

УДК 534.26

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДУШНО-МАГНИТОЖИДКОСТНОГО РЕЗОНАТОРА

© 2002 г. Г. В. Карпова, О. В. Лобова, В. М. Пауков,
В. М. Полунин, Е. Б. Постников*

*Курский государственный технический университет
305040 Курск, ул. 50 лет Октября 94*

** Курский государственный педагогический университет
305416 Курск, ул. Радищева 33*

E-mail: postnicov@mail.ru

Поступила в редакцию 18.04.2001 г.

Обсуждаются результаты экспериментального исследования упругих свойств колебательной системы, массивным элементом которой является магнитная жидкость, перекрывающая под влиянием магнитного поля сечение трубки, подпружиненная воздушной полостью и упругостью пондеромоторного типа. Получено выражение для резонансной частоты колебаний, учитывающее упругости обоих типов, которое удовлетворительно согласуется с опытными данными.

В настоящей статье приводятся результаты исследования упругих свойств колебательной системы, массивным элементом которой является магнитная жидкость (МЖ), перекрывающая под влиянием магнитного поля сечение трубки, подпружиненная воздушной полостью и упругостью пондеромоторного типа.

В работах [1, 2] рассмотрен гидро-воздушный резонатор, представляющий собой сосуд, закрытый сверху жесткой крышкой и погруженный в воду. Воздух внутри сосуда является упругим элементом резонатора, а вода в нижней части сосуда вместе с водой вблизи открытого конца – массивным элементом.

Применение в гидро-воздушном резонаторе МЖ придает ему новые физические свойства. В воздушно-магнитожидкостном резонаторе (ВМЖР) жидкость может находиться над газовой полостью благодаря стабилизации межфазной границы неоднородным магнитным полем, возможна плавная перестройка резонансной частоты как за счет изменения объема воздушной полости, так и за счет управления упругостью системы магнитным полем. Для возбуждения механических колебаний системы пригоден электродинамический метод, а индикация колебаний возможна на основе индукционного метода.

Актуальность исследования ВМЖР обусловлена еще и тем, что полученные результаты могут быть полезны при конструировании магнитожидкостных уплотнений (МЖУ) и демпферов, широко применяемых в машиностроении [3], а также волноводов с управляющими структурными вставками [4]. В МЖУ капля магнитного коллоида перекрывает зазор между валом и втулкой

благодаря удерживающему действию сконцентрированного в области зазора магнитного поля. Однако в публикациях, посвященных МЖУ, возможность возникновения упругих колебаний магнитожидкостной перемычки не учитывается, хотя, очевидно, такую возможность полностью исключить нельзя, например, в условиях неустойчивости давления в рабочей камере или за ее пределами.

Перекрытие сечения трубки, соединенной с сосудом, каплей МЖ может быть осуществлено при помощи кольцевого магнита, охватывающего трубку [5]. Магнитное поле кольцевого магнита, намагниченного вдоль оси, способно стабилизировать положение МЖ-перемычки.

Схематическое устройство исследуемой колебательной системы показано на рис. 1. Капля МЖ 1 перекрывает сечение стеклянной трубки 2 под действием пондеромоторной силы неоднородного магнитного поля, созданного соосно расположенным кольцевым магнитом 3. Трубка с внутренним диаметром d припаяна к стеклянному сосуду 4, заполненному воздухом. (Применялись также стеклянные трубки различной длины, запаянные с одного конца). Обе свободные поверхности МЖ-перемычки 5 имеют форму вогнутого мениска, что обусловлено неоднородностью магнитного поля в радиальном направлении.

В эксперименте использовалась МЖ, приготовленная по стандартной методике на основе магнетита и керосина с применением в качестве стабилизатора олеиновой кислоты.

Физические параметры магнитного коллоида приведены в табл. 1.

Обозначения: ρ – плотность жидкости, φ – объемная концентрация твердой фазы, η_s – статическая сдвиговая вязкость, χ – начальная магнитная восприимчивость.

Измерения плотности и вязкости проводились при помощи пикнометра и вискозиметра Оствальда, намагниченность – баллистическим методом, напряженность магнитного поля – теслометром холловского типа РШ1-10. Все опыты выполнялись при комнатной температуре $20 \pm 1^\circ\text{C}$.

В отличие от пленок, образуемых обычными жидкостями (например, мыльные пленки) МЖ-перемычка характеризуется высокой устойчивостью (время жизни их измеряется неделями и месяцами), но самое характерное отличие заключается в способности к самовосстанавливанию [5]. Вслед за принудительным разрывом перемычка достаточно быстро восстанавливает свои сплошность и форму. Возникающий при этом скачок давления выводит колебательную систему из равновесия. Для разрыва МЖ-перемычки достаточно изменить объем газосодержащей полости на $\sim 0.1\%$ путем перемещения магнитной системы вдоль трубки или поршня – внутри трубки. Описанное явление положено в основу методики возбуждения колебаний исследуемой системы.

Индикация затухающих колебаний осуществляется индукционным методом, для чего внутри кольцевого магнита соосно с ним размещена катушка индуктивности. Корпус катушки жестко связан с магнитом, но между корпусом и трубкой имеется воздушный зазор, обеспечивающий возможность свободного перемещения магнитной системы вдоль оси.

Индукцируемая в катушке ЭДС подается на вход осциллографа С1-117, работающего в режиме внешней синхронизации. Электромеханический узел установки обеспечивает равномерное перемещение магнитной системы (поршня) с заданной малой скоростью, при которой невозможно наложение колебаний системы от двух последующих толчков. При этом на экране осциллографа наблюдается стабильная осциллограмма, по которой определяются частота ν и коэффициент затухания колебаний β . Погрешность измерения ν и β указанным методом составляет соответственно 5 и 20%.

На рис. 2. точками представлены результаты измерений частоты колебаний ВМЖР ν в зависимости от объема воздушной полости V_0 .

В таблице 2 приведены результаты измерения коэффициента затухания β колебаний системы.

Следует отметить, что в верхней части исследованного нами диапазона частот (80–200 Гц) в отдельных опытах осциллограммы носят нерегулярный характер, отличный от типичного экспоненциального спада амплитуды затухающих колебаний, что, по-видимому, обусловлено воздей-

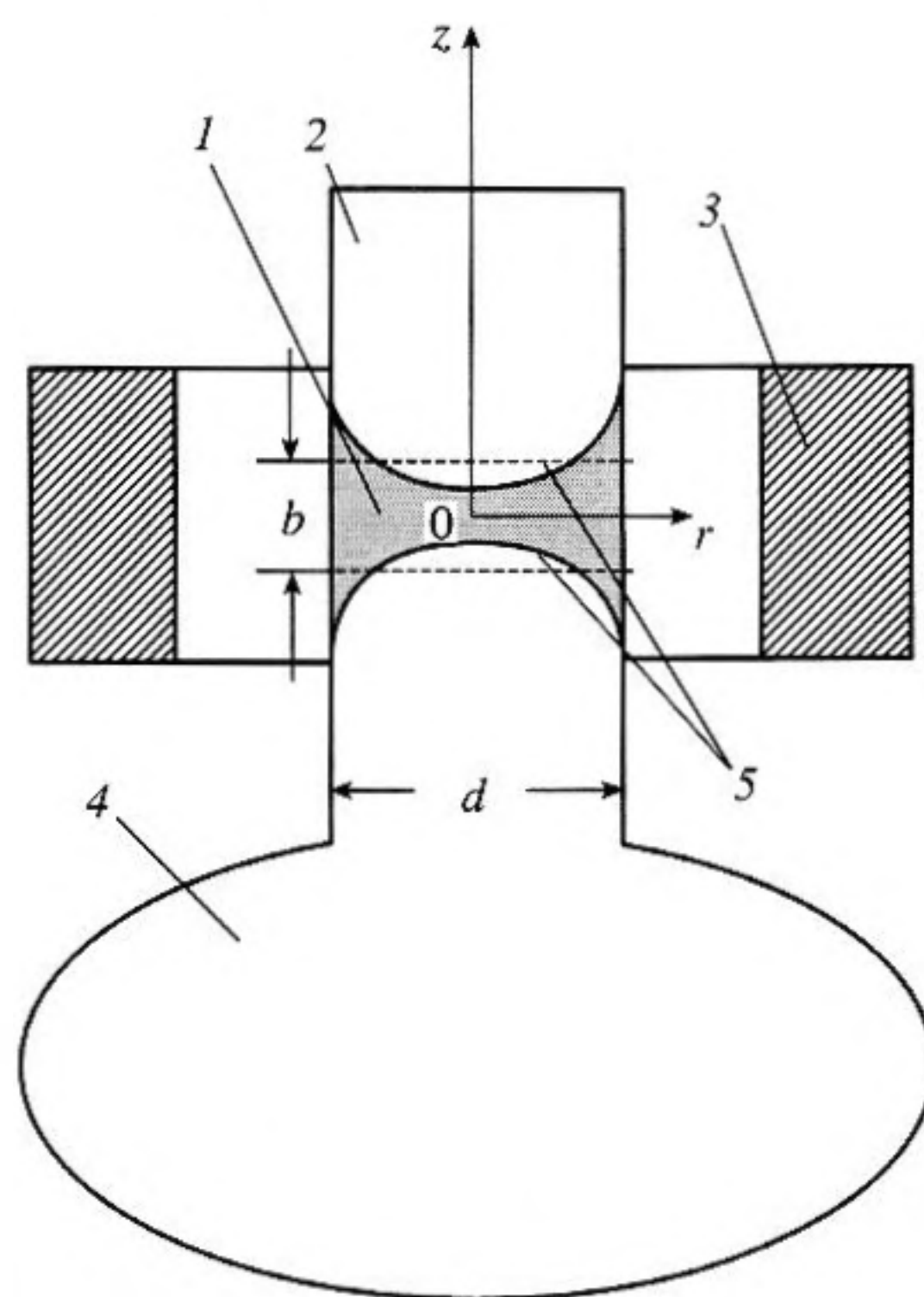


Рис. 1.

ствием на МЖ-перемычку звуковых колебаний, возникающих в воздушной полости со стороны открытого конца трубки и во внутренней изолированной полости. Указанное явление представляет самостоятельный интерес и нуждается в дополнительном исследовании. Поэтому в таблице 2 не приводятся данные для частот колебаний, превышающих 63 Гц.

Анализ результатов экспериментального исследования ВМЖР проведем на основе модели колебательной системы с сосредоточенными параметрами. Будем полагать, что обе свободные поверхности жидкости плоские (пунктир на рис. 1) и отстоят друг от друга на расстояние b . Жидкость является вязкой, но несжимаемой и нетеплопроводной. Колебания плотности газа носят равновесный характер. Коэффициент упругости системы k определяется суммой

$$k = k_g + k_p, \quad (1)$$

где k_g и k_p – коэффициенты газовой и пондеромоторной упругости. Выражение k_g известно [1, 2]:

$$k_g = \rho_g c^2 S^2 / V_0, \quad (2)$$

Таблица 1

ρ , кг/м ³	φ , %	η_s , Па с	M_s , кА/м	χ
1499	16.2	8×10^{-3}	50 ± 1	1 ± 0.1

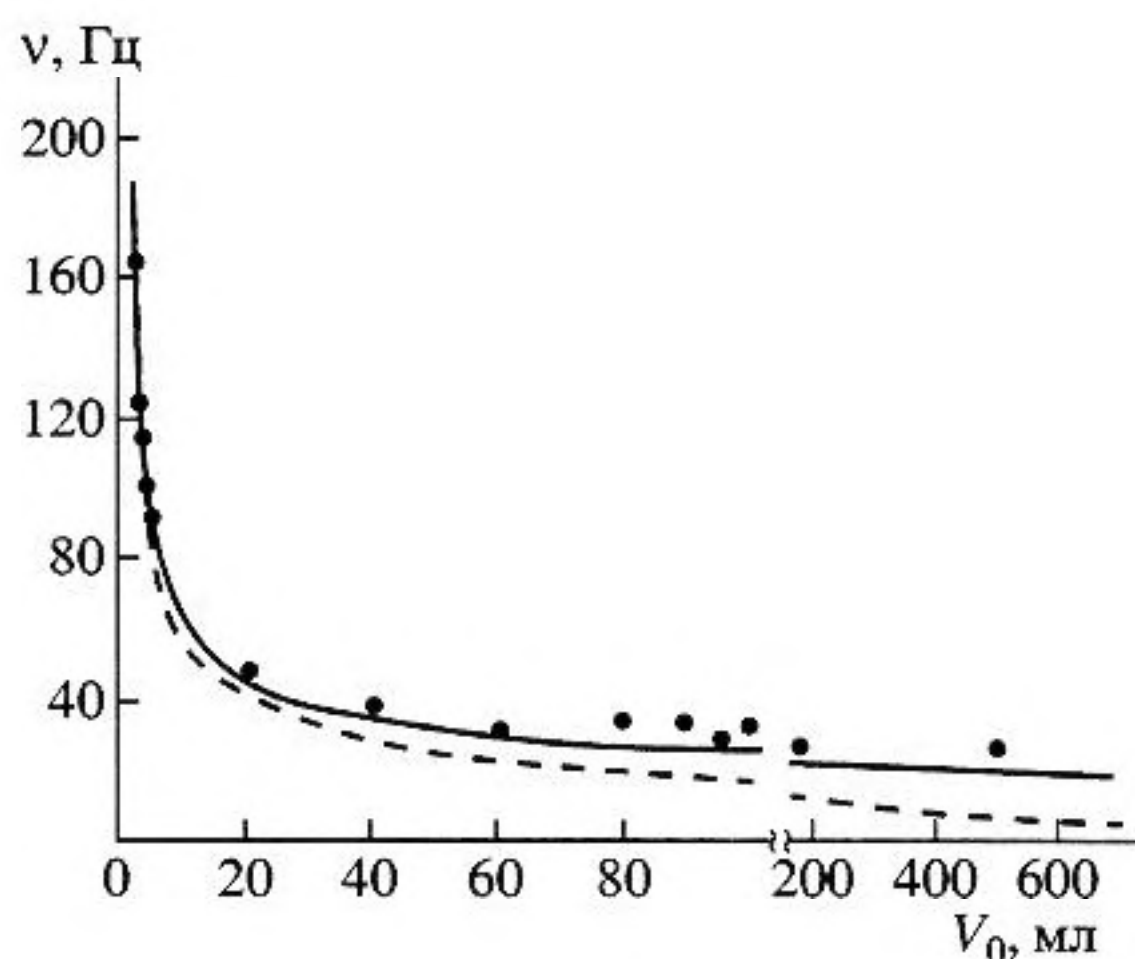


Рис. 2.

где ρ_g – плотность воздуха, c – скорость звука в воздухе, S – площадь кругового сечения трубки, V_0 – объем воздушной полости.

Для получения k_p будем исходить из предположения, что центр масс капли МЖ, имеющей форму цилиндра с радиусом R , совершает малые колебания вдоль оси z около положения равновесия в точке $z = 0$ (рис. 1). При перемещении центра масс на Δz на каждый элемент магнитожидкостного цилиндра со стороны магнитного поля действует сила [6]

$$df = 2\pi\mu_0(M\nabla)Hrdrdz,$$

где μ_0 – магнитная постоянная, $M(z, r)$ – намагниченность жидкости. Для осевой составляющей силы получаем:

$$\Delta f_z = 2\pi\mu_0 \int_{-\frac{b}{2} + \Delta z}^{\frac{b}{2} + \Delta z} \int_0^R \left[M_r \frac{\partial H_z}{\partial r} + M_z \frac{\partial H_z}{\partial z} \right] r dr dz, \quad (3)$$

где M_z и M_r – радиальная и осевая составляющие M . Соотношение линейных размеров магнитожидкостного цилиндра и кольцевого магнита таково, что первым членом в квадратных скобках, а также зависимостью второго от радиальной координаты можно пренебречь. Для материалов с малой магнитной восприимчивостью можно вос-

Таблица 2

ν , Гц	28	29	35	37	40	49	63
β , c^{-1}	10	10	20	22	26	28	45
$\beta/\sqrt{\nu}$, $c^{-1/2}$	1.9	1.9	3.4	3.6	4.1	4	5.7
β_T , c^{-1}	2.7	3.8	3.0	3.1	3.3	3.6	4.1

пользоваться линейным уравнением магнитного состояния:

$$M = \chi H$$

и пренебречь размагничивающим полем. С учетом сказанного, выражение (3) принимает вид

$$\Delta f_z = \frac{1}{2}\mu_0\chi S \int_{-\frac{b}{2} + \Delta z}^{\frac{b}{2} + \Delta z} \frac{\partial H_z^2}{\partial z} dz.$$

В силу симметрии магнитного поля относительно плоскости $z = 0$ получим

$$\Delta f_z = -2\mu_0\chi S \left(H_z \frac{\partial H_z}{\partial z} \right)_{z=-b/2} \Delta z,$$

$$\text{или } \Delta f_z = -2\mu_0 S \left(M_z \frac{\partial H_z}{\partial z} \right)_{z=-b/2} \Delta z.$$

Откуда следует

$$k_p = 2\mu_0 S \left(M_z \frac{\partial H_z}{\partial z} \right)_{z=-b/2}. \quad (4)$$

Если же МЖ намагничена до насыщения, то

$$k_p = 2\mu_0 S M_s \left(\frac{\partial H_z}{\partial z} \right)_{z=-b/2}. \quad (5)$$

Частота колебаний с учетом (2) и (4) находится из выражения:

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_g c^2 S}{\rho b V_0} + \frac{2\mu_0 M_s \frac{\partial H_z}{\partial z}}{\rho b}}. \quad (6)$$

В отсутствие магнитного поля:

$$\nu = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_g S}{\rho V_0}}. \quad (7)$$

Возвратно-поступательное перемещение вязкой капли внутри трубки может быть описано двумя известными моделями – Пуазейля и Гельмгольца [7]. Модель Пуазейля применима при условии $2\lambda' > \pi d$, где $\lambda' = 2\sqrt{\pi\eta/\nu\rho}$ – длина вязкой волны.

В нашем случае предпочтение следует отдать модели Гельмгольца, поскольку выполнено требование малости длины вязкой волны: $\pi d/2\lambda' > 10$. При этом условии комплексный импеданс трубки R' приближенно равен

$$R' \approx db\sqrt{\pi^3 \rho \eta \nu} + i \frac{\pi^2 d^2 \rho \nu}{2} \left(1 + \frac{2}{d} \sqrt{\frac{\eta}{\pi \nu \rho}} \right). \quad (8)$$

Величина активного сопротивления

$$r' = db\sqrt{\pi^3 \rho \eta \nu} \quad (9)$$

возрастает с увеличением ν . Выражение (9) было впервые получено Гельмгольцем [8]. Вторым

слагаемым в скобках формулы (8) можно пренебречь, из чего следует вывод об отсутствии присоединенной массы, обусловленной вязкостью жидкости. Коэффициент затухания согласно модели Гельмгольца рассчитывается по формуле

$$\beta_T = \frac{2}{d} \sqrt{\frac{\pi v \eta}{\rho}} \quad (10)$$

Следует отметить, что вязкое колебательное движение капли МЖ может быть описано модельной теорией с той же степенью приближения, как и в случае простой жидкости, поскольку сдвиговая вязкость магнитного коллоида практически не зависит от его намагниченности [9].

Приведенные значения коэффициента затухания β/\sqrt{v} , значения β_T , рассчитанные по формуле (10), представлены в таблице 2. Численные значения β_T почти на порядок отличаются от экспериментальных данных. За пределами погрешности измерений наблюдается возрастание коэффициента затухания с частотой, хотя пропорциональность $\beta \sim \sqrt{v}$ проведенными измерениями не подтверждается. Таким образом, модель Гельмгольца не является вполне адекватной для диссипативных свойств исследуемой колебательной системы.

Зависимость частоты v , рассчитанная по формуле (6), от объема воздушной полости V_0 представлена графически на рис. 2 сплошной линией. При этом использовались опытные данные: $M = 25$ кА/м, $dH_z/dz = 4.6 \times 10^6$ А/м², $S = 2 \times 10^{-4}$ м², объем МЖ – 3 см³ и известные численные значения ρ_T , с.

Пунктирной линией на рис. 2 показана кривая зависимости $v'(V_0)$, полученная по формуле (7).

Сравнение выводов модельной теории с результатами эксперимента дает основание предположить, что в верхней области частот исследованного диапазона упругость ВМЖР обусловлена упругостью газовой полости, а в нижней области – упругостью пондеромоторного типа.

Рассматривая введенную модель пондеромоторной упругости в качестве первого приближения, произведем на ее основе оценку резонансной

частоты v_p МЖУ. С этой целью воспользуемся выражением для критического давления ΔP_k “однозубцового” уплотнения [3]:

$$\Delta P_k = \mu_0 M_s (H_{\max} - H_{\min}),$$

где H_{\max} и H_{\min} – максимальная и минимальная напряженности магнитного поля на свободных поверхностях МЖ-перемычки. Принимая во внимание лишь пондеромоторную упругость, вычисляемую по формуле (5), получим

$$v_p = \frac{1}{2\pi b} \sqrt{\frac{2\Delta P_{kp}}{\rho}}$$

При $\Delta P_{kp} = 0.75 \times 10^5$ Па, $b = 2$ мм, $\rho = 1.5 \times 10^3$ кг/м³, $v_p \approx 800$ Гц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сорокин В.И. Исследование акустических водно-воздушных резонаторов // Акуст. журн. 1958. Т. 4. № 2. С. 187–195.
2. Архипов В.А., Жуков И.П., Миронов М.А. Водно-воздушный резонатор с резонансной частотой, независимой от статического давления // Акуст. журн. 1987. Т. 33. № 3. С. 395–398.
3. Орлов Д.В., Михалев Ю.О., Мышкин Н.К. и др. Магнитные жидкости в машиностроении. М.: Машиностроение, 1993. 268 с.
4. Mace B.R., Jones R.W., Harland N.R. Wave transmission through structural inserts // J. Acoust. Soc. Amer. 2001. V. 109. № 4. P. 1417–1421.
5. Полунин В.М., Пауков В.М., Карпова Г.В. и др. Упругие и электромагнитные колебания, возбуждаемые разрывной магнитожидкостной мембраной / Сб. научн. трудов 9-й Международной Плесской конференции по магнитным жидкостям. Т. 1. Иваново: ИГЭУ, 2000. С. 145–147.
6. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. 620 с.
7. Ржевкин С.Н. Курс лекций по теории звука. М.: Изд-во МГУ, 1960. 336 с.
8. Рэлей. Теория звука Т. 2. М.: Госиздат техн.-теор. лит., 1955. 475 с.
9. Фертман В.Е. Магнитные жидкости – естественная конвекция и теплообмен. М.: Наука и техника, 1978. 208 с.

Experimental Investigation of an Air–Magnetic-Liquid Resonator

G. V. Karpova*, O. V. Lobova*, V. M. Paukov*, V. M. Polunin*, and E. B. Postnikov**

*Kursk State Technical University, ul. 50 Let Oktyabrya 94, Kursk, 305040 Russia

**Kursk State Pedagogical University, ul. Radishcheva 33, Kursk, 305416 Russia

e-mail: postnicov@mail.ru

Abstract—Experimental results obtained by studying a vibratory system, in which a magnetic liquid playing the role of a mass shuts off the cross section of a tube under the effect of magnetic field and is spring-loaded by an air cavity and elasticity of ponderomotive type, are discussed. An expression for the resonant frequency of vibrations is derived with allowance for both types of elasticity. The expression agrees well with the experimental data.