

19. Paliy A.V., Zamkov E.T. Mekhanizm vozniknoveniya treniya i soprotivleniya tela v gazovom potoke [Mechanism of friction and resistance of the body in the gas flow], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 1 (126), pp. 186-191.
20. Paliy A.V., Zamkov E.T., Buleyko V.G. Mekhanizm sozdaniya soprotivleniya ploskoy poverkhnosti v gazovom potoke tangentsial'noy sostavlyayushchey skorosti molekuly gaza. [The mechanism of creating the resistance of a flat surface in the gas flow tangential component of the velocity of the gas molecule], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, № 1 (138), pp. 197-202.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.Е. Лысенко.

Палий Александр Викторович – Южный федеральный университет; e-mail: a.v._paliy@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371603; кафедра конструирования электронных средств; к.т.н.; доцент.

Чернов Николай Николаевич – e-mail: nik-chernov@yandex.ru; тел.: 88634371795; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; д.т.н.; профессор.

Paliy Alexander Viktorovich – Southern Federal University; e-mail: a.v._paliy@mail.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371603; the department of electronic apparatuses design; cand. of eng. sc.; associate professor.

Chernov Nikolay Nikolaevich– e-mail: nik-chernov@yandex.ru; phone: +78634371795; the department of acoustics and medical technology; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 534.1

DOI 10.23683/2311-3103-2018-2-193-206

А.М. Гаврилов, Н.Д. Севастьянов

ОПЫТ СОЗДАНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВОЙ АВТОГЕНЕРАЦИИ ЗВУКА НА ОСНОВЕ ТРУБЫ РИЙКЕ

Целью работы является создание действующего образца трубы Рийке и исследование на его основе тепловой автогенерации звуковых волн. Рассмотрены исторические аспекты, основные этапы открытия и изучения разных проявлений необычного физического явления, находящегося на стыке термодинамики и акустики, отмечена актуальность дальнейших исследований, обсуждаются особенности проявления и возможного практического использования термоакустической генерации. Рассмотрены теоретические аспекты возникновения и существования акустических колебаний в открытой вертикально расположенной трубе. Показано, что столб воздуха в трубе может совершать одно или несколько собственных колебаний, представляющих собой стоячие волны, ограниченные концами трубы, на длине которой укладывается целое число полуволн. Причиной возбуждения колебаний может послужить любой внешний звук или движение воздуха в трубе, наибольшей амплитудой обладает основное собственное колебание. На концах трубы расположены узлы приращений давления стоячей звуковой волны, пучности колебательного смещения и скорости частиц воздуха. Незатухающие колебания обусловлены непрерывным притоком энергии от нагревателя, расположенного внутри нижней части трубы. Роль нагревателя не сводится лишь к созданию тяги, – поступательного движения воздуха вверх по трубе. Благодаря нагревателю внутри трубы Рийке возникает положительная акустическая обратная связь. В состав автоколебательной системы входят источник энергии (нагреватель), колебательная система (столб воздуха в трубе), задающая частоту колебаний и звено положительной обратной связи, обеспечивающее периодическое в нужные моменты времени поступление энергии от нагревателя в колебательную систему для компенсации потерь энергии колебаний из-за трения, излучения и др. Экспериментально проверены известные теоретические модели. Исследованы зависимости тепловой мощности, приводящей к генерации звука, от расположения нагревателя и частоты звука от длины трубы.

Экспериментально изучено влияние бокового отверстия на срыв генерации. Полученные результаты представляют интерес для понимания особенностей возникновения и практического использования эффекта Рийке.

Эффект Рийке; тепловая автогенерация звука; стоячая волна; длина трубы; гармоники.

A.M. Gavrilov, N.D. Sevastjanov

EXPERIENCE OF CREATION AND RESEARCHING RESULTS OF THERMAL SOUND AUTOGENERATION BASED ON THE RIJKE TUBE

The purpose of work is creation of a working sample of Rijke pipe and research on his basis of thermal autogeneration of sound waves. In article historical aspects, the basic stages of opening and studying of different displays of the unusual physical phenomenon which are taking place on a joint of thermodynamics and acoustics are considered, the urgency of the further researches is marked, features of display and possible practical use thermo-acoustical generation are discussed. Theoretical aspects of occurrence and existence of acoustic fluctuations in the open vertically located pipe are considered. It is shown, that the column of air in a pipe can make one or own several fluctuations representing standing waves, the pipes limited to the ends on which length the integer of half waves is stacked. As the reason of excitation of fluctuations any external sound or movement of air can serve in a pipe, the greatest amplitude basic own fluctuation possesses. On the ends of a pipe units of increments of pressure of a standing sound wave, antinode oscillatory displacement and speed of particles of air are located. Not fading fluctuations are caused by continuous inflow of energy from a heater located inside the bottom part of a pipe. The role of a heater is not reduced only to creation of draft, - progress of air upwards on a pipe. Due to a heater inside Rijke pipe there is a positive acoustic feedback. The structure of self-oscillatory system includes an energy heater, oscillatory system (a column of air in a pipe), specifying frequency of fluctuations and the part of a positive feedback providing periodic during the necessary moments of time receipt of energy from a heater in oscillatory system for indemnification of losses of energy of fluctuations because of friction, radiation, etc. Known theoretical models are checked experimentally up. Dependences of the thermal capacity resulting in generation of a sound, on an arrangement of a heater and frequency of a sound on length of a pipe are investigated. Influence of a lateral aperture on failure of generation is experimentally investigated. The received results are of interest for understanding of features of occurrence and practical use of Rijke effect.

Rijke effect; thermal autogeneration of sound; standing wave; pipe length; harmonics.

1. Введение. Трубы давно используют музыкальных инструментах: флейта, гобой, органные трубы. Если подуть в полую трубку, воздух в ней начнет колебаться, возникнут стоячие волны. Частота звука зависит от размеров трубки. Кроме труб любой пустотелый сосуд, заполненный воздухом и сообщающийся с атмосферой через отверстия, является акустическим резонатором [1–6].

Звучащие трубы входят в состав не только музыкальных инструментов, это гудящие печные и каминные трубы, где появление звука обязано термоакустическим явлениям. Во всех случаях звук создается столбом воздуха внутри трубы, который, перемещаясь по трубе, начинает колебаться и звучать [7, 8].

Впервые в истории [9] записи о звуках, порождаемых теплом, сделаны в 1777 г. Хиггинсом, который поместил в вертикально расположенную, открытую с двух сторон метровую трубу (диаметр 30–50 мм) водородное пламя. Горючий газ подавался внутрь по тонкой трубке. Конвекционный поток нагретого воздуха в трубе сопровождался возбуждением звуковых колебаний в виде стоячей звуковой волны с частотой, близкой к наименьшей ($n = 1$) собственной частоте f_1 колебаний воздуха в трубе, рис. 1,а [1–6]

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = n \frac{c_0}{2L}, \quad (1)$$

где L – длина трубы; f – частота звуковых колебаний; c_0 – скорость звука в воздухе; $n = 1, 2, 3, \dots$ – номер гармоники. Амплитуда звука максимальна при размещении пламени на расстоянии, равном четверти длины трубы от нижнего ее конца ($h = L/4$).

В 1859 г. Пауль Рийке обнаружил любопытное явление, названное в его честь: при нагреве металлической сетки, находящейся в нижней половине вертикально расположенной открытой с обоих концов трубы, возникает громкий одно-тонный звук, рис. 1,б. В своих опытах Рийке заменил пламя горящего водорода Хиггинса на нагреваемую проволочную сетку. Наиболее интенсивное звучание наблюдалось, когда нагретая сетка была расположена на расстоянии четверти длины трубы ($h = L/4$) от нижнего конца. Если сетку сдвигать к верхней части трубки, то колебания ослабевают и гаснут. Эффект наблюдается, если средняя скорость движения воздуха в трубе изменяется в некотором интервале, а мощность теплового источника выше порогового значения

Развернув звучащую трубу горизонтально, звучание прекращается. Если трубу вернуть в вертикальное положение – звук появится вновь. При остывании сетки тяга в трубе уменьшается, звук ослабевает и полностью исчезает. Физические опыты Рийке привели к появлению нового музыкального инструмента – огневого органа (пирофона).

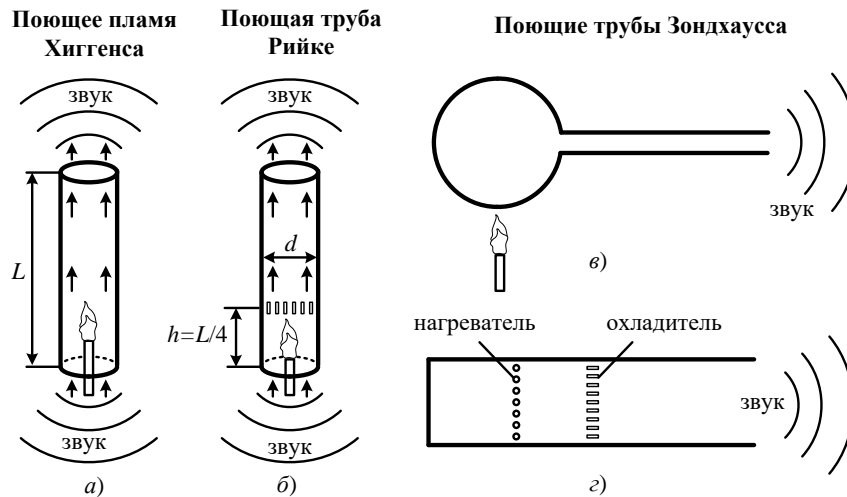


Рис. 1. Термоакустические «поющие трубы»

Стеклодувами давно замечено, что при выдувании стекла трубка стеклодува начинает звучать. Проходящий через трубку стеклодува воздух на другом ее конце, находящемся в печи, образует из стеклянной массы полый шар. При определенных размерах трубки и шара в трубке возникает звук, рис. 1-в. Впервые это явление было описано в 1850 г. Карлом Зондхаусом. Пламя, подводимое к стеклянной колбе, заставляет воздух внутри колбы колебаться и издавать чистый тон, характеристики которого зависят от размеров шара и трубки.

Устройство, состоящее из емкости и узкой трубы, длина которой намного меньше длины звуковой волны, называют резонатором Гельмгольца. Воздух в трубке – «горле» резонатора, совершает собственные колебания, частота которых зависит от размеров устройства. Самовозбуждение колебаний связано с разницей температуры стенок емкости и горла.

Звук в трубах можно получить и без потока воздуха. Для этого в горизонтально расположенную трубу, один конец которой закрыт, а другой открыт (закрыты оба конца) помещают нагреватель и близко расположенный охладитель. При определенной разнице температур в трубе возникает звук, рис. 1,г.

Процесс возникновения звуковых колебаний при подводе тепла для трубок Рийке и Зондхаусса в 1887 г. описал Рэлей. Качественная теория Рэрея указывает на то, что труба Рийке является тепловым автогенератором звука, где тепловая энергия при определенных условиях преобразуется в энергию звука. Рэлей впервые ввел понятие автоколебаний, выделил класс автоколебательных систем и указал основные признаки автоколебательных процессов.

2. Актуальность изучения и область использования термоакустических явлений. На практике с проблемой термического возбуждения акустических колебаний столкнулись при форсировании камер сгорания энергетических установок: топки котельных агрегатов, газотурбинные установки, воздухонагреватели доменных печей, газовые печи, парогенераторы. Появление колебаний большой амплитуды часто ведет к повреждению конструкции, ухудшает показатели работы агрегатов. Особо остра проблема вибрационного горения при создании ракетных и реактивных двигателей, где форсируется процесс горения. Мощные акустические колебания в воздушно-реактивных двигателях, ракетных двигателях на жидком (ЖРД) и твердом топливе вызывают разрушения узлов установки, вплоть до выхода из строя [10, 11].

Вибрационные нагрузки в ЖРД достигают 103g. Нарушается работа чувствительных элементов бортовых систем управления ракет, разрушаются элементы двигателя и полезной нагрузки, появляется нестабильность тяги, расхода топлива, величины и направления вектора тяги, возникает опасность прогара стенок камеры и сопла. Появление звука в реактивном двигателе обязано двум процессам – аэродинамической генерации звука турбулентными пульсациями газовой струи, и термической генерации звука (эффект Рийке). Строгая теория эффекта Рийке отсутствует до сих пор [7, 8].

Акустические колебания в сплошных средах способны интенсифицировать технологические процессы в промышленных установках. Ускоряются процессы теплообмена (смесеобразование, испарение, теплопередача от газа к стенкам, теплообмен потока с нагретыми телами), улучшается агломерация частиц и коагуляция аэрозолей, улучшается полнота сгорания топлива [12–16].

Первое устройство вибрационного горения (газовую турбину) создал в 1906 г. Караводин. Установка работает по принципу резонатора Гельмгольца, акустическая емкость – камера сгорания, где происходит периодическое сжатие и разрежение газа. Продукты горения совершают колебательное движение в «горле» резонатора. Аналогичные устройства (труба Шмидта, камеры вибрационного горения Бабкина Ю.Л., Рейнста Ф.) отличаются способом подачи топлива и воздуха, смесеобразования, воспламенения и стабилизации пламени.

Для сжигания твердого топлива разработаны устройства вибрационного горения, аналогичные трубе Рийке (Северянин В.С., Подымов В.Н., Назаренко Т.И., Имамудинов Ф.Н., Карвальо Ж.А.). Первоочередные задачи энергетики – поиск эффективных способов сжигания топлива, энергосберегающих технологий, использование нетрадиционного топлива.

Злободневной является проблема защиты окружающей среды – утилизация отходов, включая бытовой мусор. Часто термическое разложение отходов – это единственный способ их уничтожения. Вибрационный режим позволяет одновременно решать две задачи – получение энергии за счет сжигания отходов и их утилизация путем частичного или полного уничтожения.

3. Теоретические основы эффекта рийке. Столб воздуха в открытой с обоих концов вертикально расположенной трубе под действие внешнего возмущения совершает одно из собственных колебаний (1). Причины возбуждения колебаний

существуют всегда – любой звук или движение воздуха вызывает слабые колебания воздуха в трубе, при этом наибольшей амплитудой обладает основное ($n = 1$) собственное колебание.

Столб воздуха в трубе может совершать широкий набор собственных колебаний (гармоник), представляющих собой стоячие волны звука соответствующих частот. Концы трубы открыты, т.е. давление воздуха на концах трубы всегда равно атмосферному давлению p_0 . Несмотря на колебания воздуха внутри трубы, приращение давления Δp на концах трубы всегда равно нулю

$$\Delta p = p(t) - p_0 = 0, \quad (2)$$

где $p(t)$ – полное давление (сумма атмосферного p_0 и звукового Δp давлений).

В стоячей звуковой волне на концах трубы всегда расположены узлы приращений давления (Δp), пучности колебательного смещения (Δx) и скорости ($V_K = dx/dt$) частиц воздуха. Собственное колебание столба воздуха в трубе с наименьшей частотой f_1 является основным, длина его звуковой волны максимальна, на длине трубы (L) укладывается половина длины волны (λ) звука в воздухе, рис. 2:

$$f_0 = f_1 = c_0/\lambda = c_0/2L; \quad (3)$$

$$L = \lambda/2. \quad (4)$$

Величины Δx , V_K и Δp в стоячей волне вдоль координаты Oz при гармонических колебаниях воздуха в трубе:

$$\Delta x_n(t, z) = A_{mxn} \cdot \sin(\omega_n t) \cdot \cos(z \omega_n / c_0); \quad (5)$$

$$V_{Kn}(t, z) = A_{mvn} \cdot \sin(\omega_n t) \cdot \cos(z \omega_n / c_0); \quad (6)$$

$$\Delta p_n(t, z) = A_{mpn} \cdot \sin(\omega_n t) \cdot \sin(z \omega_n / c_0), \quad (7)$$

где A_{mn} – амплитуда n -ой гармоники. Зависимости (5)–(7) нижней гармоники ($n = 1$) в моменты времени ($t = 0, T/4, T/2$ и $3T/4$) показаны на рис. 2.

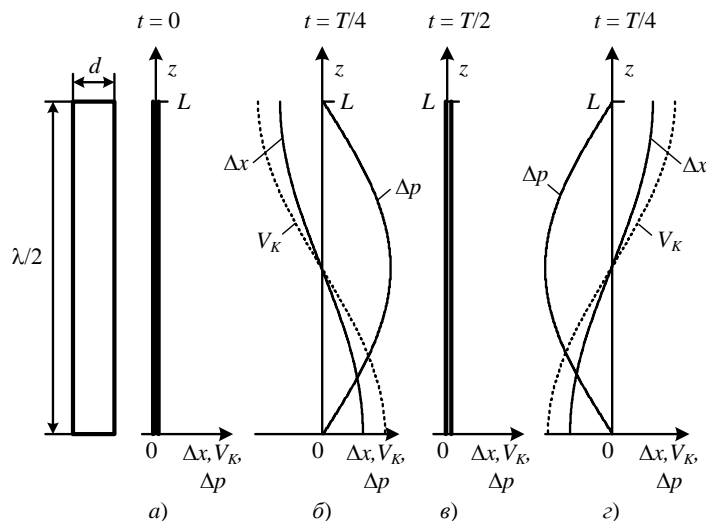


Рис. 2. Основное собственное колебание ($n = 1$) столба воздуха в трубе длиной L с открытыми концами в разные четверти периода для звукового давления Δp , колебательных смещения Δx и скорости V_K

В момент времени $t = 0$ смещение частиц Δx воздуха в трубе равно нулю (рис. 2,а), после чего колеблющийся воздух начинает сжиматься. Через четверть периода в момент $t = T/4$ сжатие достигает максимума, положительное прираще-

ние давления Δp в середине трубы становится максимальным. При этом смещение Δx достигает максимума на концах трубы. У нижнего отверстия трубы смещение частиц воздуха направлено вверх (положительное направление оси Oz), а в верхней части трубы – вниз (рис. 2,б).

Через полпериода в момент $t = T/2$ приращение давления Δp и смещение Δx вновь равны нулю (рис. 2-в). Через четверть периода ($t = 3T/4$) давление в середине трубы стало минимальным (приращение Δp отрицательное). Смещение Δx на концах трубы максимальное, но у верхнего отверстия трубы оно положительное, а в нижнем отверстии – отрицательное (рис. 2,г).

Нагреватель в трубе Рийке, на первый взгляд, служит для создания тяги, – поступательного движения воздуха вверх по трубе. Нагреватель отдает тепло окружающему его воздуху. Однако роль нагревателя не сводится лишь к созданию конвекции воздуха. Поскольку звук в трубе Рийке возникает самостоятельно, ее следует признать автоколебательной системой. Всякая автоколебательная система содержит три элемента: источник энергии (нагреватель), колебательную систему (столб воздуха в трубе), задающую частоту колебаний и звено положительной обратной связи (ПОС), обеспечивающее периодическое в нужные моменты времени поступление энергии для компенсации потерь энергии колебаний из-за трения, излучения и др. [7, 8, 17].

Обратная связь в трубе Рийке акустическая, важную роль в ее работе выполняет нагреватель. Первым это установил Рэлей. Если в трубе нет нагревателя, тогда из-за случайного возмущения столб воздуха в трубе начинает совершать основное собственное колебание, которое быстро затухнет.

Рассмотрим 1-й случай, когда нагреватель расположен в нижней половине трубы. Пусть нагреватель имеет достаточно высокую температуру T_0 . Тогда в фазе сжатия ($\Delta p > 0$) колеблющийся воздух в трубе сжимается, приводя к дополнительному его нагреву на небольшую температуру ΔT_B . Рост температуры ухудшает теплопередачу от нагревателя к окружающему его воздуху, что при постоянной подводимой электрической мощности ($P_э = IU = const$) ведет к увеличению температуры T_{0H} , которую нагреватель имел в отсутствии колебаний, на температуру ΔT_H , т.е. $T_{сж} = T_{0H} + \Delta T_H$. Возрастает перепад температур между нагревателем и воздухом вне трубы, усиливая конвекцию и скорость движения воздуха V_T вверх по трубе, рис. 2-б. Прирост скорости тяги ΔV_T направлен вверх и совпадает с направлением колебательной скорости сжимающегося в процессе колебаний воздуха V_K в нижней части трубы. Рост тяги усиливает сжатие воздуха (амплитуду звуковых колебаний) в трубе.

В фазе разрежения ($\Delta p < 0$) воздух в трубе в процессе колебаний охлаждается на небольшую температуру ΔT_B , из-за чего температура нагревателя снижается на ΔT_H , т.е. $T_{разр} = T_{0H} - \Delta T_H$, тяга в трубе ослабевает (рис. 2,г). *Ослабление тяги ведет к росту* амплитуды звуковых колебаний в трубе.

Колебания воздуха в трубе приводят к периодическим изменениям давления Δp и температуры ΔT_B воздуха внутри трубы [18]:

$$\Delta T_B = \frac{\gamma-1}{\gamma} \cdot \frac{\Delta p}{p_0} T, \quad (8)$$

где γ – показатель адиабаты (для воздуха $\gamma = c_p/c_v \cong 1,4$); c_p и c_v – теплоемкости воздуха при постоянных давлении и объеме; p_0 – атмосферное давление (10^5 Па); T – температура воздуха (~ 300 К).

Периодические изменения температуры ΔT_B воздуха в трубе, вызванные звуковыми колебаниями, периодически изменяют температуру нагревателя на величину ΔT_H , которые управляют тягой воздуха в трубе. Периодически меняющаяся

тяга влияет на колебания столба воздуха. Так в трубе Рийке осуществляется обратная связь. В случае, когда нагреватель расположен в нижней половине трубы, обратная связь положительная, т.к. ее действие обеспечивает возбуждение, рост и поддержание непрерывных колебаний воздуха в трубе.

Рассмотрим 2-й случай, – нагреватель расположен в верхней части трубы. В этом случае обратная связь в колебательной системе отрицательная (ООС). В фазе сжатия температура воздуха в верхней части трубы растет на ΔT_B , а температура нагревателя – на ΔT_H . Возросший поток нагретого воздуха на выходе из трубы из-за прироста ΔT_H идет вверх противоположно движению воздуха, сжимающегося под действием колебаний, что ослабляет сжатие и все колебание.

В фазе разрежения уменьшаются температура воздуха в трубе на ΔT_B и температура нагревателя в верхней части трубы на ΔT_H , что приводит к уменьшению тяги. При разрежении воздух движется вверх, а замедляющаяся тяга «гормозит» колебательное движение частиц воздуха. Таким образом, при размещении нагревателя в верхней части трубы амплитуда случайно возникающих звуковых колебаний столба воздуха не только не растет, но, напротив, ослабевает быстрее, чем без нагревателя.

Для существования автоколебаний необходимы два условия:

- 1) фазовое условие (условие баланса фаз), в термоакустической системе Рийке оно выполняется при размещении нагревателя в нижней половине трубы;
- 2) амплитудное условие (условие баланса амплитуд): обратная связь должна компенсировать потери энергии поступлением её от источника (нагревателя).

В электронике [19, 20] автогенератором электрических гармонических колебаний называют устройство, в котором электрическая энергия источника питания преобразуется в энергию электрических гармонических колебаний заданной частоты. Автогенератор не требует внешнего сигнала и представляет собой усилитель с коэффициентом усиления $K_{yc}(\omega)$, охваченный частотно-зависимой ПОС, коэффициент передачи которой $\beta(\omega)$ максимален на частоте ω_0 . ПОС обеспечивает устойчивый режим самовозбуждения генератора на частоте ω_0 . Условия баланса фаз и баланса амплитуд:

$$\varphi_{yc}(\omega_0) + \varphi_{\beta}(\omega_0) = 2\pi n, \quad (9)$$

где $n = 0, 1, 2, \dots$;

$$K_{yc}(\omega_0) \cdot \beta(\omega_0) \geq 1. \quad (10)$$

Здесь φ_{yc} и φ_{β} – фазовые сдвиги, вносимые усилителем и цепью ОС. Для получения гармонических колебаний на выходе автогенератора условия (9) и (10) должны выполняться только на частоте ($\omega = \omega_0$).

Согласно Рэлею в системе Рийке нагреватель выполняет две функции: во-первых, нагреватель реагирует на колебания столба воздуха в трубе, изменяя свою температуру под действием звуковых колебаний и, во-вторых, нагреватель управляет движением (тягой) воздуха вверх по трубе, отдавая окружающему его воздуху избыток тепла (энергии) в определенные моменты времени.

Наибольшие изменения температуры нагревателя ΔT_H будут в том месте трубы, где изменения температуры колеблющегося воздуха ΔT_B из-за изменений давления Δp максимальны. Колебания температуры нагревателя ΔT_H вызовут наибольшие изменения тяги ΔV_T , если нагреватель расположить там, где в единицу времени с ним соприкасается наибольший объем воздуха, рис. 3.

Согласно Рэлею нагреватель должен быть там, где одновременно максимальны изменения Δp и Δx , т.е. на расстоянии $h = L/4$ от нижнего конца трубы, точка *A* на рис. 4. В этом случае коэффициент передачи ПОС максимален, такие условия работы оптимальны для автоколебательной системы Рийке.

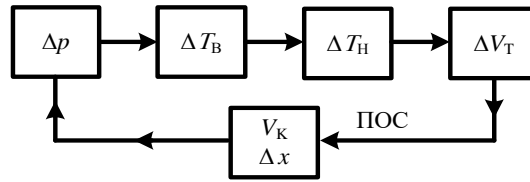


Рис. 3. Передача возмущения в цепи ПОС автоколебательной системы Рийке

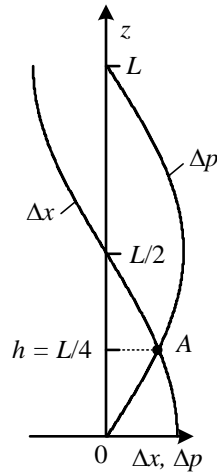


Рис. 4. Место оптимального расположения нагревателя в трубе Рийке (точка А)

4. Экспериментальное исследование тепловой генерации звука в трубе рийке. Результаты экспериментального исследования зависимости электрической мощности нагревателя $P_э$, при которой начиналась генерация звука, от высоты нагревателя h относительно нижнего края трубы, показаны на рис. 5. Измерения начинались с расположения нагревателя, соответствующего максимальному значению h , и продолжались в сторону уменьшения высоты нагревателя. Тогда нижняя часть трубы под нагревателем оставалась холодной.

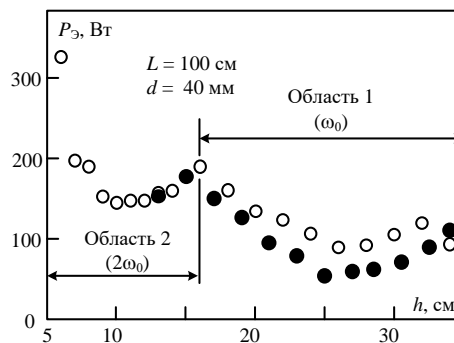


Рис. 5. Зависимость электрической мощности нагревателя при начале генерация звука от высоты размещения нагревателя (L и d – длина и внутренний диаметр трубы)

Попытки измерения зависимости $P_э(h)$, перемещая нагреватель в вверх, вдоль трубы, разогретой поднимающимся горячим воздухом, не имели успеха из-за невозможности возбудить генерацию при ряде значений h или появления звука при существенно большей мощности. Так, в разогретой трубе при $h = 26$ см звук возникал при $P_э = 150$ Вт, тогда как в холодной трубе генерация начиналась при $P_э = 89$ Вт. Общей тенденцией в эксперименте является то, что в холодной трубе генерация возникает плавно при малых $P_э$ («мягкое» возбуждение), когда свечение спирали нагревателя еще не наблюдается.

На процесс возбуждения звуковых автоколебаний влияет не только тепло, выделяемое нагревателем, но и тепло, идущее от стенок трубы. Тепло от стенок трубы ухудшает акустической ПОС. Уменьшение разности температур воздуха и нагревателя ослабляет отток тепла ΔQ от нагревателя, приводя к дополнительному разогреву нагревателя до температуры T_{H2} .

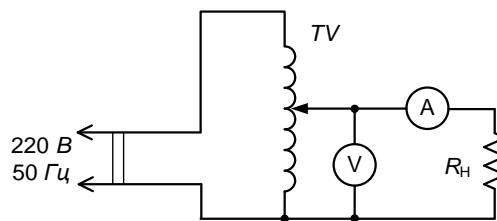
Периодические изменения температуры воздуха ΔT_B под влиянием звука остаются столь же малыми, поэтому отношение $\Delta T_B/T_{H2}$ оказывается слишком малым, чтобы звуковые колебания изменили температуру нагревателя. Отношение $\Delta T_B/T_{H2}$ эквивалентно коэффициенту передачи акустической ПОС, его снижение нарушает «баланс амплитуд», препятствуя возбуждению звука.

Экспериментальная установка, схема измерений и регулировки электрической мощности нагревательного элемента R_H показаны на рис. 6. Измеренные зависимости на рис. 5 имеют две характерные области с экстремумами в виде минимумов мощности $P_э$ в положениях нагревателя $h \cong L/4 = 25$ см и $h \cong L/8 = 12,5$ см. В первой области генерируется главным образом 1-я гармоника (ω_0) – основной тон собственных колебаний воздушного столба в трубе, во 2-й области – вторая гармоника ($2\omega_0$). На границе двух областей одновременно генерируются обе гармоники, рис. 8 и 9.

В обоих случаях наименьшая тепловая энергия, потребляемая от нагревателя для создания звуковых автоколебаний, соответствует условию $h = \lambda/4$. Следовательно, оптимальным положением нагревателя следует считать расстояние, равное четверти длины звуковой волны от нижнего края трубы.



а



б

Рис. 6. Экспериментальная установка (а), схема измерения и регулировки электрической мощности (б), подводимой к нагревателю R_H

5. Результаты и выводы. Экспериментально показано, что звук вокруг трубы Рийке возникает благодаря колебаниям столба воздуха в трубе, а не колебаниям самой трубы. Для этого достаточно было взяться рукой за трубу и убедиться, что звук не меняет своей громкости и частоты. Поднося руку к отверстию «звучащей» трубы, удавалось легко ощутить колебания воздуха с частотой звука.

Колебания столба воздуха в трубе Рийке при расположении нагревателя на высоте $h = L/4$ возбуждаются на основной собственной частоте, что подтверждает справедливость формулы (1) для трубы длиной $L = 1$ м:

$$f_1 = c_0/2L = 340/(2 \cdot 1) = 170 \text{ (Гц)}; \quad (11)$$

Вторая гармоника, возбуждаемая при высоте нагревателя $h = L/8$, равна:

$$2f_1 = 2 \cdot c_0/2L = 2 \cdot 340/(2 \cdot 1) = 340 \text{ (Гц)}; \quad (12)$$

Экспериментальные значения частот $f_1 = 172,4$ Гц и $2f_1 = 333$ Гц измерялись осциллографом на зажимах микрофона, закрепленного у нижнего края трубы, рис. 6. Расхождения с расчетом обусловлены неточностью задания скорости звука в трубе, где необходимо учитывать температуру воздуха.

Экспериментально показана зависимость частоты звука в трубе Рийке от длины трубы. Поверх стеклянной трубы была надета пластиковая труба, которая после начала устойчивой генерации сдвигалась вверх со стеклянной трубы, удлиняя общую длину резонатора. Экспериментальные результаты и рассчитанная зависимость частоты автоколебаний от длины пластмассовой трубы Δl при использовании стеклянной трубы показаны на рис. 7.

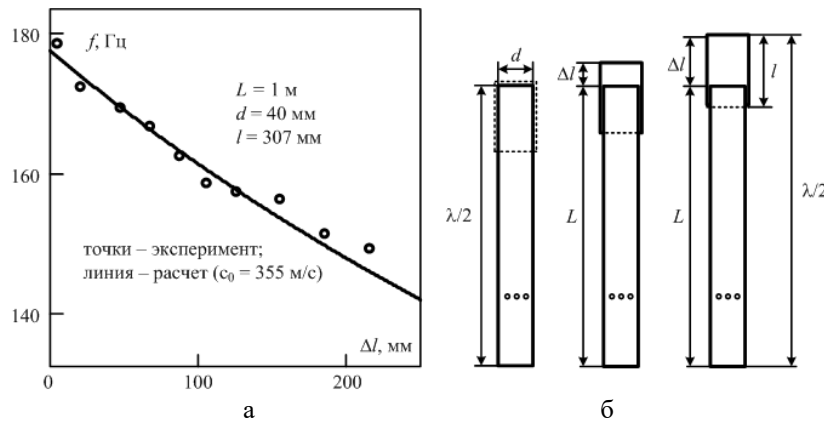


Рис. 7. Зависимость частоты звука (а) от длины пластиковой трубы Δl ; изменение длины резонатора ($L + \Delta l$) выдвиганием пластиковой трубы (б)

После включения нагревателя и появления звука поочередно перекрывались нижнее и верхнее отверстия трубы работающего автогенератора. В обоих случаях прерывание тяги вело к исчезновению звука. Это указывает на необходимость тяги воздуха для существования звуковых колебаний столба воздуха в трубе Рийке. Если закрыть одно из отверстий трубы и сорвать звуковые колебания, спираль раскаляется сильнее, чем при наличии колебаний и открытой трубе. Часть тепловой энергии нагревателя перестает расходоваться на создание тяги и поддержание автоколебаний. Срыв автоколебаний из-за прекращения тяги происходил и при развороте трубы в горизонтальное положение.

Используя микрофон и наблюдая звуковые колебания на осциллографе, показано, что перемещение нагревателя в работающем тепловом автогенераторе из положения $h = L/4$ к нижнему концу трубы сопровождается искажениями синусоидального сигнала. В положении $h \cong L/8$ частота сигнала удваивается, указывая на возбуждение 2-й гармоники и постепенное ослабление 1-й гармоники. Перемещая нагреватель из положения $h = L/4$ в положение $h \cong L/8$, автогенератор постепенно переходит из режима работы на 1-й гармоники в режим совместной генерации 1-й и 2-й гармоник, и далее – в режиме генерации 2-й гармоники, рис. 8 и рис. 9.

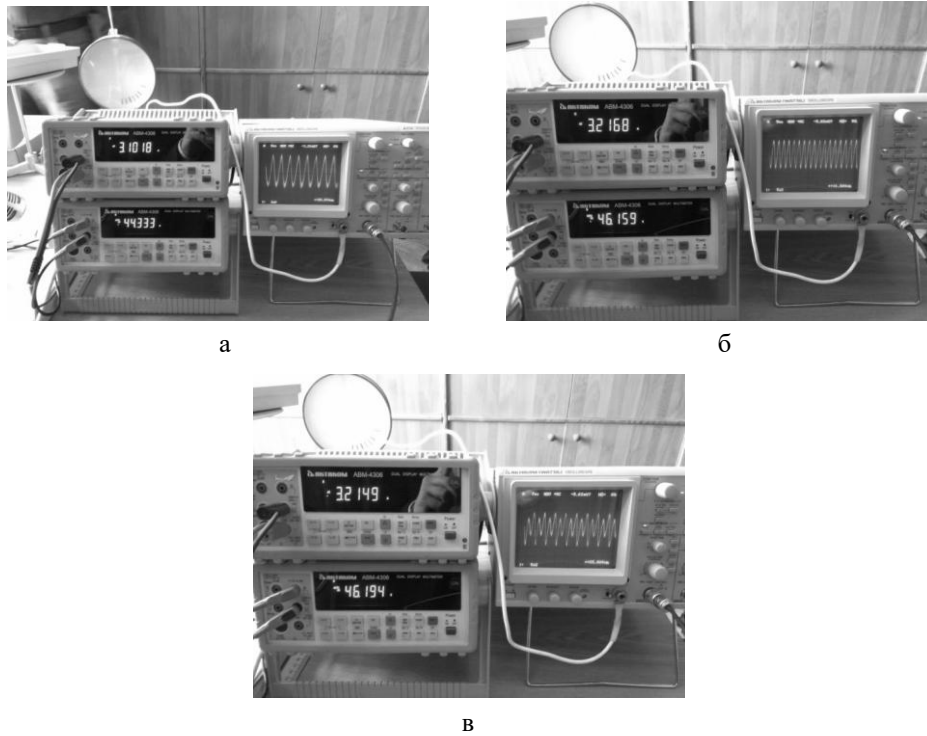


Рис. 8. Экспериментальное Наблюдение автогенерации: а – 1-я гармоника ($f_1 = 172,4$ Гц); б – 2-я гармоника ($2f_1 = 333$ Гц); в – вместе 1-я и 2-я гармоники. Длина трубы $L = 1$ м. Приборы слева, – амперметр (верхний) и вольтметр, контроль питания нагревателя

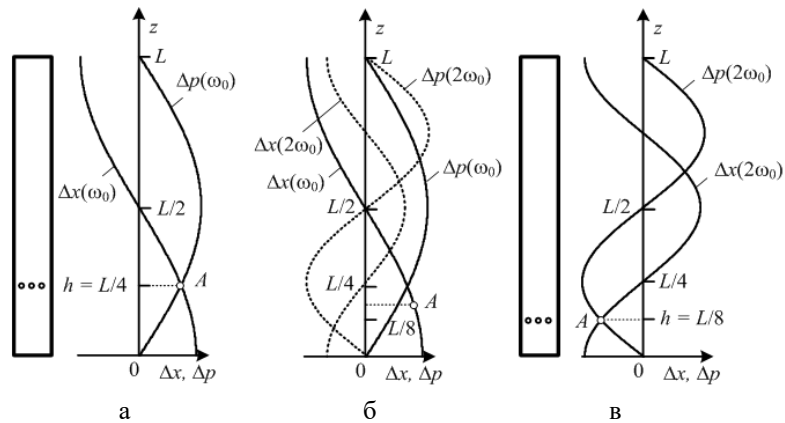


Рис. 9. Зависимость вида автоколебаний столба воздуха в трубе от места расположения нагревателя (точка A)

Экспериментально показано, что размещением нагревателя в верхней половине трубы достигается отрицательная обратная связь. Для этого, возбуждив автоколебания, труба переворачивалась на 180° . Звук исчезал сразу же, как только труба приближалась к горизонтальному положению.

Внутри звучащей трубы создается давление $p(t)$, отличающееся от атмосферного давления p_0 :

$$p(t, z) = p_0 + \Delta p(t, z). \quad (13)$$

Сверху на стеклянную трубу надевалась пластиковая труба такого же диаметра так, что верхние края обеих труб совпали. В этом положении пластиковая труба не влияет на колебания воздуха в стеклянной трубе. После включения нагревателя и установления звуковых колебаний пластиковая труба медленно выдвигалась вверх. Слышно, как снижается частота из-за удлинения колеблющегося столба воздуха и громкость звука из-за нарушения оптимального условия для возбуждения автоколебаний $h = L/4$, рис. 10.

В стенке верхней части пластиковой трубы проделаны несколько отверстий разного диаметра, заклеенные липкой лентой, рис. 10 и 11. Как только отверстия оказались выше верхнего края стеклянной трубы, положение пластиковой трубы фиксируем. Если освободить одно из отверстий от клейкой ленты, звуковые колебания прекращаются.

Влияние открываемых отверстий 1 и 2 равного диаметра (5,5 мм) на срыв генерации звука усиливается для отверстия, более удаленного от края трубы. У равноудаленных от края отверстий 2 и 3 разных диаметров (5 мм и 8,5 мм) генерация срывается резче при открывании большего отверстия, рис. 10, в.

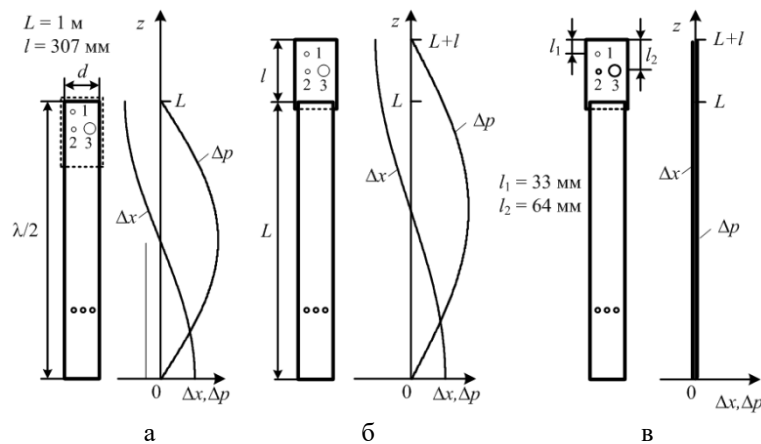


Рис. 10. Влияние длины трубы и открытого отверстия в стенке трубы на термоакустические автоколебания

Срыв автоколебаний при появлении отверстия в стенке трубы вызван выравниванием давления внутри трубы около отверстия с атмосферным давлением. Распределение давления стоячей волны (13) вдоль трубы $\Delta p(z)$ становится невозможным, приводя к срыву колебаний. Удаление места отверстия от края трубы, $l_2 > l_1$ на рис. 10-в, соответствует большему перепаду давления Δp звуковых колебаний внутри трубы. Демпфирующее (тормозящее) действие отверстия 2 на процесс генерации усиливается в сравнении с отверстием 1. В эксперименте использована пластиковая труба длиной $l = 307$ мм с отверстиями на расстояниях $l_1 = 33$ мм и $l_2 = 64$ мм от края.



Рис. 11. Пластиковая труба с отверстиями

Увеличение диаметра отверстия 3 в сравнении с отверстием 2 (оба равноудалены от края трубы) ускоряет выравнивание давления внутри и вне трубы. Поэтому в первом случае срыв колебаний в трубе проходит резко, без явно выраженного процесса затухания звука.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Лепендин Л.Ф.* Акустика. – М.: Высшая школа, 1978. – 448 с.
2. *Крендалл И.Б.* Акустика. – М.: КомКнига, 2005. – 168 с.
3. *Исакович М.А.* Общая акустика. – М.: Наука, 1973. – 496 с.
4. *Ржевкин С.Н.* Курс по теории звука. – М.: Изд-во Московского ун-та, 1960. – 336 с.
5. *Горелик Г.С.* Колебания и волны. – М.: Физматлит, 1959. – 572 с.
6. *Стретт Дж.В.* (Лорд Рэлей) Теория звука. – Т. 1 и Т. 2. – М.: Физматлит, 1955. – 504 с. (Т. 1) и 476 с. (Т. 2).
7. *Галуллин Р.Г., Ревва И.П., Халимов Г.Г.* Теория термических автоколебаний. – Казань: Изд-во казанского университета, 1982. – 155 с.
8. *Ларионов В.М., Зарипов Р.Г.* Автоколебания газа в установках с горением. – Казань: Изд-во казан. гос. техн. ун-та, 2003. – 227 с.
9. *Майер В.В.* Простые опыты со струями и звуком. – М.: Наука, 1985. – 128 с.
10. *Иовлева О.В., Ларионов В.М., Митрофанов Г.А.* Теория термоакустических колебаний газа. Конспект лекций. – Казань: Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт физики, 2014. – 114 с.
11. *Раушенбах Б.В.* Физические основы рабочих процессов в камерах сгорания ВРД. – М.: Машиностроение, 1964. – 347 с.
12. *Раушенбах Б.В.* Вибрационное горение. – М.: Физматгиз, 1961. – 500 с.
13. *Армаков К.И.* Термоакустическая устойчивость. – М.: Машиностроение, 1982. – 261 с.
14. *Гоцуленко В.В., Гоцуленко В.Н.* О независимости автоколебаний феномена Рийке от условий гипотезы Рэля и их динамическое демпфирование // *Авиационно-космическая техника и технология.* – 2012. – № 3. – С. 76-81.
15. *Гоцуленко В.В.* Об аналогии нестационарных режимов воздухонагревателя доменной печи (каупера) и трубы Рийке // *Системные технологии.* – 1999. – № 8. – С. 24-26.
16. *Басок Б.И., Гоцуленко В.В.* Теория феномена Рийке в системе с сосредоточенными параметрами // *Акустический вестник.* – 2010. – Т. 13, № 3. – С. 3-8.
17. *Теодорчик К.Ф.* Автоколебательные системы. – М.-Л.: ГИТТЛ, 1952. – 271 с.
18. *Красильников В.А.* Введение в акустику. – М.: Изд-во МГУ, 1992. – 152 с.
19. *Манаев Е.И.* Основы радиоэлектроники. – М.: Радио и связь, 1985. – 488 с.
20. *Прянишников В.А.* Электроника: Курс лекций. – СПб.: Корона принт., 1998. – 400 с.

REFERENCES

1. *Lependin L.F.* Akustika [Acoustics]. Moscow: Vysshaya shkola, 1978, 448 p.
2. *Krendall I.B.* Akustika [Acoustics]. Moscow: KomKniga, 2005, 168 p.
3. *Isakovich M.A.* Obshchaya akustika [General acoustics]. Moscow: Nauka, 1973, 496 p.
4. *Rzhevkin S.N.* Kurs po teorii zvuka [A course on the theory of sound]. Moscow: Izd-vo Moskovskogo un-ta, 1960, 336 p.
5. *Gorelik G.S.* Kolebaniya i volny [Vibrations and waves]. Moscow: Fizmatlit, 1959, 572 p.
6. *Strett Dzh.V.* (Lord Reley) Teoriya zvuka [The theory of sound], Vol. 1 and Vol. 2. Moscow: Fizmatlit, 1955, 504 p. (Vol. 1) and 476 p. (Vol. 2).
7. *Galiullin R.G., Revva I.P., Khalimov G.G.* Teoriya termicheskikh avtokolebaniy [The theory of thermal self-oscillations]. Kazan': Izd-vo kazanskogo universiteta, 1982, 155 p.
8. *Larionov V.M., Zaripov R.G.* Avtokolebaniya gaza v ustanovkakh s goreniem [Self-oscillations of gas in installations with combustion]. Kazan': Izd-vo kazan. gos. tekhn. un-ta, 2003, 227 p.
9. *Mayer V.V.* Prostye opyty so struyami i zvukom [Simple experiments with jets and sound]. Moscow: Nauka, 1985, 128 p.
10. *Iovleva O.V., Larionov V.M., Mitrofanov G.A.* Teoriya termoakusticheskikh kolebaniy gaza. Konspekt lektsiy [The theory of thermoacoustic oscillations of gas. Lecture notes]. Kazan': Kazanskiy (Privolzhskiy) federal'nyy universitet, Institut fiziki, 2014, 114 p.
11. *Raushenbakh B.V.* Fizicheskie osnovy rabochikh protsessov v kamerakh sgoraniya VRD [The physical basis of the working processes in the combustion chambers of the WFD]. Moscow: Mashinostroenie, 1964, 347 p.
12. *Raushenbakh B.V.* Vibratsionnoe gorenie [Vibration burning]. Moscow: Fizmatgiz, 1961, 500 p.
13. *Armakov K.I.* Termoakusticheskaya ustoychivost' [Thermoacoustic stability]. Moscow: Mashinostroenie, 1982, 261 p.
14. *Gotsulenko V.V., Gotsulenko V.N.* O nezavisimosti avtokolebaniy fenomena Riyke ot usloviy gipotezy Releya i ikh dinamicheskoe dempfirovanie [On the independence of the Rike phenomenon self-oscillations from the Rayleigh hypothesis conditions and their dynamic damping]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya* [Aerospace engineering and technology], 2012, No. 3, pp. 76-81.
15. *Gotsulenko V.V.* Ob analogii nestatsionarnykh rezhimov vozdukhonagrevatelya domennoy pechi (kaupera) i truby Riyke [On the analogy of non-stationary regimes of the blast furnace air heater (Cowper) and the Reike pipe], *Sistemnye tekhnologii* [System technologies], 1999, No. 8, pp. 24-26.
16. *Basok B.I., Gotsulenko V.V.* Teoriya fenomena Riyke v sisteme s sosredotochennymi parametrami [Theory of the Rike phenomenon in a system with concentrated parameters], *Akusticheskiy vestnik* [Acoustic Bulletin], 2010, Vol. 13, No. 3, pp. 3-8.
17. *Teodorichik K.F.* Avtokolebatel'nye sistemy [Self-oscillating systems]. Moscow-Leningrad: GITTL, 1952, 271 p.
18. *Krasil'nikov V.A.* Vvedenie v akustiku [Introduction to acoustics]. Moscow: Izd-vo MGU, 1992, 152 p.
19. *Manaev E.I.* Osnovy radioelektroniki [Basics of radio electronics]. Moscow: Radio i svyaz', 1985, 488 p.
20. *Pryanishnikov V.A.* Elektronika: Kurs lektsiy [Electronics: a course of lectures]. Saint Petersburg: Korona print., 1998, 400 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.П. Заграй.

Гаврилов Александр Максимович – Южный федеральный университет; e-mail: amgavr@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 89514937721; кафедра физики; доцент.

Севастьянов Никита Дмитриевич – e-mail: nikita_seva@mail.ru; тел.: 89281253998; студент.

Gavrilov Alexandr Maksimovich – Southern Federal University; e-mail: amgavr@sfedu.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79514937721; the department of physics; associate professor.

Sevastjanov Nikita Dmitrijevich – e-mail: nikita_seva@mail.ru; phone: +79281253998; student.