АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXVI 1980 Вып. 4

УДК 534.833

К ВОПРОСУ ДЕМПФИРОВАНИЯ ВИБРАЦИЙ ТРУБ ВИБРОПОГЛОЩАЮЩИМИ ПОКРЫТИЯМИ

Р. З. Зейнетдинова, Н. И. Наумкина, Б. Д. Тартаковский

Исследована эффективность демпфирования вибраций труб различными типами вибропоглощающих покрытий. Показано, что эффективное демпфирование балочных колебаний труб возможно с помощью однослойных вибропоглощающих покрытий большой толщины либо относительно тонкими армированными вибропоглощающими покрытиями, армирующий слой которых состоит из кольцевых отрезков оптимальной длины.

Независимо от вида и конфигурации источников вибраций возбуждение труб обычно происходит в широком частотном диапазоне. Принято различать три характерные частотные области колебания труб: 1) низкочастотная область балочных колебаний трубы, в пределах которой труба изгибается как единое целое (балка); 2) высокочастотная область, когда колебания трубы во многом сходны с колебаниями пластин и практически не зависят от кривизны ее поверхности; 3) промежуточная область частот, в пределах которой колебания трубы существенно зависят от кривизны ее поверхности.

Эти области условно разделяются граничными частотами

$$f_{1\text{гр}}=c_{\text{изг}}/2\pi R_{\text{ср}} \text{ и } f_{2\text{гр}}=c_{\text{пр}}/2\pi R_{\text{ср}},$$

где $c_{\text{изг}}$ — фазовая скорость изгибной волны в пластине, толщина которой равна толщине стенок трубы $H_{\text{т}}$, $c_{\text{пр}}$ — скорость продольных волн в стенках трубы, $R_{\text{ср}}=(R_{\text{т}}+r_{\text{т}})/2$, $R_{\text{т}}$ и $r_{\text{т}}$ — наружный и внутренний радиусы трубы.

Наибольшую трудность представляет демпфирование вибраций трубы в частотной области ее балочных колебаний. При таком типе колебаний труба характеризуется большой жесткостью на изгиб, определяемой соотношением

$$B_{\text{т}}=E_1 I=(\pi/4)E_1(R_{\text{т}}^4-r_{\text{т}}^4), \tag{1}$$

где $B_{\text{т}}$ — жесткость трубы на изгиб, E_1 — модуль Юнга материала трубы, I — осевой момент инерции площади сечения. Для трубы момент инерции сечения относительно нейтральной плоскости изгиба определяется выражением [1]: $I=(\pi/4)(R_{\text{т}}^4-r_{\text{т}}^4)$.

В области высоких частот $f>f_{2\text{гр}}$ демпфирование вибраций трубы практически не отличается от демпфирования вибраций пластин, и оценка эффективности демпфирования производится по выражениям, полученным для пластин [2].

Ниже рассматривается эффективность демпфирования балочных колебаний трубы различными типами вибропоглощающих покрытий. Оценка эффективности производится по величине коэффициента потерь колебательной энергии в трубе, на наружную сторону которой нанесено покрытие (η_{Σ}).

Коэффициент потерь трубы с жестким вибропоглощающим покрытием определяется из комплексной величины ее изгибной жесткости $B_\Sigma^* = B_\Sigma' + jB_\Sigma''$ как отношение $\eta_\Sigma = B_\Sigma''/B_\Sigma'$. При условии, что труба с покрытием изгибается как единое целое, можно представить

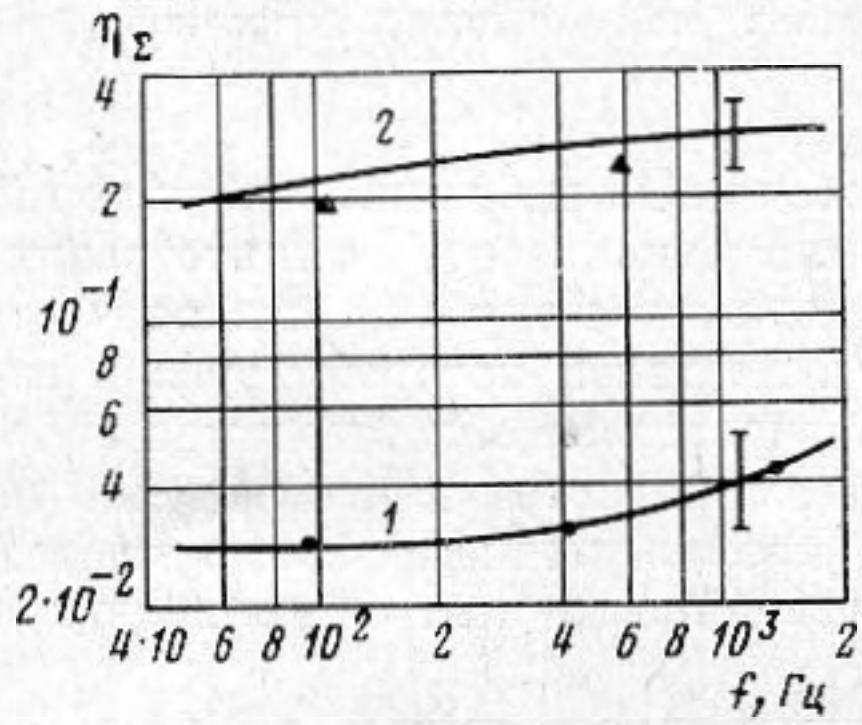
$$B_\Sigma^* = B_т + B_п^* = E_1 \frac{\pi}{4}(R_т^4 - r_т^4) + E_2(1 + j\eta_2)\frac{\pi}{4}(R_п^4 - R_т^4), \tag{2}$$

где $B_п^*$ — комплексная изгибная жесткость покрытия, $R_п = R_т + H_п$, $H_п$ — его толщина, E_2 и η_2 — модуль Юнга и коэффициент потерь материала покрытия. Из формулы (2) получаем выражение для η_Σ:

$$\eta_\Sigma = \eta_2 \alpha_2 \frac{R_п^4 - R_т^4}{(R_т^4 - r_т^4) + \alpha_2(R_п^4 - R_т^4)}, \tag{3}$$

где $\alpha_2 = E_2/E_1$.

Анализ выражения (3) показывает, что эффективное демпфирование балочных колебаний трубы ($\eta_\Sigma \geqslant 0{,}3\eta_2$) жестким вибропоглощающим покрытием ($\alpha_2 \sim 10^{-2}$) возможно лишь при толщине покрытия, равной или большей наружного радиуса трубы. На фиг. 1 в качестве примера представлены рассчитанные по формуле (3) с учетом частотной зависимости вязкоупругих параметров материала покрытия характеристики потерь колебательной энергии в стальной трубе с покрытием из материала ВМЛ-25 [3] при толщине покрытия $H_п = 2H_т$ или $H_п = R_т$. Граничная частота балочных колебаний трубы $f_{1гр} = 1100$ Гц. Результаты расчета сопоставлены с данными эксперимента; достигнуто удовлетворительное согласие.

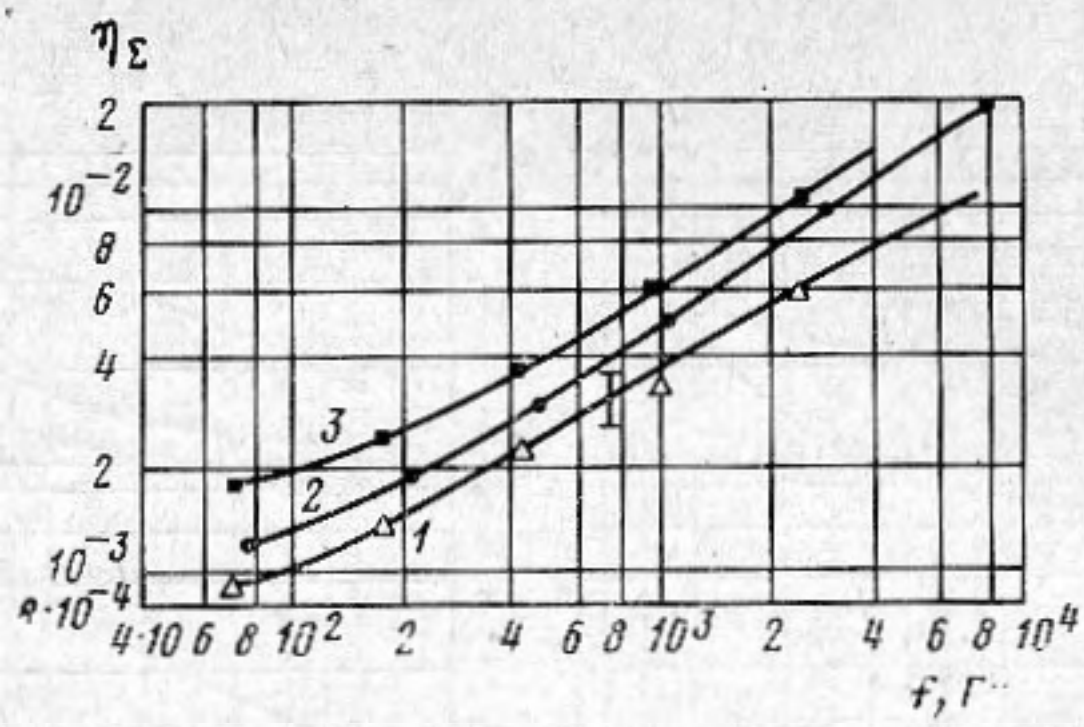


Фиг. 1. Частотная зависимость коэффициента потерь колебательной энергии в стальной трубе, на наружную сторону которой нанесено однослойное вибропоглощающее покрытие из материала ВМЛ-25. *1* — толщина покрытия равна удвоенной толщине стенки трубы, *2* — толщина покрытия равна наружному радиусу трубы; — — расчет, ▲, ● — экспериментальные данные

В связи с недостаточным развитием теории колебаний трубы с армированным вибропоглощающим покрытием эффективность демпфирования балочных колебаний была исследована экспериментально. Измерения проводились со стальными трубами диаметром 35 мм и с толщиной стенок 1 мм. Граничная частота балочных колебаний таких труб $f_{1гр} = 760$ Гц.

Вибропоглощающий слой в армированных покрытиях выполнялся из материала, характеризуемого следующими вязкоупругими параметрами: $E_2 = 2{,}5 \cdot 10^8$ Н/м^2, $\eta_2 = 0{,}56$. Максимальная эффективность однослойного покрытия из этого материала наблюдается при температуре +10° С. Армированное вибропоглощающее покрытие на основе этого материала будет иметь максимальную эффективность при более высокой температуре [4]. Для используемых в наших экспериментах толщин вибропоглощающего слоя $H_2 = 1{,}0$ мм и армирующего слоя из дюраля толщиной $H_3 = 0{,}5$ мм максимальная эффективность наблюдалась при температурах 20÷30° С.

На фиг. 2 сопоставлены коэффициенты потерь трубы с однослойным (кривая *1*) и армированным (кривая *2*) покрытиями на основе одного и того же вибропоглощающего материала. Толщина вибропоглощающего слоя в обоих покрытиях равнялась толщине стенки трубы (1 мм). Армирование слоя вязкоупругого материала, нанесенного на наружную поверхность трубы, незначительно увеличило коэффициент потерь в частотной области балочных колебаний ($f < f_{1гр} = 760$ Гц). К тому же следует отме-



Фиг. 2. Сопоставление эффективности однослойного и армированного вибропоглощающих покрытий, нанесенных на наружную поверхность трубы. *1* – однослойное покрытие, толщина которого равна толщине стенок трубы; *2* – армированное покрытие; *3* – однослойное покрытие, равновесное армированному покрытию

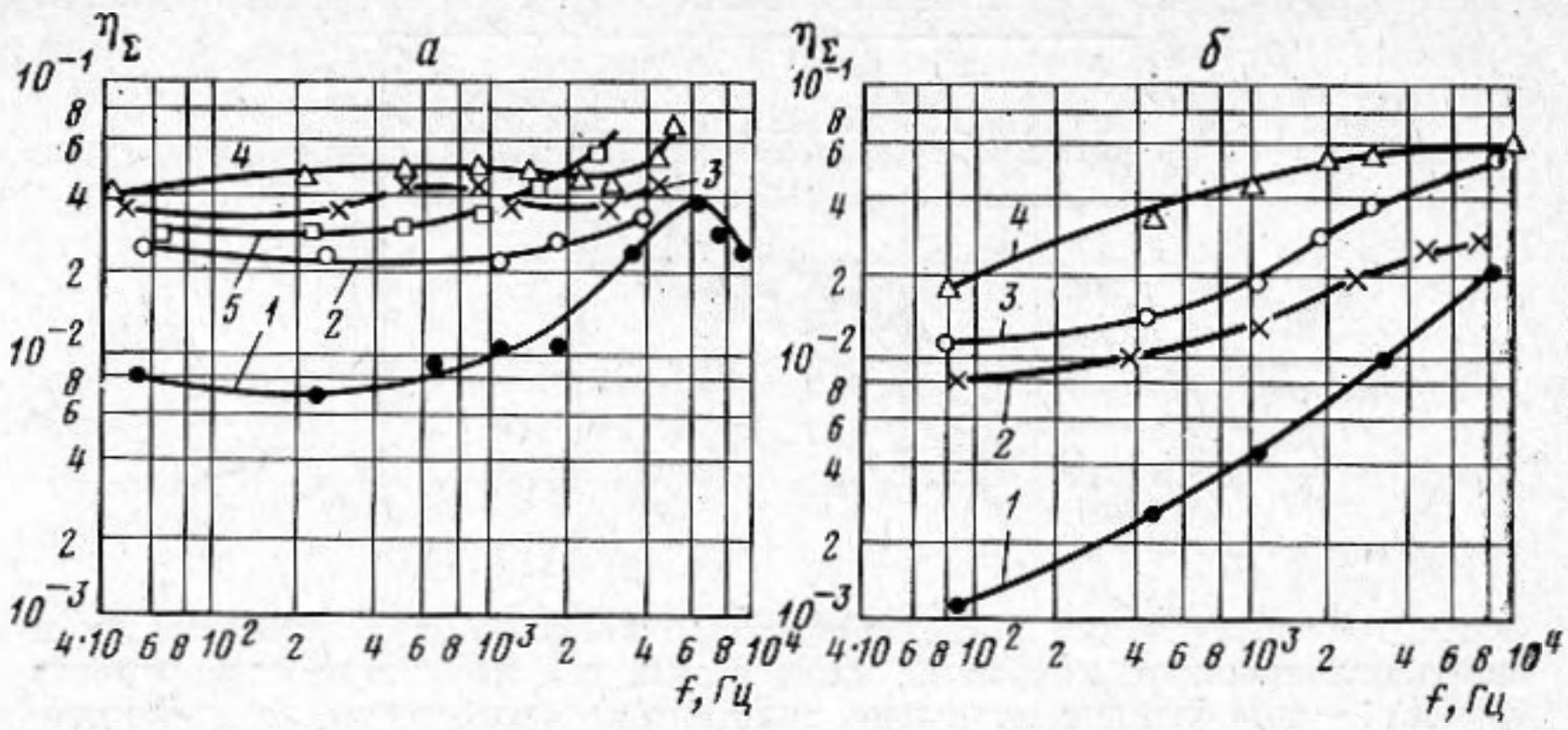
тить, что вес армированного покрытия составляет 37% веса трубы, в то время как вес однослойного покрытия всего 18%. Равновесное же армированному однослойное покрытие обеспечивает несколько более высокое значение коэффициента потерь (кривая *3* фиг. 2), чем армированное покрытие, несмотря на то что температура 20° С, при которой проводились измерения, не является оптимальной для данного вибропоглощающего материала. Вместе с тем достигнутая величина коэффициента потерь в трубе с таким покрытием мала, и для повышения его, как указывалось ранее, требуется значительное увеличение толщины однослойного покрытия ($H_п \geqslant R_т$), что не всегда возможно на практике. Армированные же вибропоглощающие покрытия при нанесении на пластины позволяют достичь весьма высоких потерь колебательной энергии при относительно малых толщинах.

Для повышения эффективности армированного покрытия, нанесенного на трубу, нами был использован способ, сходный с описанным в работе [5]: в армирующем слое делались сквозные разрезы как в поперечном, так и в продольном направлениях.

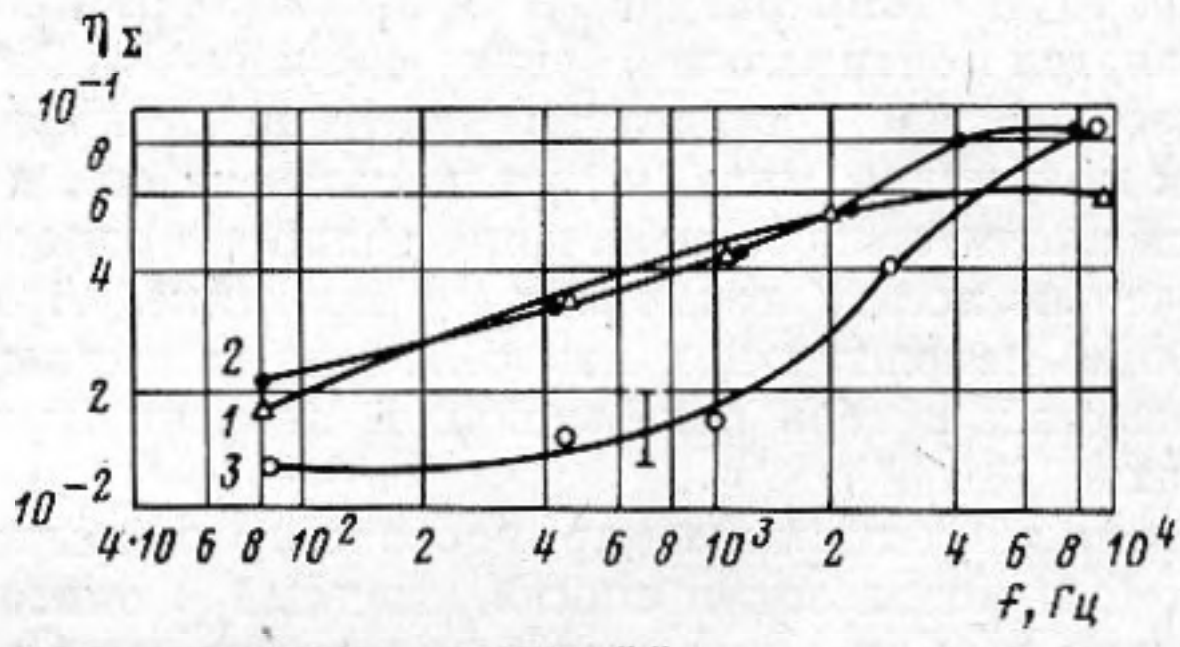
Проведенные экспериментальные исследования показали, что наличие поперечных кольцевых разрезов существенно увеличивает коэффициент потерь системы труба + покрытие. Степень увеличения определенным образом зависит от расстояния между двумя соседними прорезями, т. е. от длины кольцевых отрезков, на которые расчленяется армирующий слой покрытия.

Физический механизм увеличения потерь колебательной энергии в армированном покрытии, нанесенном на трубу, при разрезе армирующего слоя на отдельные отрезки тот же самый, что и в случае нанесения армированного покрытия на плоские полосы: при балочных колебаниях трубы концы разрезов периодически расходятся и сходятся, увеличивая сдвиговую деформацию вязкоупругого слоя в месте расположения разреза.

При исследовании нанесенных на трубу армированных покрытий, армирующий слой которых имеет поперечные разрезы, нами было найдено, что, как и в случае применения армированного вибропоглощающего покрытия на пластинах и полосах, существует оптимальная длина отрезков армирующего слоя, при которой покрытие обладает наиболее высокими вибропоглощающими свойствами. Исследование целого ряда армированных покрытий на основе различных вибропоглощающих материалов на трубах различных размеров и из разных материалов позволило установить, что оптимальная длина отрезков, на которые следует расчленить армирующий слой покрытия, связана с размерами слоев покрытия и вязкоупругими параметрами используемых материалов тем же соотношением, что



Фиг. 3. Влияние поперечных разрезов армирующего слоя на эффективность покрытия, нанесенного на трубу. *а* – на латунную трубу диаметром 20 мм нанесен слой вибропоглощающего материала на основе поливинилхлорида, армированный слоем жести, толщиной 0,8 мм. Кривая *1* соответствует расстоянию между соседними поперечными разрезами L=570 мм, *2* – 280 мм, *3* – 140 мм, *4* – 35 мм, *5* – 17 мм. *б* – на стальную трубу диаметром 35 мм нанесен слой вибропоглощающего материала на основе виниловых сополимеров, армированный слоем дюраля, толщиной 0,5 мм. Кривая *1* соответствует L=1500 мм, *2* – 150 мм, *3* – 20 мм, *4* – 60 мм



Фиг. 4. Частотные зависимости коэффициента потерь стальной трубы с вибропоглощающим покрытием, армирующий слой которого выполнен из дюраля толщиной 0,5 мм в форме: *1* – кольцевых отрезков длиной 70 мм, *2* – ленты шириной 50 мм, намотанной на трубу с углом наклона 34° (L=60 мм), *3* – ленты шириной 70 мм, намотанной на трубу с углом наклона 34° (L=85 мм)

и для покрытия, нанесенного на плоские полосы [5]:

$$L_{опт}=(3\div4)\,(E_3H_3H_2/G_2)^{1/2}. \tag{4}$$

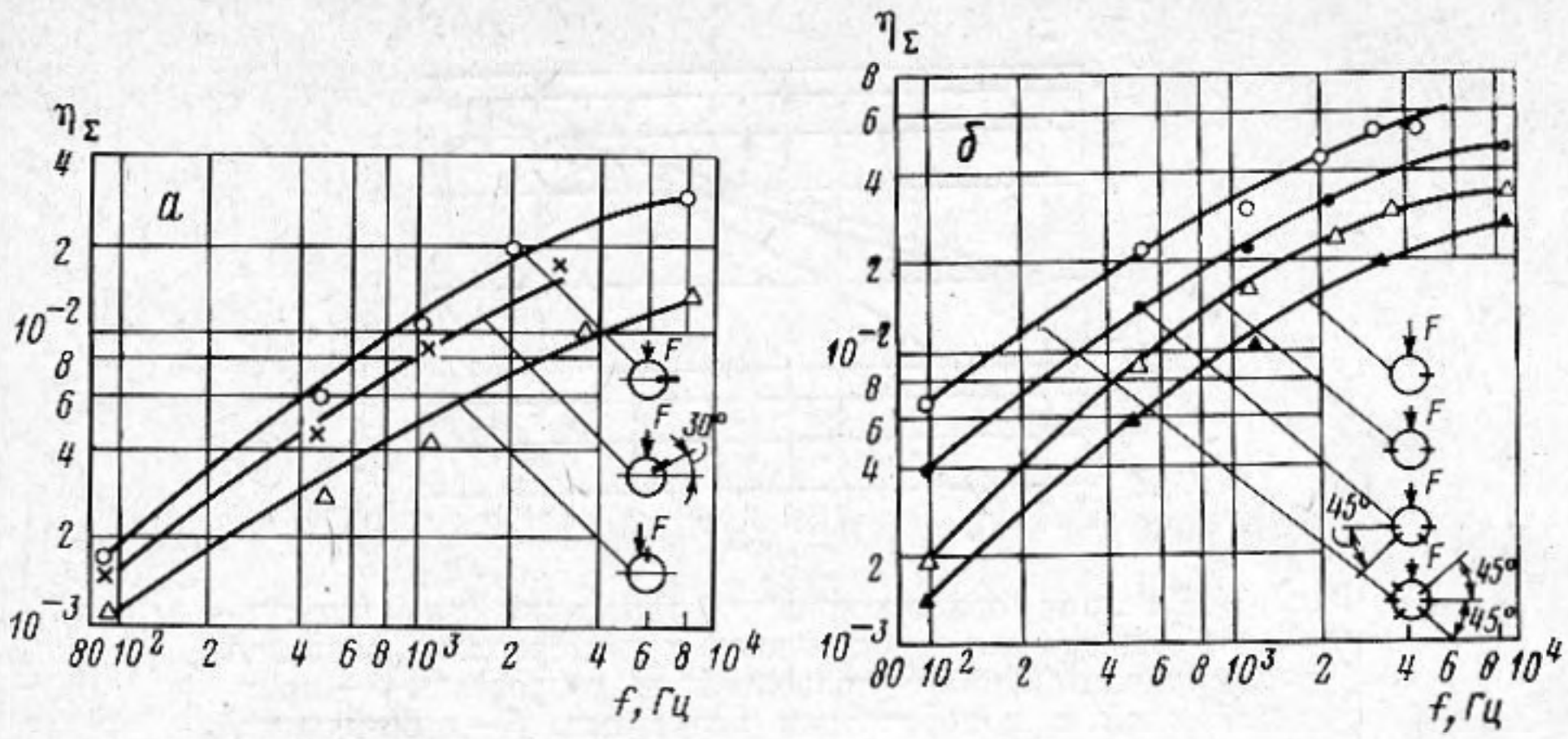
Здесь E_3 и H_3 — модуль Юнга и толщина армирующего слоя, G_2 и H_2 — модуль сдвига и толщина вибропоглощающего слоя.

На фиг. 3 в качестве примера приведены два семейства кривых, характеризующих зависимость коэффициента потерь трубы с армированным покрытием от длины отрезков, на которые расчленен армирующий слой. Расчленение слоя на кольцевые отрезки оптимальной длины повышает эффективность покрытия в 5÷10 раз по сравнению с покрытием, армирующий слой которого не разрезан.

Было установлено, что армирующий слой покрытия целесообразно изготавливать из ленты, наматываемой на трубу по винтовой линии таким образом, чтобы ширина ленты по образующей трубы равнялась $\sim L_{опт}$. Угол наклона винтовой линии к образующей трубы определяется соотношением

$$\cos\alpha=b/L_{опт},$$

где b — ширина ленты. Это позволит упростить технологию нанесения покрытия на трубу.



Фиг. 5. Влияние числа продольных разрезов армирующего слоя и их положения относительно плоскости колебания трубы на эффективность покрытия

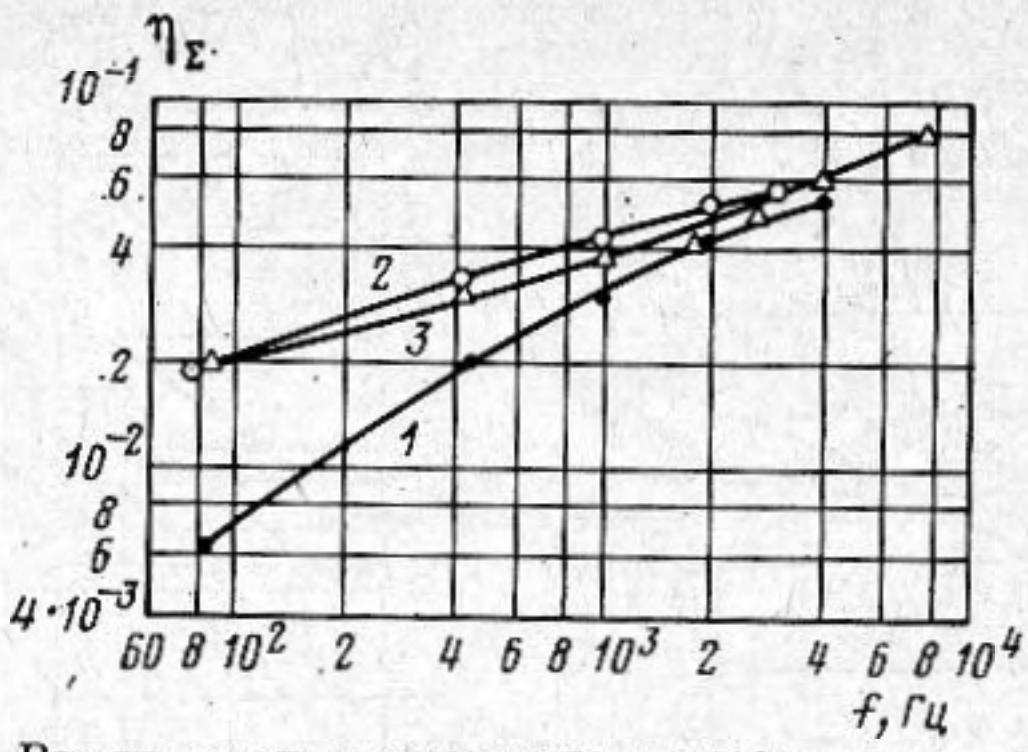
На фиг. 4 сопоставлены частотные зависимости коэффициента потерь стальной трубы с армированным покрытием, армирующий слой которого выполнен из кольцевых отрезков длиной $L_{опт}=70$ мм (кривая *1*); из ленты шириной 50 мм, намотанной на трубу по винтовой линии с углом наклона $\alpha=34°$ так, что ширина ленты по образующей равна 60 мм (кривая *2*); из ленты шириной 70 мм, намотанной на трубу по винтовой линии с углом наклона $\alpha=34°$ так, что ширина ленты по образующей равна 85 мм (кривая *3*). Покрытия, армирующий слой которых состоит из кольцевых отрезков длиной 70 мм и из намотанной по винтовой линии ленты шириной 50 мм, имеют практически одинаковые вибропоглощающие свойства.

Как показали экспериментальные исследования, продольные разрезы в армирующем слое покрытия, нанесенного на трубу, также оказывают влияние на его вибропоглощающие свойства, причем степень влияния зависит от расположения продольного разреза относительно плоскости колебания трубы.

На фиг. 5 показано влияние положения и числа продольных разрезов в армирующем слое на вибропоглощающие свойства покрытия. Положение разрезов показано черточками на поперечном разрезе трубы. Сила F, вызывающая вибрации трубы, всегда направлена по вертикали.

Наибольшее влияние оказывает разрез, расположенный в нейтральной плоскости изгиба трубы, наименьшее — разрез, расположенный в плоскости колебания трубы (фиг. 5, *а*). Это можно объяснить, по-видимому, тем, что расхождение краев разреза, расположенного на нейтральной плоскости изгиба, при балочных колебаниях трубы будет наибольшим, так как по обе стороны от нейтральной плоскости изгиба вязкоупругий слой испытывает деформацию разного знака (растяжение и сжатие). В то же время края разреза, расположенного в плоскости колебания, расходятся очень мало, так как вязкоупругий слой по обе стороны разреза имеет одну и ту же деформацию. Увеличение числа продольных разрезов приводит к дальнейшему повышению вибропоглощающих свойств покрытия (фиг. 5, *б*).

Интересно отметить, что при армирующем слое, составленном из продольных полос, частотная зависимость коэффициента потерь трубы с армированным покрытием в области балочных колебаний трубы не имеет экстремального характера (свойственного армированному покрытию, нанесенному на плоскую полосу). Это можно объяснить тем, что толщина вязкоупругого слоя покрытия много меньше радиуса трубы (а следовательно, радиуса инерции сечения трубы относительно ее оси) и армирующий слой покрытия испытывает деформацию изгиба, мало отличающуюся от деформации стенок трубы. Следовательно, армирующий слой не может



Фиг. 6. Влияние одновременного нанесения на армирующий слой покрытия продольных и поперечных разрезов. *1* – армирующий слой с продольными разрезами, *2* – армирующий слой с поперечными разрезами, *3* – армирующий слой одновременно с продольными и поперечными разрезами

создать значительную сдвиговую деформацию вязкоупругого слоя вдоль трубы. В результате потери колебательной энергии в покрытии целиком определяются сдвиговой деформацией вязкоупругого слоя по окружности трубы, вызванной расхождением краев продольных разрезов армирующего слоя.

Совокупность результатов экспериментального исследования приводит к выводу, что выполнение армирующего слоя из кольцевых отрезков оптимальной длины сильнее повышает вибропоглощающие свойства покрытия, чем расчленение армирующего слоя на продольные полосы. Дополнительное нанесение продольных разрезов в армирующем слое, состоящем из кольцевых отрезков, не повышает эффективности покрытия (фиг. 6).

Эффективность описанного выше армированного вибропоглощающего покрытия недостаточно высока: коэффициент потерь трубы с покрытием в частотной области балочных колебаний ниже значения $\eta_\Sigma=0{,}05$, принятого на практике за нижний предел эффективности вибропоглощения.

В связи с этим исследовалось другое армированное покрытие с относительно более толстым вибропоглощающим слоем ($H_п=2H_т$), изготовленным из материала с более высокими вязкоупругими параметрами ($E_2=1\cdot10^9$ Н/м^2, $\eta_2=0{,}7$). Армирующий слой покрытия выполнен из стали толщиной 0,8 мм в форме кольцевых отрезков оптимальной длины $L_{опт}=80$ мм. Такое армированное покрытие, нанесенное на трубу, обеспечивает коэффициент потерь не менее 0,08 во всем исследованном диапазоне частот.

Таким образом, для эффективного демпфирования балочных колебаний труб необходимо применять либо однослойное жесткое вибропоглощающее покрытие большой толщины ($H_п\geqslant R_т$), либо армированное вибропоглощающее покрытие, толщина вязкоупругого слоя которого не превышает двойной толщины стенок трубы, а армирующий слой выполнен из кольцевых отрезков оптимальной длины.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Феодосьев В. И.* Сопротивление материалов. М., «Наука», 1974.
2. *Никифоров А. С.* Вибропоглощение на судах. Л., «Судостроение», 1979.
3. *Трепелкова Л. И., Наумкина Н. И.* и др. Новые полимерные вибропоглощающие материалы. В сб. Вибропоглощающие материалы и покрытия и их применение в промышленности. ЛДНТП, 1976, 31–34.
4. *Авилова Г. М., Тартаковский Б. Д.* Температурные характеристики коэффициентов потерь трехслойных вибропоглощающих конструкций. Акуст. ж., 1978, *24*, 5, 776–778.
5. *Зейнетдинова Р. З., Наумкина Н. И. Тартаковский Б. Д.* Об эффективности вибропоглощающего покрытия с разрезным армирующим слоем. Акуст. ж., 1978, *24*, 4, 615–616.

Акустический институт
им. Н. Н. Андреева
Академии наук СССР

Поступила
28 ноября 1979 г.