты / А.И. Андреев, А.И. Антоненко, В.Д. Бондарев В.Д. и др. // Тез. докл. 4-го Всесоюз. симпозиума по физике акусто-гидродинамических явлений с секциями молекулярной акустики и геоакустики (Ашхабад, 24–26 сент. 1985 г.). – Ашхабад : АН СССР, 1985. – С. 110.
2. **Брох Е.Т.** Применение аппаратуры фирмы «Брюль и Къер» для измерений акустического шума / Е.Т. Брох. – Дания : «Брюль и Къер», 1971. – 224 с.
3. **Гутин Л.Я.** К теории приемного рупора / Л.Я. Гутин. // МТФ. – 1935. – Т.У2. – Вып. 8. – С. 896–912.

4. Гутин Л.Я. О звуковом поле поршневых излучателей / Л.Я. Гутин // ЖТФ. – 1937. – Т. У2. – Вып. 10. – С. 1096–1106.
5. Иванников А.И. Метод исследования структуры звукового поля в малых замкнутых объемах воздуха : дис. канд. физ.-мат. наук / Анатолий Иванович Иванников. – М. : МГУ, 1983. – 140 с.
6. Иоффе В.К. Справочник по акустике / В.К. Иоффе, М.А. Сапожков, В.Г. Корольков. – М. : Связь, 1979. – 312 с.
7. Крендалл И.Б. Акустика / И.Б. Крендалл. – Л. : ЭТА, 1934. – 171 с.
8. Морз Ф. Колебания и звук / Ф. Морз. – М. : Гостехиздат, 1937. – 465 с.
9. Павловская В.И. Акустика и электроакустическая аппаратура / В.И. Павловская, А.К. Качерович, А.П. Лукьянов. – М. : Искусство, 1977. – 255 с.
10. Рэлей (Стретт Дж.). Теория звука / (Стретт Дж.) Рэлей. – М. : ГИТТЛ, 1955. – Т. 1, 2. – 476 с.
11. Сапожков М.А. Электроакустика / М.А. Сапожков. – М. : Связь, 1979. – 279 с.
12. Сокол Г.И. Особенности инфразвуковых процессов в инфразвуковом диапазоне частот / Г.И. Сокол. – Д. : Промінь, 2000. – 136 с.
13. Сокол Г.И. Двигательные установки летательных аппаратов как генераторы инфразвуковых волн: дис. канд. техн. наук / Галина Ивановна Сокол. – Д., 1986. – 167 с.
14. Фурдудев В.В. Электроакустика / В.В. Фурдудев. – М. : ГТТИ, 1948. – 256 с.
15. Webster A. G. Proc. Nat. Acad. Sci. – 1919. – 275 p.
16. Song Zhi-Yung, Lu Yan. Characteristics of the ununiform pipe array and its application to the infrasonic reception. – Шэнсюю сюэбао, Acta Acus. – 1982. – V. 7. – № 2. – P. 99–109.

Надійшла до редколегії 02.06.2016

УДК 629.78

А. В. Тищенко, О. Г. Клочков, А. М. Кулабухов, В. А. Масальский

Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ СТЕНД СИСТЕМЫ УГЛОВОЙ ОРИЕНТАЦИИ И СТАБИЛИЗАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Предложен испытательный стенд для отработки алгоритмов системы угловой ориентации и стабилизации в наземных условиях.

Ключевые слова: стенд, воздушная подушка, система, угловая ориентация, стабилизация, космический аппарат, спутник.

Запропоновано випробувальний стенд для відпрацювання алгоритмів системи кутової орієнтації та стабілізації у наземних умовах.

Ключові слова: стенд, повітряна подушка, система, кутова орієнтація, стабілізація, космічний апарат, супутник.

A test stand for angular orientation and stabilization algorithms testing in ground conditions is proposed.

Keywords: test stand, airbag system, the angular orientation, stabilization, spacecraft, satellite.