

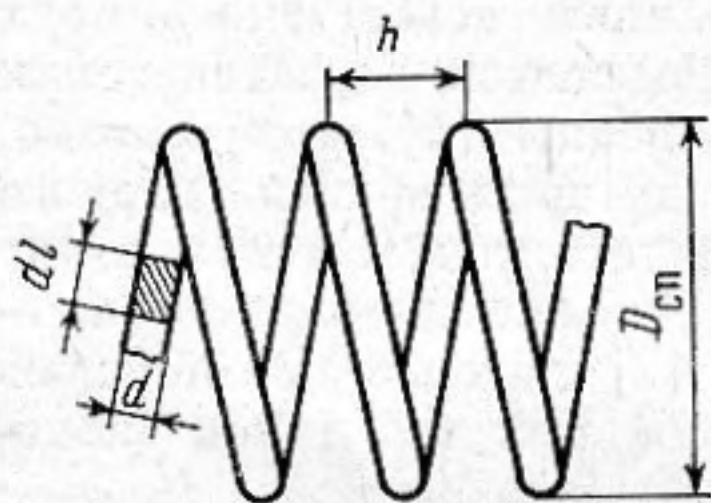
УДК 534.86(088.8)

**ТРУБА РИЙКЕ КАК ИСТОЧНИК ОДНОЧАСТОТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ**

*Польшин А. В.*

Представление трубы Рийке в виде термодинамически релаксационной системы позволяет для теплообменного источника выделить условия возбуждения каждой собственной частоты резонатора. Анализ наличных экспериментальных данных подтверждает правильность такого подхода и позволяет управлять колебаниями Рийке.

Как источник акустических колебаний труба Рийке известна давно, но использование ее в научных и каких-либо других целях наталкивается на отсутствие возможности управления этим явлением [1]. Спектр колебаний Рийке представляет сумму нескольких собственных частот резонатора и до последнего времени выделение отдельных частот носит случайный характер. По мнению некоторых исследователей, авторов работы



Фиг. 1. Фрагмент спирального электронагревателя

[2], экспериментальные данные пока вообще не поддаются обобщению. В данной статье предлагается методика расчета параметров управления колебаниями Рийке на основе результатов работы [3], где определяются условия возбуждения колебаний, наглядно подтвержденные широким кругом экспериментов.

Идея состоит в том, что термоакустические колебания подобны колебаниям рабочего тела в цилиндре тепловой машины, когда тепло подводится через стенки с конечной теплопроводностью. Такие колебания представля-

ют собой элементарный релаксационный процесс [4] и, следовательно, должны описываться динамическим уравнением состояния, в котором время релаксации определяется тепловой инерционностью стенок цилиндра. В трубе Рийке роль таких теплоинерционных стенок играет теплообменный нагреватель в виде либо раскаленной сетки, либо электрической спирали и т. п.

Рассмотрим трубу Рийке с нагревателем в виде электрической спирали, фрагмент которой показан на фиг. 1. Определение времени релаксации для спирали в общем случае является весьма сложной задачей, поскольку пришлось бы привлекать законы нестационарного теплообмена и учитывать влияние акустических колебаний. Однако для момента начала колебаний, когда выполняется квазистационарное приближение и влиянием колебаний можно пренебречь, параметр  $\tau$  определяется достаточно просто.

Выделим на некотором участке спирали элемент  $dl$ , условия на концах которого соответствуют случаю бесконечной нити. Тогда условие теплового баланса спирали с газовой средой будет

$$dq - c \, dm \frac{dT_{сп}}{dt} = \alpha (T_{сп} - T_r) dS,$$

где  $c$  — теплоемкость материала спирали,  $dm$  — элемент массы спирали,  $T_{сп}$  — средняя температура спирали,  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи от спирали к газу,  $T_r$  — температура газа,  $dS$  — поверхность элемента спирали  $dl$ , непосредственно соприкасающаяся с газом,  $dq$  — количество тепла, выделяемое участком спирали  $dl$ .

Будем считать, что тепловая мощность спирали равна ее значению в стационарном режиме, т. е.

$$dq = dq_0 = \alpha (T_{\text{сп}} - T_{\text{ог}}) dS,$$

где  $T_{\text{сп}}$ ,  $T_{\text{ог}}$  — температура спирали и газа без колебаний.

Полагая  $T_{\text{ог}} = T_{\text{г}}$ , что наблюдается в экспериментах при звуковых колебаниях малой интенсивности, получим:

$$\frac{dT_{\text{сп}}}{dt} = - \frac{T_{\text{сп}} - T_{\text{огсп}}}{\frac{c dm}{\alpha dS}}.$$

Это уравнение, если приравнять знаменатель правой части  $\tau$ , имеет вид простейшего релаксационного уравнения:

$$\frac{dT_{\text{сп}}}{dt} = - \frac{T_{\text{сп}} - T_{\text{огсп}}}{\tau}$$

где

$$\tau = \frac{c dm}{\alpha dS}.$$

Определяя  $dm$  и  $dS$ , получим:

$$\tau = \frac{c \rho_c d}{\alpha},$$

где  $\rho_c$  — плотность материала спирали,  $d$  — диаметр проволоки спирали.

Теперь вопрос сводится к определению коэффициента теплоотдачи, что тоже достаточно сложная задача, поскольку теплообмен спирали очень сильно отличается от теплообмена единичной нити. Однако в нашем случае, можно воспользоваться данными из работ [5, 6], где коэффициент теплоотдачи определяется критериальным уравнением вида:

$$Nu = c^* Re^n,$$

где  $c^*$ ,  $n$  — эмпирические коэффициенты, зависящие от геометрии спирали и режима течения.

Значения чисел Нуссельта и Рейнольдса рассчитываются по диаметру проволоки, плотность и вязкость среды выбираются по температуре, равной среднему арифметическому температур набегавшего потока и спирали.

Обобщение опытных данных из работы [5] приводит к следующим зависимостям для одиночных спиралей:

$$Re < 1400, \bar{h} < 2 \quad Nu = 0,106 (\bar{h})^{2,2} Re^{(0,8-0,15\bar{h})},$$

$$Re < 1400, \bar{h} > 2 \quad Nu = 0,46 Re^{0,49},$$

$$Re > 1400, \bar{h} < 2 \quad Nu = 0,26 (\bar{D}_{\text{сп}})^{-0,07} (\bar{h})^{0,25} Re^{0,57}.$$

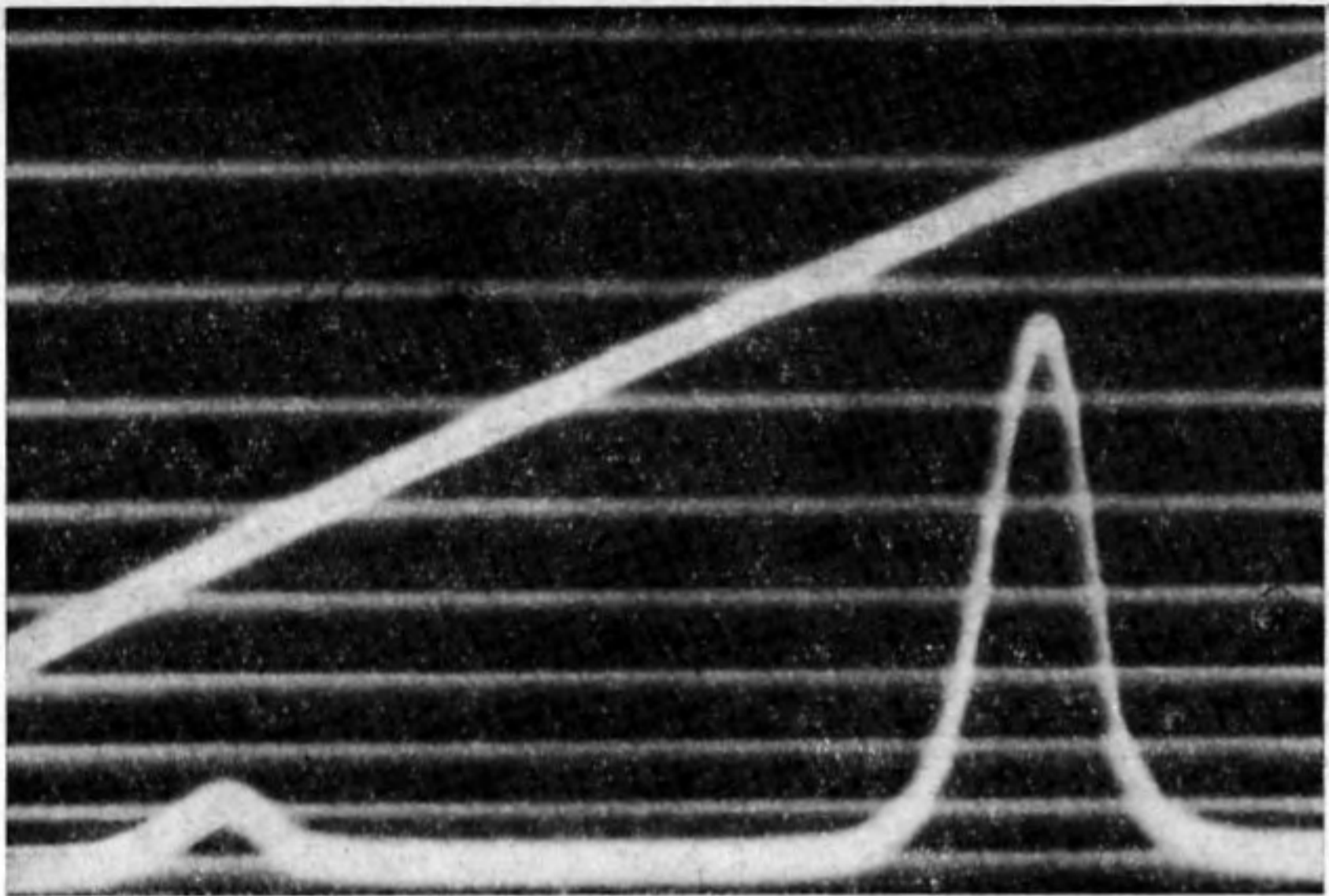
$$Re > 1400, \bar{h} > 2 \quad Nu = 0,3 (\bar{D}_{\text{сп}})^{-0,08} Re^{0,57},$$

где  $\bar{h} = h/d$  — шаг спирали, отнесенный к диаметру проволоки спирали,  $\bar{D}_{\text{сп}} = D_{\text{сп}}/d$  — диаметр витка спирали, отнесенный к диаметру проволоки. Поскольку

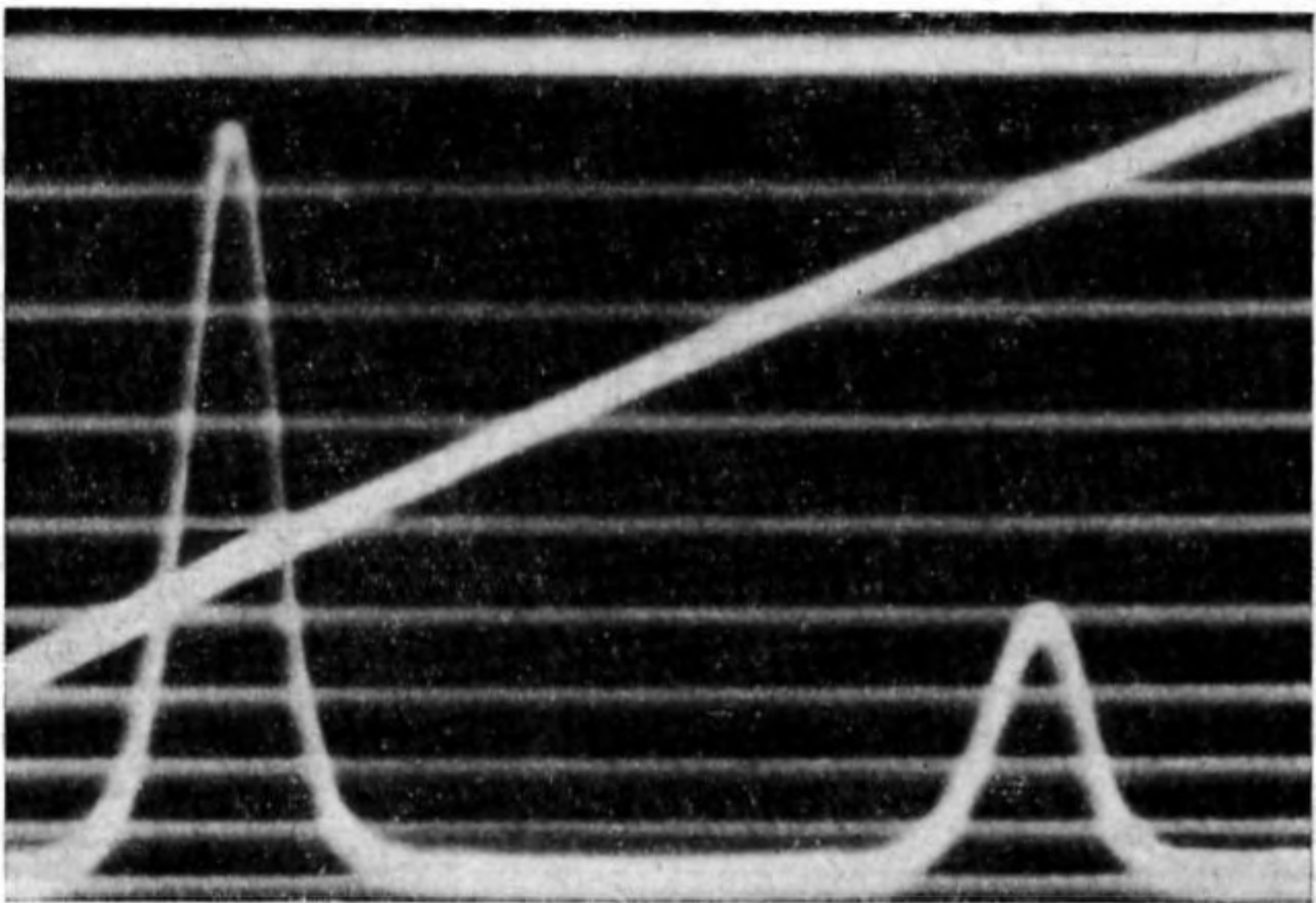
$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda},$$

где  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности материала спирали, то

$$\tau = \frac{c \rho_c d^2}{4 Nu \lambda}.$$



Фиг. 2. Спектрограмма колебаний в трубе Рийке при  $\tau=0,002$  с



Фиг. 3. Спектрограмма колебаний в трубе Рийке при  $\tau=0,004$  с

Физическая суть параметра  $\tau$ , характеризующего тепловую инерционность источника тепла, заключается в следующем.

Как показал еще Рэлей [7], для того чтобы тепловая энергия в термоакустической установке переходила в звуковые колебания, тепло необходимо подводить с частотой в два раза большей, чем возбуждаемая частота, т. е. необходимо обеспечить условие возникновения параметрического резонанса. Тепловая инерционность нагревателя через автоколебательную обратную связь термоакустической системы реализует переменный теплоподвод с необходимой частотой.

Таким образом, если параметр  $\tau$  равняется половине периода возбуждаемой частоты или хотя бы кратен этой величине, то в термоакустической установке должны возбуждаться колебания только заданной частоты с наименьшей примесью посторонних гармоник.

Качественное подтверждение этому можно найти практически во всех экспериментальных работах. Но для количественной проверки были проведены дополнительные исследования с учетом теплофизических свойств нагревателя.

Установка состояла из кварцевой трубы, установленной на ресивере с системой подачи воздуха. Изменялись скорость потока, подаваемая на спираль мощность и геометрические характеристики спирали. Измерялись уровень звукового давления на нижнем срезе трубы, температуры воздуха и спирали. С помощью микрофона БК-1, установленного у нижнего конца трубы, и спектроанализатора контролировалось содержание собственных частот в спектре колебаний. Шаг и диаметр витка спирали, диаметр проволоки выбирались в соответствии с предлагаемой методикой расчета и с учетом диапазона скоростей, который можно реализовать на установке.

На спектрограммах фиг. 2 и фиг. 3 приведены спектры колебаний, полученные в трубе с внутренним диаметром 140 мм и длиной 1,21 м. На фиг. 2 параметр  $\tau$  соответствовал 2-й гармонике, а на фиг. 3 параметр  $\tau$  был более близок к первой гармонике, но не точно. Расчет параметра  $\tau$  для спектрограммы на фиг. 2 дал значение, равное 0,002 с, что с достаточной точностью соответствует 2-й гармонике. Уровень звукового давления на срезе трубы равнялся 130 дБ. Значение  $\tau$  для спектрограммы на фиг. 3 равно 0,004 с, что ближе к 1-й гармонике, но не точно. Поэтому имеется существенная доля 2-й гармоники. В обоих случаях нагреватель находился на расстоянии  $1/4$  длины трубы от нижнего конца.

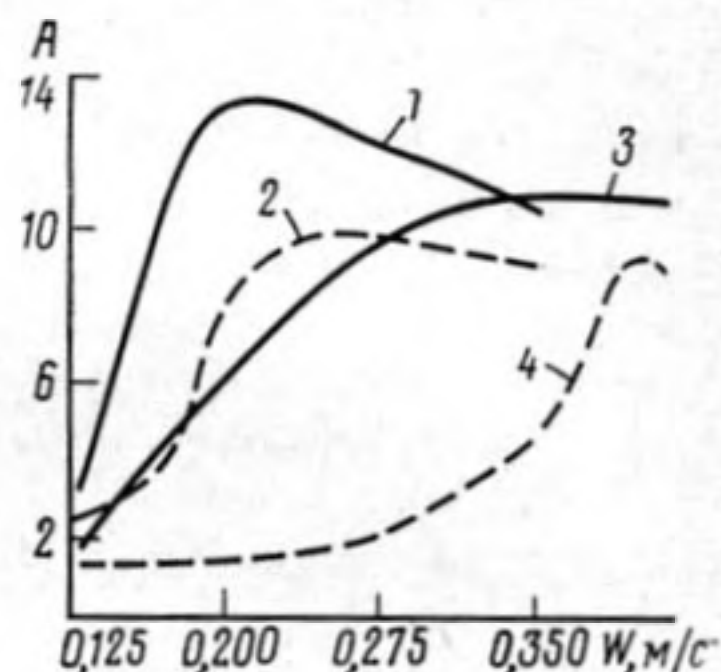
Изменяя параметр  $\tau$  непрерывно, например путем увеличения скорости, можно поочередно возбуждать разные собственные гармоники трубы Рийке. Аналогичные результаты были получены и в работе [2], но авторы не смогли их объяснить.

На фиг. 4 показаны изменения амплитуд 1-й и 2-й гармоник трубы Рийке в зависимости от скорости продувки газа, т. е. от величины параметра  $\tau$ . Хорошо видно, особенно для кривых 3, 4, что максимум 2-й гармоники находится за максимумом 1-й для всех нагревателей. Аналогично влияет шаг спирали, материал нагревателя и т. д.

Таким образом, расчет трубы Рийке на определенную частоту можно свести к процедуре расчета параметра  $\tau$  и обеспечению необходимой скорости продувки.

Следует отметить, что возбуждение колебаний одним источником тепла достаточно эффективно только для 1-й и 2-й гармоник. Для возбуждения гармоник более высокого порядка число нагревателей необходимо увеличивать. Так уже для 2-й гармоники имеется две точки, где подвод тепла обеспечивает самую эффективную генерацию звука. Для 3-й гармоники уже три точки и т. д. Формула для расчета точек подвода тепла дана в работе [8]. Однако, увеличение числа нагревателей, не изменяет способа их расчета по параметру  $\tau$ .

Использование подобного подхода для моделирования явления Рийке позволяет дать толкование большинству имеющихся экспериментальных данных и дает возможность применять трубы Рийке в качестве генераторов определенных частот.



Фиг. 4. Зависимость амплитуд колебаний 1-й и 2-й гармоник трубы Рийке от скорости продувки: 1, 2 — 1-я и 2-я гармоники при  $d=2,0$  мм,  $h=2,33$  мм; 3, 4 — 1-я и 2-я гармоники при  $d=0,7$  мм,  $h=1,54$  мм

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Белик Н. П., Беляев Н. М., Польшин А. В. Обзор литературы по термоакустическим колебаниям Рийке и Зондхаусса. Деп. ВИНТИ № 7742-73 от 26.12.1973, 46 с.
2. Katto Y., Sajiki A. Onset of Oscillation of a Gas — Column in a Tube Due to the

Existence of Heat-Conduction Field.— Bulletin of the JSME, v. 20, № 147, September, 1977, p. 1161–1168.

3. *Польшин А. В.* Динамическое условие возбуждения термоакустических колебаний.— В кн. Прикладные вопросы теплообмена. Днепропетровск: Госуниверситет, 1978, вып. 3, с. 27–30.
4. *Остроумов Г. А.* Основы нелинейной акустики. Л.: ЛГУ, 1967.
5. *Латенко Б. В.* Исследование теплоотдачи проволочных спиралей в поперечном потоке воздуха.— Изв. высш. учеб. заведений. Энергетика, 1959, № 9, с. 93.
6. *Пелейченко И. П., Доценко Ю. Н.* Теплоотдача тонких проволок, свернутых спиралью.— Изв. высш. учеб. заведений. Энергетика, 1970, № 4, с. 133–136.
7. *Стретт Дж.* (Лорд Рэлей). Теория звука. М.: Гостехиздат, 1944, т. 2.
8. *Collyer A. A., Ayres D. J.* The generation of sound in a Rijke tube using two heating coils.— J. Phys. D: Appl. Phys., v. 5, № 8, 1972, p. L74–L76.

Днепропетровский государственный  
университет им. 300-летия воссоединения  
Украины с Россией

Поступила в редакцию  
10.VII.1980