

6. Improvement of technological-mathematical model for the medium-term prediction of the work of a gas condensate field / M. Kutia, M. Fyk, O. Kravchenko, S. Palis, I. Fyk // East.-Eur. J. of Enterprise Technologies. 2016. № 5/8 (83). P. 40–48.

7. Viscosity of pure carbon dioxide at supercritical region: Measurement and correlation approach / E. Heidar-yan, T. Hatami, M. Rahimi, J. Moghadasi // The J. of Super-critical Fluids. 2011. Vol. 56, № 2. P. 144–151.

M. M. Kutia
Otto von Guericke University of Magdeburg

N. V. Mukhin, T. V. Gordinskaya
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

USING A FLUID IN A SUPERCRITICAL STATE FOR THE CYCLING PROCESS

The calculation of the operation of a model gas condensate field with a differentiated operating cycle was carried out, taking into account the mode of maintaining reservoir pressure. A development option with injection of carbon dioxide into the reservoir is proposed. A comparison of the injection of carbon dioxide into the reservoir at normal temperature with its heating to 350 degrees K is carried out. As a result of the calculations, the dependences of reservoir and working pressure and flow rate on the time of field operation in a differentiated operating cycle are obtained. It was found that when carbon dioxide is injected into the reservoir, there is a significant difference when it is injected in the «cold» and «hot» states. The data obtained indicate that, during the injection of carbon dioxide heated to 350 degrees K, it is necessary to keep a lower pressure at the wellhead, which can lead to a significant economic effect over the entire period of field operation in the mode of maintaining reservoir pressure.

Supercritical state of matter, gas condensate field, carbon dioxide

УДК 534.232

Б. Г. Степанов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Об армировании широкополосных стержневых преобразователей с амплитудно-фазовым возбуждением секций

Рассматривается способ армирования широкополосных стержневых преобразователей (в том числе с амплитудно-фазовым возбуждением), который позволяет устранить негативное влияние армирующей стяжки на их частотные характеристики. Стержневой преобразователь армируется единой стяжкой, отдельные участки которой прикрепляются к пьезостержню с помощью связующих вставок (кольцевых перемычек). Приводятся результаты расчетов амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик для модели преобразователя, пьезостержень которого состоит из двух частей, возбуждаемых разными по амплитуде и фазе электрическими напряжениями, с использованием дополнительных связующих вставок и без них. Дается сравнительная оценка гибкости кольцевой перемычки, а также ее габаритов для разных материалов, из которых она выполнена, и размеров пьезостержня преобразователя. Приводятся результаты экспериментальных исследований, подтверждающие основные положения выполненных расчетов и оценок.

Широкополосный преобразователь, армирование стержневых преобразователей, амплитудно-фазовое возбуждение

Требование к увеличению мощности излучения стержневых пьезоэлектрических преобразователей вызывает необходимость их армирова-

ния. Наличие единой, закрепленной в области торцов пьезостержня, армирующей стяжки соответствует механически параллельному соедине-

нию этих элементов и отображается в эквивалентной схеме преобразователя дополнительным контуром. В итоге это приводит к появлению на амплитудно-частотной и фазочастотной характеристиках (АЧХ и ФЧХ) преобразователя резких перепадов в области полуволнового резонанса армирующей стяжки [1], [2]. Проявляется это как при синфазном, так и при амплитудно-фазовом возбуждении частей (секций) пьезостержня преобразователя. Причем наиболее сильное подчеркивание резонансных свойств армирующей стяжки наблюдается при амплитудно-фазовом возбуждении частей (секций) пьезостержня, что способствует большей независимости ее колебаний и служит ограничивающим фактором по формируемой полосе для широкополосных преобразователей.

Влияние резонанса армирующей стяжки на АЧХ и ФЧХ в рабочем диапазоне стержневых армированных преобразователей может быть устранено изменением ее резонансной частоты. Достичь этого позволяет армирование пьезостержня пропитанной эпоксидным компаундом стеклонитью с внешней намоткой вдоль его оси или под углом к ней [3]; выполнение армирующей стяжки в виде сплетенного троса, что приводит к увеличению ее собственной гибкости [4]; выполнение пьезостержня преобразователя из индивидуально армированных пьезоблоков – модулей. Все эти решения, как правило, используются для сравнительно низкочастотных преобразователей (15 кГц и ниже). Кроме того, способ армирования пьезостержня стеклонитью достаточно сложен технологически и требует специальных фронтальной и тыльной накладок с пазами для крепления стеклонити. В пьезостержне, собранном из индивидуально армированных пьезоблоков, увеличена доля пассивного материала (накладки для индиви-

дуального армирования) в его общей структуре, а также возможно неравномерное распределение вдоль пьезостержня статических усилий сжатия.

Рассмотрим еще одну возможность устранения резонанса сквозной армирующей стяжки из рабочего диапазона стержневого преобразователя с амплитудно-фазовым возбуждением (ПАФВ) частей (секций) его пьезостержня. В [5] предлагалось, используя единую армирующую стяжку, дополнительно прикрепить ее отдельные небольшие участки к пьезостержню, используя дополнительные вставки (прокладки) с изгибной гибкостью, минимум в три раза меньшей, чем продольная гибкость наименьшего по длине участка армирующей стяжки, примыкающего к вставке. Место соединения армирующей стяжки и вставки предлагается закреплять с помощью эпоксидного компаунда (например, ДМ5-65 или К-153), который полимеризуется после завершения процесса армирования ПАФВ. Таким образом обеспечивается единое усилие сжатия во всем пьезостержне. Схема построения ПАФВ с такой «связанной» армирующей стяжкой и варианты выполнения узлов соединения с ней показаны на рис. 1. Здесь: 1 – секции (части) пьезостержня ПАФВ; 2 – армирующая стяжка; 3 – вставка; 4 – полусферическая шайба; 5 – гайка; 6 и 7 – фронтальная и тыльная накладки; 8 – электроды; 9 – эпоксидный компаунд; 10 – клеудерживающие проточки; 11 – технологические отверстия. На рис. 1, а вставка выполнена в виде металлического диска с центральным отверстием, на рис. 1, б – диэлектрической кольцевой перемычки, а на рис. 1, в – пьезокерамических шайб с уменьшенным внутренним диаметром.

Предполагается, что такой тип дополнительной жесткой связи секций пьезостержня с арми-

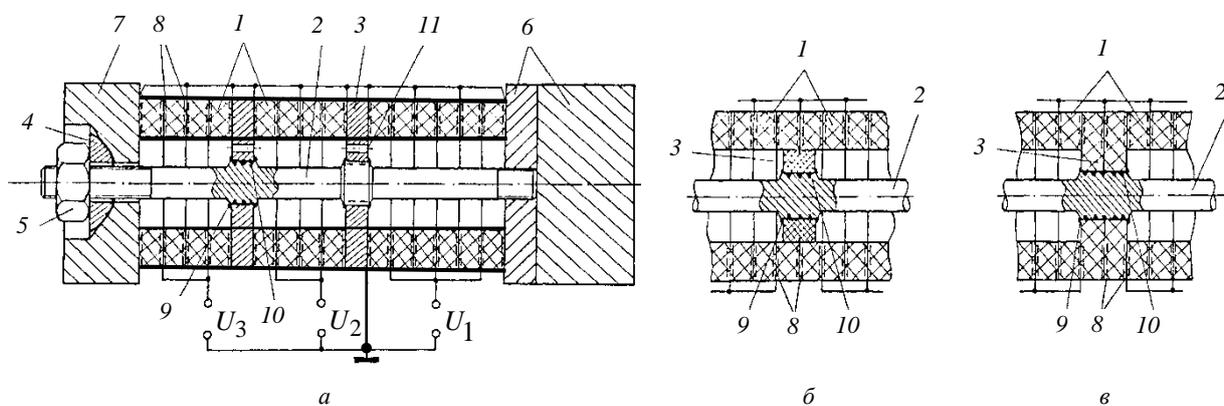


Рис. 1

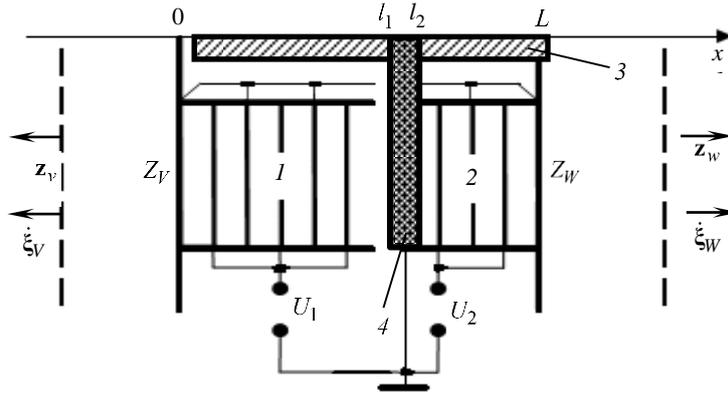


Рис. 2

рующей стяжкой обеспечит одинаковые упругие смещения в областях их закрепления с помощью вставок. При этом каждая секция (часть) пьезостержня будет армирована небольшим участком стяжки, имеющим резонансную частоту существенно выше рабочего диапазона ПАФВ. На базе этой концепции рассмотрим модель ПАФВ, состоящего из двух армированных стяжкой частей (секций) пьезостержня, который своими внешними торцами нагружен на входные импедансы накладок Z_V и Z_W , контактирующих с полубесконечными средами с удельными импедансами z_v и z_w . Расчетная модель двухсекционного ПАФВ и «связанной» армирующей стяжкой показана на рис. 2. Здесь: 1 и 2 – секции (части) пьезостержня; 3 – части армирующей стяжки; 4 – вставка или разделяющая прокладка. Секции пьезостержня возбуждаются электрическими напряжениями $U_i = U_{im} e^{j\Phi_i}$, где индекс $i = 1, 2$ характеризует первую и вторую секции пьезостержня соответственно.

Для простоты решения подобно тому, как это делалось в [1], предварительно будем полагать, что в секциях пьезостержня используется поперечный пьезоэффект и что напряженность электрического поля в них будет $E_3^{(i)}$. Тогда уравнения пьезоэффекта для каждой секции пьезостержня запишем в виде

$$\begin{cases} \frac{d\xi_1^{(i)}}{dx} = S_{11}^E \sigma_{11}^{(i)} + d_{31} E_3^{(i)}; \\ D_3^{(i)} = d_{31} \sigma_{11}^{(i)} + \epsilon_{33} E_3^{(i)}. \end{cases} \quad (1)$$

Решения однородных волновых уравнений для упругих смещений в секциях пьезостержня $\xi_1^{(i)}$, в частях армирующей стяжки ξ_{0i} и вставке ξ_{II} примем, соответственно, в виде

$$\begin{aligned} \xi_1^{(i)} &= A_i \cos(kx) + B_i \sin(kx); \\ \xi_{0i} &= A_{0i} \cos(k_0 x) + B_{0i} \sin(k_0 x); \\ \xi_{II} &= A_{II} \cos(k_{II} x) + B_{II} \sin(k_{II} x), \end{aligned} \quad (2)$$

где $A_i, B_i, A_{0i}, B_{0i}, A_{II}$ и B_{II} – неопределенные коэффициенты; $k = \omega/c$; $k_0 = \omega/c_0$; $k_{II} = \omega/c_{II}$; ω – круговая частота; c, c_0 и c_{II} – скорости звука в пьезостержне, армирующей стяжке и связующей вставке соответственно.

Граничные условия для рассматриваемой модели ПАФВ запишем в виде

$$\begin{cases} \xi_1^{(1)} = \xi_{01}|_{x=0}; \quad \sigma_1^{(1)} S + \sigma_{01} S_0 = \dot{\xi}_1^{(1)} Z_V|_{x=0}; \\ \xi_1^{(i)} = \xi_{0i}|_{x=p_i L}; \quad \xi_1^{(i)} = \xi_{II}|_{x=p_i L}; \\ \sigma_1^{(i)} S + \sigma_{0i} S_0 = \sigma_{II} S_{II}|_{x=p_i L}; \\ \xi_1^{(2)} = \xi_{02}|_{x=L}; \\ \sigma_1^{(2)} S + \sigma_{02} S_0 = -\dot{\xi}_1^{(2)} Z_W|_{x=L}, \end{cases} \quad (3)$$

где $\sigma_{0i} = E_{0i} d\xi_{0i}/dx$ и $\sigma_{II} = E_{II} d\xi_{II}/dx$ – упругие напряжения в соответствующих участках армирующей стяжки и вставке, E_{0i} и E_{II} – модули Юнга; S_{II} – площадь поперечного сечения вставки; $i = 1, 2$; $p_1 = l_1/L$; $p_2 = l_2/L$. Граничные условия по равенству упругих смещений записаны в соответствии с предположением достаточной жесткости вставки, в том числе и для случая $p_1 = p_2$.

Подставляя (1) и (2) в граничные условия (3) и выполняя необходимые преобразования с учетом возможности перехода от поперечного пьезоэффекта к продольному [1], [6] запишем окончательные выражения для колебательных скоростей внешних торцов пьезостержня ПАФВ с параллельным соединением в его секциях пьезокерамических шайб:

$$\begin{aligned} \xi_1^{(1)}(0) = & \frac{d_{33}}{zS_{33}d\Delta_c} \left\{ U_1 \left(F_1^{(1)} C_1^{(2)} + F_2^{(1)} C_2^{(2)} \right) - \right. \\ & \left. - \frac{z_{\Pi}}{z} \gamma_{\Pi} U_2 C_3^{(1)} C_3^{(2)} + \frac{z_{\Pi}}{z} \gamma_{\Pi} \times \right. \\ & \left. \times \left[U_2 - U_1 \cos \alpha_{\Pi} (p_2 - p_1) \psi \right] C_2^{(2)} C_3^{(1)} \right\}; \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \xi_1^{(2)}(L) = & - \frac{d_{33}}{zS_{33}d\Delta_c} \times \\ & \times \left\{ U_2 \left(F_1^{(2)} C_1^{(1)} + F_2^{(2)} C_2^{(1)} \right) - \frac{z_{\Pi}}{z} \gamma_{\Pi} U_1 C_3^{(1)} C_3^{(2)} + \right. \\ & \left. + \frac{z_{\Pi}}{z} \gamma_{\Pi} \left[U_1 - U_2 \left(\cos \alpha_{\Pi} (p_2 - p_1) \psi \right) \right] C_2^{(1)} C_3^{(2)} \right\}; \quad (5) \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} \Delta_c = & \left[C_1^{(1)} C_1^{(2)} - \frac{z_{\Pi}^2}{z^2} \gamma_{\Pi}^2 C_2^{(1)} C_2^{(2)} \right] \sin \left[\alpha_{\Pi} (p_2 - p_1) \psi \right] - \\ & - \left[C_1^{(2)} C_2^{(1)} + C_1^{(1)} C_2^{(2)} \right] \frac{z_{\Pi}}{z} \gamma_{\Pi} \cos \left[\alpha_{\Pi} (p_2 - p_1) \psi \right]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_1^{(i)} = & \left\{ \left[1 - \cos (q_i \psi) \right] \sin (\alpha_0 q_i \psi) + \right. \\ & \left. + \frac{z_0}{z} \gamma_0 \left[1 - \cos (\alpha_0 q_i \psi) \right] \sin (q_i \psi) \right\} \sin \left[\alpha_{\Pi} (p_2 - p_1) \psi \right] - \\ & - \frac{z_{\Pi}}{z} \gamma_{\Pi} \sin (q_i \psi) \sin (\alpha_0 q_i \psi) \cos \left[\alpha_{\Pi} (p_2 - p_1) \psi \right]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_2^{(i)} = & \frac{z_{\Pi}}{z} \gamma_{\Pi} \times \\ & \times \left\{ \left[\sin (\alpha_0 q_i \psi) \cos (q_i \psi) + \frac{z_0}{z} \gamma_0 \sin (q_i \psi) \cos (\alpha_0 q_i \psi) \right] \times \right. \\ & \times \cos \left[\alpha_{\Pi} (p_2 - p_1) \psi \right] - \frac{z_{\Pi}}{z} \gamma_{\Pi} \sin (q_i \psi) \times \\ & \left. \times \sin (\alpha_0 q_i \psi) \sin \left[\alpha_{\Pi} (p_2 - p_1) \psi \right] \right\}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_1^{(i)} = & \left(1 + \frac{z_0^2}{z^2} \gamma_0^2 \right) \sin (q_i \psi) \sin (\alpha_0 q_i \psi) + \\ & + 2 \frac{z_0}{z} \gamma_0 \left[1 - \cos (q_i \psi) \cos (\alpha_0 q_i \psi) \right] + j \frac{Z_{\text{ВХ}}^{(i)}}{zS} \times \\ & \times \left[\sin (\alpha_0 q_i \psi) \cos (q_i \psi) + \frac{z_0}{z} \gamma_0 \sin (q_i \psi) \cos (\alpha_0 q_i \psi) \right]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_2^{(i)} = & \cos (q_i \psi) \sin (\alpha_0 q_i \psi) + \frac{z_0}{z} \gamma_0 \sin (q_i \psi) \times \\ & \times \cos (\alpha_0 q_i \psi) - j \frac{Z_{\text{ВХ}}^{(i)}}{zS} \sin (q_i \psi) \sin (\alpha_0 q_i \psi); \end{aligned}$$

$$C_3^{(i)} = \sin (\alpha_0 q_i \psi) + \frac{z_0}{z} \gamma_0 \sin (q_i \psi);$$

$$U_i = E_3^{(i)} d = U_{im} e^{j\varphi_i};$$

U_{im} , φ_i – амплитуда и фаза электрического напряжения; d – межэлектродное расстояние; $q_1 = p_1$; $q_2 = 1 - p_2$; $\psi = kL$; $\alpha_0 = c/c_0$; $Z_{\text{ВХ}}^{(1)} = Z_V$; $Z_{\text{ВХ}}^{(2)} = Z_W$; $\alpha_{\Pi} = c/c_{\Pi}$; $\gamma_0 = S_0/S$; $\gamma_{\Pi} = S_{\Pi}/S$; $i = 1, 2$; z_0, S_0 и z_{Π}, S_{Π} – удельный импеданс, площадь поперечного сечения соответственно в материалах армирующей стяжки и вставки.

Для рассматриваемой расчетной модели ПАФВ при $p_1 = p_2 = p$ можно считать, что он армирован единой стяжкой, но разделенной на два участка, благодаря введению дополнительных граничных условий, вытекающих из (3):

$\xi_1^{(1)} = \xi_1^{(2)} = \xi_{01} = \xi_{02}|_{x=pL}$. Иными словами, в указанном сечении осуществлена дополнительная жесткая связь пьезостержня (смежных торцов его частей) с единой армирующей стяжкой, колебания отдельных участков которой оказываются под управлением частей пьезостержня, расположенных напротив них. В результате такого построения ПАФВ на его АЧХ и ФЧХ возможно проявление резонансов лишь отдельных участков единой армирующей стяжки, положение которых на оси частот существенно выше рабочего диапазона ПАФВ. Практическое решение этой задачи было представлено ранее (см. рис. 1).

Результаты расчетов для колебательных скоростей внешних торцов ПАФВ $\xi_V(\psi) = \xi_1^{(1)}(0)K_V$ и $\xi_W(\psi) = \xi_1^{(2)}(L)K_W$, выполненные с использованием (4) и (5), а также для моделей преобразователей [1] и [2] без связующих вставок подтверждают высказанные положения. Здесь K_V и K_W – коэффициенты передачи по колебательной скорости [7] для соответствующих направлений излучения. В качестве примера на рис. 3 приведены нормированные АЧХ $\xi_{VN}(\psi)$ и ФЧХ $\varphi_V(\psi)$ излучения для колебательной скорости армированных ПАФВ, имеющих одни и те же параметры при наличии и действии связующей вставки, а также в случае ее отсутствия. При этом в (3) и (4) использовалось соотношение между возбуждающими электрическими напряжениями в виде $U_{2m}/U_{1m} = \text{const}$ и $\Delta\varphi_{21}(\psi) = \varphi_2 - \varphi_1 = \pm k_{\varphi}\psi$ [2].

Параметры ПАФВ: $\gamma_V = \gamma_W = \gamma_{\Pi} = 1.25$; $\gamma_0 = 0.1$; $a_{1V} = 0.66$; $a_{2V} = 0.1$; $a_{1W} = 0.16$; $z_{2V} = z_0 =$

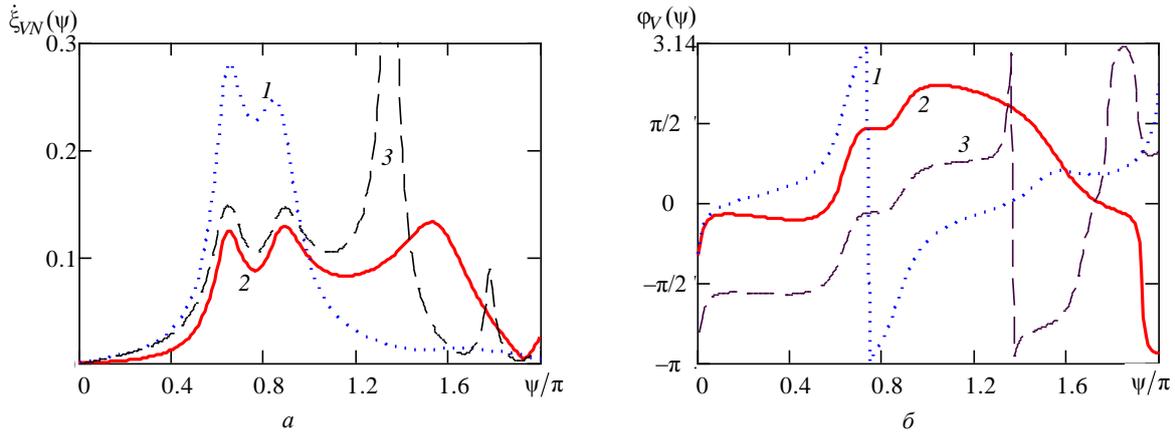


Рис. 3

$= z_{\Pi} = z_{1w} = 40 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с/м}$; $z_{1v} = 5 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с/м}$;
 $\alpha_0 = \alpha_{\Pi} = 0.62$; $p_1 = 0.475$; $p_2 = 0.525$. Здесь
 $\gamma_V = S_V/S$; $\gamma_W = S_W/S$; $a_{1,2v} = \psi_{1,2v}/\psi$ и $z_{1,2v}$, а
 также $a_{1w} = \psi_{1w}/\psi$ и z_{1w} – относительный вол-
 ногой размер и удельный импеданс фронтальных
 и тыльного слоев соответственно. Возбуждение
 секций ПАФВ: 1 – синфазное; 2 и 3 – амплитуд-
 но-фазовое: $U_{2m}/U_{1m} = 1.25$; $\Delta\varphi_{21}(\psi) = -1.05\psi$;
 3 – ПАФВ без вставки; $p = 0.5$. Наличие связую-
 щей вставки исключает проявление резонансных
 свойств единой армирующей стяжки из рабочего
 диапазона ПАФВ.

Жесткую связь расположенных друг напротив
 друга участков пьезостержня и сквозной армиру-
 ющей стяжки удобно выполнять с помощью свя-
 зующих вставок (прокладок), выполненных из
 металла или из твердого диэлектрика. Причем с
 целью уменьшения доли пассивного материала в
 структуре пьезостержня эти вставки можно вы-
 полнять в виде ступенчатой по толщине дискооб-
 разной конструкции, поверхность которой с
 меньшей толщиной соответствует плоской по-
 верхности пьезокерамических шайб, а другая
 часть конструкции с большей толщиной опреде-
 ляет собственно перемычку между пьезостерж-
 нем и армирующей стяжкой. Связующие вставки
 (прокладки) могут располагаться в любых необ-
 ходимых местах пьезостержня. В ПАФВ их удоб-
 но устанавливать между секциями пьезостержня.

Схема сборки ПАФВ предлагаемой конструк-
 ции состоит в следующем. При склеивании пье-
 зостержня в необходимых местах, например меж-
 ду его независимо возбуждаемыми секциями,
 устанавливают связующие вставки (прокладки).
 После окончательной сборки ПАФВ, но перед
 его армированием, на места армирующей стяж-

ки, на которых сделаны клеудерживающие про-
 точки, наносят клеящую массу (например, ком-
 паунды ДМ5–65 или К–153). Затем устанавлива-
 ют сквозную армирующую стяжку и выполняют
 армирование. После полимеризации нанесенной
 клеящей массы ПАФВ готов к работе. Место со-
 единения вставок с армирующей стяжкой выпол-
 няют с небольшим зазором, например 0.1...0.3 мм,
 и хотя бы на одну из этих контактирующих по-
 верхностей (удобнее на армирующей стяжке) нано-
 сят клеудерживающие проточки глубиной, напри-
 мер, 0.3...0.5 мм. Диаметр отверстия в связующих
 вставках должен быть таким, чтобы через них сво-
 бодно проходила силовая резьба армирующей
 стяжки. Для этого места контакта на армирующей
 стяжке целесообразно выполнять несколько боль-
 шего диаметра, чем диаметр ее силовой резьбы.

В реальной конструкции ПАФВ связующая
 вставка, особенно та ее часть, которая служит
 перемычкой между армирующей стяжкой и пье-
 зостержнем, не является абсолютно жесткой. При
 колебаниях ПАФВ в этой перемычке будут возни-
 кать изгибные и сдвиговые деформации. Поэтому
 будем полагать, что необходимая жесткость вставки
 и обеспечиваемая ею жесткая связь между пье-
 зостержнем и армирующей стяжкой будет достигаться,
 когда гибкость указанной перемычки C_{Π} в осе-
 вом направлении будет меньше продольной гибко-
 сти $C_{0i} = l_{0i}/E_0S_0$ прилегающих к ней участков
 армирующей стяжки. Здесь E_0 и l_{0i} – модуль Юнга
 и длины участков армирующей стяжки. В ПАФВ с
 осевой симметрией перемычкой служит часть свя-
 зующей вставки в виде кольцевой перемычки, рас-
 положенной между внутренней боковой поверх-
 ностью пьезостержня и внешней боковой поверх-
 ностью армирующей стяжки.

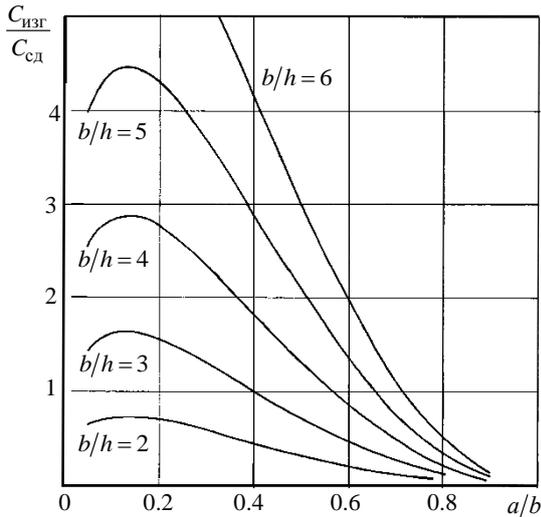


Рис. 4

Согласно данным приближенного решения задач об изгибных и сдвиговых колебаниях кольцевой перемычки, могут быть получены следующие выражения для гибкости в отношении изгиба

$$C_{изг} = \frac{3 \{ S_{\Pi}^2 - [2\pi ab \ln(a/b)]^2 \} (1 - \nu_{\Pi}^2)}{4\pi^2 S_{\Pi} E_{\Pi} h^3}$$

и гибкости

в отношении сдвига $C_{сд} = \frac{\ln(b/a)}{2\pi\mu h}$, где E_{Π} , ν_{Π} , μ –

модуль Юнга, коэффициент Пуассона и модуль сдвига для материала кольцевой перемычки; h , a и b – толщина, внутренний и наружный радиусы кольцевой перемычки. На рис. 4 показана зависимость отношения указанных гибкостей от a/b . Видно, что для большинства практически интересных случаев $C_{изг}/C_{сд} > 1$, т. е. основную роль

играет гибкость кольцевой перемычки в отношении изгиба, т. е. $C_{\Pi} \approx C_{изг}$. Для выполнения граничных условий (3) по равенству упругих смещений и обеспечения жесткой связи торцов расположенных друг напротив друга секций пьезостержня и участков сквозной армирующей стяжки необходимо выполнение условия $C_{изг} \ll \ll C_{0i}$. Здесь под C_{0i} понимается гибкость более короткого из двух участков армирующей стяжки, примыкающих к рассматриваемой вставке (кольцевой перемычке).

Экспериментальная оценка выполнения указанного условия проводилась с помощью измерения модуля полной входной проводимости $|Y_{вх}|$ макетов ПАФВ с единой армирующей стяжкой и вставкой, кольцевая перемычка которой изменялась по толщине (рис. 5). Проявление резонансных свойств армирующей стяжки оценивалось по величине $M = \frac{A_{max} - A_{min}}{A_{max}}$, где A_{max} и A_{min} – соот-

ветствуют значениям $|Y_{вх}|$ на частотах резонанса и антирезонанса армирующей стяжки. На рис. 5 показана зависимость степени проявления единой армирующей стяжки (параметра M) от отношения гибкостей $C_{0i}/C_{изг}$, отложенного по оси абсцисс, а также схема построения ПАФВ. Здесь: 1 и 2 – секции пьезостержней; 3 – армирующая стяжка; 4 – вставка с изменяемой толщиной кольцевой перемычки; 5 и 6 – фронтальная и тыльная накладки. Секции пьезостержней для

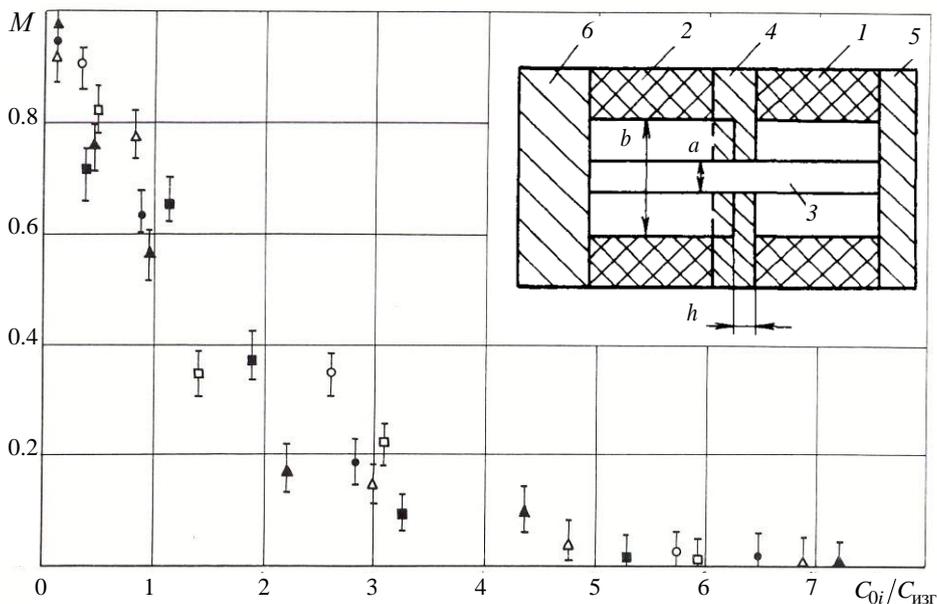


Рис. 5

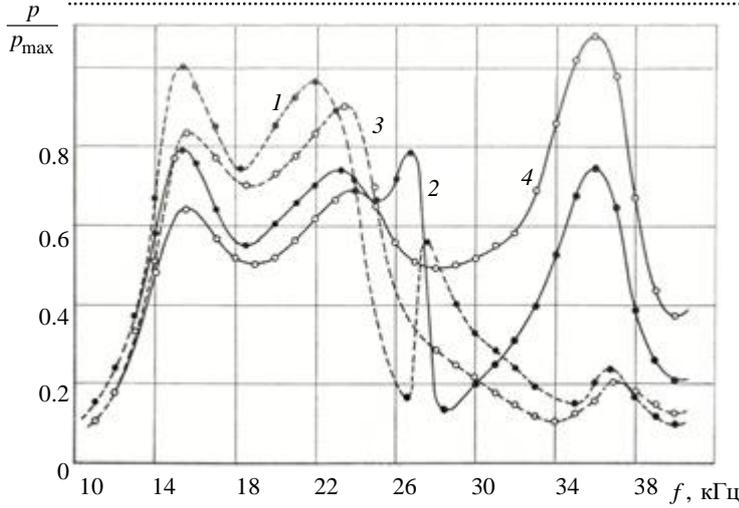


Рис. 6

макетов выполнялись из пьезокерамических шайб двух составов: ТБК-3 (Ø46×Ø22×8 мм) и ЦТБС-3 (Ø46×Ø16×6 мм), вставки для них из стали (точки в виде круга), сплава АМГ (точки в виде треугольника) и стеклотекстолита (точки в виде квадрата), а армирующие стяжки из стали имеют диаметр 8 мм. Для первого макета $l_{0i} = 33$ мм и результаты измерений отмечены черными точками, а для второго $l_{0i} = 25$ мм. Согласно полученным данным, уже при $C_{0i}/C_{изг} \geq 5$ резонансные свойства сквозной армирующей стяжки практически не проявляются на частотной характеристике ПАФВ. Тогда с учетом этого неравенства и формул для C_{0i} и $C_{изг}$ можно получить выражение для выбора толщины кольцевой перемычки:

$$h \geq \sqrt[3]{\frac{3.75(1 - \nu_{\Pi}^2) E_0 a^2 [(b^2 - a^2)^2 - 4a^2 b^2 \ln^2(a/b)]}{E_{\Pi} (b^2 - a^2) l_{0i}}}. \quad (6)$$

Для оценки возможных конструкций ПАФВ с единой армирующей стяжкой в таблице, где представлены варианты выполнения ПАФВ и кольцевой перемычки, обеспечивающей жесткую связь с единой армирующей стяжкой, в качестве примера, приведены значения h (мм), определенные при знаке равенства из выражения (6) для различных материалов и размеров кольцевой перемычки; армирующая стяжка считается выполненной из стали.

В качестве примера действенности предложенного решения по армированию ПАФВ на рис. 6 приведены нормированные АЧХ звукового давления для двух макетов антенн, составленных из 2 × 2 двухсекционных армированных ПАФВ, которые выполнялись в двух вариантах: макет 1

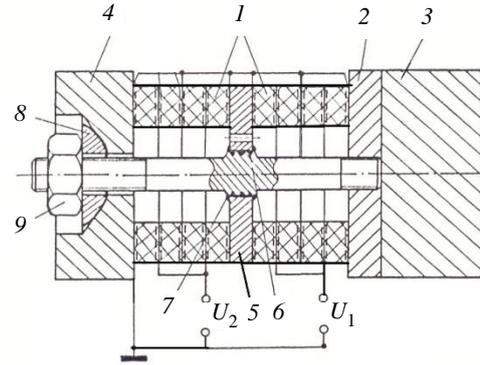


Рис. 7

без вставки, условно разделяющей единую армирующую стяжку на две части, и макет 2 – с этой вставкой (рис. 7). Номера кривых здесь соответствуют: 1 и 2 – макету 1; 3 и 4 – макету 2. Возбуждение ПАФВ: 1 и 3 – синфазное; 2 и 4 – амплитудно-фазовое: $U_{Vm}(\psi) = 1.25$; $\Delta\varphi_V(\psi) = -0.62\psi$ (14 мкс) [6]. Секции пьезостержней в этих ПАФВ состояли из четырех пьезокерамических шайб состава ЦТБС-3 (Ø46×Ø16×6 мм). Вставка для макета 2 выполнялась из стали толщиной $h = 5$ мм; расчет по формуле (6) при условии знака равенства в ней дает $h = 3.4$ мм. Структурные параметры ПАФВ для макетов антенн соответствуют данным рис. 3. Наличие пассивной вставки, расположенной между секциями пьезостержня, отражается на небольшом уменьшении уровня звукового давления (см. также результаты расчета, рис. 3). На рис. 7 показан вариант двухсекционного ПАФВ с вставкой, прикрепленной к армирующей стяжке. Здесь: 1 – секции пьезостержня; 2–4 – фронтальные и тыльная накладки; 5 – вставка; 6 – клеудерживающие проточки; 7 – эпоксидный компаунд; 8 – центрирующая шайба; 9 – стяжная гайка.

l_{0i} , мм	30	40	70
a , мм	5	5	10
b , мм	10 15	20 25	20 30 40
Сталь, $E_{\Pi} = 21 \cdot 10^{10}$ Па	3.2 5.7	7.1 8.9	6.0 10.8 14.9
АМГ или пьезокерамика, $E_{\Pi} = 7 \cdot 10^{10}$ Па	4.5 8.2	10.3 12.8	8.6 15.5 21.4
Текстолит, $E_{\Pi} = 3 \cdot 10^{10}$ Па	6.0 10.8	13.6 17.0	11.4 20.5 28.4

Результаты выполненных расчетов и экспериментальных исследований показывают, что армирование стержневого преобразователя сквозной стяжкой с использованием вставки, жесткость кольцевой перемычки которой в 5 раз больше жесткости меньшего из примыкающих к ней участков арми-

рующей стяжки, позволяет устранить из рабочего диапазона частот ПАФВ резонанс армирующей стяжки, упростить процесс армирования и существенно уменьшить толщину пассивных междудельных (межсекционных) элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дианов Д. Б., Степанов Б. Г. К вопросу расчета частотных характеристик стержневого преобразователя с фазированным возбуждением его пьезосекций // Изв. ЛЭТИ. 1983. Вып. 325. С. 23–32.

2. Степанов Б. Г. О возможности построения широкополосных стержневых пьезопреобразователей с фазированным возбуждением секций // Акуст. журн. 2009. Т. 55, № 3. С. 407–414.

3. А. с. 530481 СССР, МКИ H04R 17/00. Пьезокерамический стержневой преобразователь / А. М. Брук. Опубл. 03.03.77. Бюл. № 36.

4. А. с. 1115245 СССР, МКИ H04R 17/00. Электроакустический преобразователь / Г. А. Михайлов, А. С. Мудрецов, А. А. Шабров. Опубл. 23.09.84. Бюл. № 35.

5. А. с. 1308162 СССР, МКИ H04R 17/00. Стержневой электроакустический преобразователь / А. М. Брук, Д. Б. Дианов, Б. Г. Степанов. Опубл. 03.01.87. Бюл. № 16.

6. Аронов Б. С. Об электромеханическом преобразовании в пьезокерамических стержнях // Акуст. журн. 1980. Т. 26, № 3. С. 456–459.

7. Дианов Д. Б., Кузнецов В. М. Влияние переходных слоев на частотные характеристики стержневых пьезопреобразователей // Изв. ЛЭТИ. 1968. Вып. 63. С. 60–78.

B. G. Stepanov

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

ABOUT REINFORCEMENT OF WIDEBAND ROD TRANSDUCERS WITH AMPLITUDE-PHASED EXCITATION OF SECTIONS

The method of reinforcement of wideband rod transducers, including those with amplitude-phase excitation, which eliminates the negative impact of the reinforcing tightening on their frequency characteristics of such transducers is considered. The rod transducer is reinforced by a single tightening, individual sections of which are attached to the piezoelectric rod with inserts (ring jumpers). The results of calculations of amplitude-frequency and phase-frequency characteristics for the model of the transducer, the piezoelectric rod of which consists of two parts excited by different amplitude and phase electric voltages, using additional inserts and without them. A comparative assessment of the flexibility of the ring jumper, as well as its dimensions, for different materials from which it is made, and for different sizes of the piezoelectric rod of transducer is given. The results of experimental studies confirming the main provisions of the calculations and estimates are presented.

Wideband transducer, reinforcement of rod transducers, amplitude-phase excitation