

ПОЛИГРАФИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

УДК 655.225.6:773.92

С. К. Грудо, магистрант (БГТУ); С. А. Барташевич, кандидат технических наук, доцент (БГТУ);
Е. В. Русак, студент (БГТУ)

ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА И РАСЧЕТА АКУСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СИСТЕМЫ ПРОЦЕССА МОДИФИКАЦИИ ФОТОПОЛИМЕРНЫХ ПЕЧАТНЫХ ФОРМ

В статье представлена методика выбора и расчета акустических параметров ультразвуковой системы модификации флексографских фотополимерных форм. Ультразвуковая акустическая система выполнена в виде полуволнового колебательного контура, состоящего из четвертьволнового преобразователя и концентратора ультразвуковых колебаний, позволяющего минимизировать геометрические размеры и определить коэффициент усиления системы. Данные, полученные при энергетическом расчете пьезоэлементов, дают возможность согласовать выходные цепи генератора с пьезопреобразователем. Методика, предложенная в статье, позволяет найти необходимые акустические параметры системы с учетом рабочей нагрузки, что увеличивает устойчивость системы.

The method of selection and calculation of acoustical parameters of ultrasonic system of modification flexographic photopolymeric forms is presented in the article. The ultrasonic acoustical system is presented by the half-wave oscillatory contour consisting from the quarter wave converter and the concentrator of ultrasonic oscillations to minimize the geometrical sizes and to define the amplification system. The data, gained at power calculation of piezoelectric elements, allows to coordinate target chains of the oscillator with the piezoelectric converter. The method, offered in the article, allows to find necessary acoustical parameters system taking into account the workload that increases stability of oscillatory system.

Введение. Известно, что фотополимерные пластины для флексографской печати состоят в основном из синтетического каучука, близкого к натуральному [1]. Однако синтетический каучук входит в большой класс так называемых эластомеров. Причем указанные материалы, как правило, классифицируются по различным признакам: мономерам, используемым для их получения (изопреновые, бутадиеновые, бутодиенстирольные и т. п.); характерной группировке (атомам) в основной цепи или боковых группах (например, полисульфидные, уритановые, фторкаучуки и т. п.); содержанию наполнителей (незаполненные и наполненные каучуки) и другим признакам. В этой же работе [1] синтетические каучуки характеризуются как аморфные, сравнительно слабо кристаллизующиеся полимеры с высокой гибкостью и относительно малым межмолекулярным взаимодействием цепей, что обуславливает их высокую конформационную подвижность в широком интервале температур.

Основная часть. Исследования ИК-спектроскопии фотополимерных пластин фирмы Dupont марки Cyrel DPU (для цифрового экспонирования), представленные в работе [2], показали, что основу указанных фотополимерных пластин составляет изопреновый каучук, в химический состав которого входит стереорегулярный поли-

изопрен с высоким содержанием звеньев 1,4-цис. В этих же результатах ИК-спектроскопии показано, что технологический процесс полимеризации пластин, предлагаемый производителем, не дает гарантий полной «сшивки» звеньев фотополимерной композиции.

В то же время высокие печатно-эксплуатационные свойства рельефной растровой структуры достигаются за счет дополнительной поперечной сшивки, что ведет к увеличению макромолекулы полимера, а следовательно, придает фотополимерным печатным формам (ФПФ) гомогенные свойства. Эффект дополнительной «сшивки» для фотополимерных пластин, основу которых составляет полиизопрен, являющийся диеновым полимером, т. е. полимером, состоящим из мономеров, содержащих двойные углерод-углеродные связи (π -связи), которые могут разрываться с образованием свободных валентностей, ведет к «сшивке» макромолекул через боковые ветви. Этот способ «сшивки» увеличивает макромолекулу, ее молекулярный вес и придает ей более прочную структуру. В статье [3] авторами был произведен анализ и поиск наиболее продуктивных способов (модификации) фотополимерной формы. Согласно публикации, этого можно достичь, подвергая материал либо поверхностной, либо химической, или механической модификации.

Поверхностная модификация лишь изменяет кристаллическую морфологию и поверхностную топографию, удаляет некоторые вредные примеси, но внутренняя структура материала остается неизменной, и это, в целом, не приводит к улучшению физико-механических свойств полимера.

Химическая модификация подразумевает применение некоторых химических добавок, что изменяет технологические характеристики материала, например уменьшает силы трения и адгезию, но не оказывает существенного влияния на механические свойства полимера. Кроме того, этот способ требует тщательного количественного и качественного подбора добавок, что в данном случае, при изготовлении фотополимерных форм практически невозможно. Авторами указанной работы наиболее эффективным признан метод термодиффузионной обработки. Однако этот метод подразумевает введение в фотополимерную композицию целевых ингредиентов (стабилизаторов, пластификаторов) из водных растворов путем воздействия высоких температур. Этот метод эффективен при спекании, прессовании композиций, а в данном случае, когда речь идет о готовом изделии — фотополимерной форме, он не пригоден. Действие температуры в данном случае может привести к разрушению растровой структуры, а ввод ингредиентов может поменять их эксплуатационные свойства и изменить рельефно-растровую структуру (микротвердость фотополимера, его усадку и охрупчивание).

Механическая модификация предполагает воздействие на молекулы мономера определенного количества энергии, которая приводит их в такое состояние, что они становятся способными, в результате раскрытия двойных связей, произвести взаимное присоединение. В этом классе модификаций наиболее перспективным и экономичным является способ ультразвуковой (УЗ) модификации фотополимерной композиции.

Эффективность воздействия ультразвука на процесс модификации фотополимера объясняется возможностью переноса в полимерной среде огромных энергий. Мощность ультразвуковых колебаний, пропускаемых на единицу площади, может достигать от 1–1000 Вт/см². Это энергия, которую необходимо затратить, чтобы произвести разрыв между атомом углерода С и углеродным радикалом СН, так называемая π -связь. Согласно теоретической концепции, изложенной в работе [4], механизм воздействия УЗ-колебаний на полимер характеризуется не только разрывом этих π -связей между собой, но и приводит к образованию свободных валентностей на концах оборванных

полимерных цепей (образованию макрорадикалов). Процесс структурной перестройки полимера происходит за счет присоединения образовавшихся макрорадикалов в виде боковых ветвей к основной цепи макромолекул. Данная структурная перестройка увеличивает молекулярный вес макромолекул и придает ей разветвленную прочную структуру.

Анализ публикаций по ультразвуковым установкам с учетом необходимых энергетических особенностей авторами данной статьи не выявил методик подбора и расчета энергетических и геометрических параметров для процесса полимеризации ФПФ, а экспериментальная установка, используемая в работе [5], является несовершенной и требует конструктивной доработки и оптимизации.

Поэтому целью данной статьи является разработка методики расчета акустических параметров и конструктивных особенностей ультразвуковой установки. Основными элементами в составе любой технологической установки являются источник энергии (генератор) и ультразвуковая колебательная система [6]. Ультразвуковая колебательная система технологического назначения состоит из преобразователя, согласующего элемента и рабочего инструмента (излучателя). В преобразователе (активном элементе) колебательной системы происходит преобразование энергии электрических колебаний в энергию упругих колебаний ультразвуковой частоты и создается знакопеременная механическая сила. Согласующий элемент системы (пассивный концентратор) осуществляет трансформацию скоростей и обеспечивает согласование внешней нагрузки и внутреннего активного элемента. Рабочий инструмент создает ультразвуковое поле в обрабатываемом объекте или непосредственно воздействует на него.

Важнейшей характеристикой ультразвуковой колебательной системы является резонансная частота. Это обусловлено тем, что эффективность технологических процессов определяется величиной амплитуды колебаний, а максимальное значение амплитуд достигается при возбуждении УЗ колебательной системы на резонансной частоте. Значение этих резонансных частот должны соответствовать разрешенным пределам и допустимым уровням, установленным СН РБ № 9-88-98 от 16.12.1998 (для многофункциональных УЗ аппаратов оптимальная частота f_0 составляет $22 \pm 1,65$ кГц [7]). Колебательная система, используемая для модификации ФПФ, в конструктивном и технологическом плане должна удовлетворять определенным требованиям, изложенным в работе [6]. Исходя из этих требований и проведя аналитический обзор существующих технологических систем, авторами данной статьи было оп-

ределено, что наиболее полно удовлетворяют приведенным требованиям полуволновые колебательные системы, состоящие из четвертьволновых преобразователя и концентратора.

Конструкция УЗ колебательной системы представлена на рис. 1. Конструкция содержит корпус 1 и ультразвуковую колебательную систему, состоящую из отражающей металлической накладки 3, пьезоэлектрических элементов 4 с мощностью 50 Вт, к электродам которых через соединительный электрический кабель 2 подается электрическое возбуждающее напряжение, концентратора 5, к которому присоединен рабочий инструмент 6.

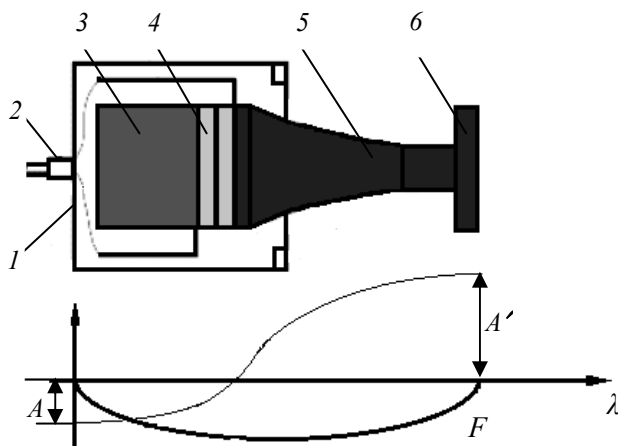


Рис. 1. Конструкция УЗ колебательной системы

Согласно работе [6], для получения коэффициента усиления K , под которым понимают отношение амплитудного значения колебаний на выходе к значению на входе, в пределах 10–15 необходимо использовать тыльную накладку значительных диаметров. Такое увеличение габаритов колебательной системы не только приведет к возникновению радиальных колебаний, существенно уменьшающих коэффициент усиления, но и является практически не реализуемым вследствие отсутствия пьезоэлектрических элементов больших диаметров (более 70 мм). Данная колебательная система состоит из двух пьезоэлектрических элементов, расположенных между торцом отражающей накладки 3 и экспоненциальным участком волновода 5, согласно рис. 1, что позволяет обеспечить увеличение амплитуды колебаний рабочего инструмента не менее чем в 10 раз, а также создать минимально возможный продольный размер и массу УЗ колебательной системы и уменьшить число механических соединений.

УЗ-колебания высокой интенсивности в технологических аппаратах создаются при помощи магнитоэлектрических или пьезоэлектрических преобразователей. Пьезоэлектрические материалы характеризуются очень высокой рабочей температурой (более 200°C, [7]), что является преимуще-

ством перед магнитоэлектрическими преобразователями, которые при обеспечении больших мощностей требуют водяного охлаждения. Преобразователи мощностью до 1 кВт, как правило, изготавливаются на основе цирконата-титаната свинца с различными добавками. Пьезокерамика марки ЦТС-19 обладает высоким пьезомодулем, значительной диэлектрической проницаемостью, малой гигроскопичностью, невысоким входным сопротивлением, что требует небольших электрических напряжений. В качестве преобразователя были выбраны две одинаковые кольцевые пластины ЦТ8 из пьезоматериала ЦТС-19 размером 38×16×5 мм и мощностью 50 Вт. Пьезоэлектрические пластины вместе с отражающей накладкой имеют жесткое соединение. Материалом для отражающей накладки является сталь марки Ст 45. Это объясняется тем, что для повышения КПД преобразователя желательно уменьшить волновое сопротивление отражающей накладки. Конструкция такого активного элемента представлена на рис. 2.

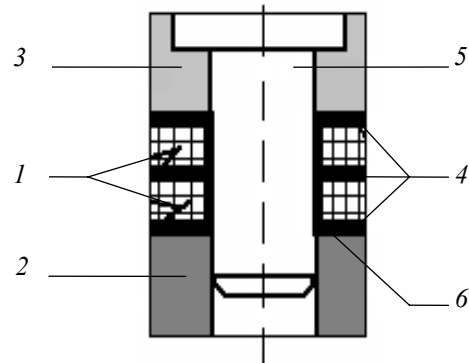


Рис. 2. Конструктивная особенность активного элемента преобразователя

Преобразователь состоит из двух пьезоэлектрических кольцевых элементов 1, излучающего элемента 2, отражающей стальной накладки 3, прокладок из мягкой проводящей фольги 4 и стягивающего болта 5. Для электрической изоляции внутренней цилиндрической поверхности пьезоэлементов от металлического стягивающего болта необходимо применить изолирующую втулку 6. Размеры отдельных элементов преобразователя, связанные с частотой собственных колебаний преобразователя, соотносятся следующим выражением (1) [8]:

$$\operatorname{ctg}\left(\frac{2\pi f_0}{c} \cdot l\right) = \frac{\rho_1 s_1 c_1}{\rho s c} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{2\pi f_0}{c_1} \cdot l_1\right), \quad (1)$$

где f_0 – резонансная частота; l, l_1 – толщина одной пластины пьезоэлемента, $5 \cdot 10^{-3}$ м и отражающей накладки соответственно; c, c_1 – скорости распространения звука в материалах: 3000 м/с² и

5060 м/с²; s , s_1 – площади поверхности пластин, которые в данном случае равны; ρ , ρ_1 – плотности материалов пластин 7300 кг/м³ и 7810 кг/м³.

Расчет этого соотношения дает толщину отражающей стальной накладке $l_1 = 2,4 \cdot 10^{-2}$ м. Согласно источнику [6], общая длина преобразователя определяет резонансную частоту по соотношению (2):

$$l + l_1 = \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4f_0}, \quad (2)$$

где λ – длина волны в материале преобразователя, м.

Исходными данными для расчета преобразователя являются геометрические размеры и физические параметры применяемого пьезоматериала и удельная акустическая мощность. На примере данного преобразователя принимаются следующие параметры керамики цирконата-титаната свинца: диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 1700$; пьезоэлектрический модуль по толщине $d_{33} = 350 \times 10^{-12}$ Кл/Н; скорость распространения звука в материале $c = 3000$ м/с; модуль упругости материала $E = 0,7 \cdot 10^{11}$ Па; плотность $\rho = 7300$ кг/м³; тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta = 0,028$; механическая добротность $Q = 50$. Удельная акустическая мощность для пьезокерамики, используемая при резонансной частоте $f_0 = 22$ кГц принимается равной 2 Вт/см² согласно [8]. В качестве обрабатываемой среды выступает материал печатной пластины полиизопрен: скорость распространения звука $c = 54$ м/с; плотность $\rho = 1200$ кг/м³.

Последовательность расчета параметров одного пьезокерамического элемента на основе уравнений схем замещения пьезоэлектрических излучателей [8] состоит в следующем. Общая акустическая мощность рассчитывается по формуле (3):

$$P_{\text{ак}} = P'_{\text{ак}} s, \quad (3)$$

где $P_{\text{ак}}$ – акустическая мощность, Вт; $P'_{\text{ак}}$ – удельная акустическая мощность, Вт/м²; s – площадь излучающей поверхности преобразователя, м².

Необходимая напряженность электрического поля (амплитуда, В/м) определяется по формуле (4):

$$E_m = \sqrt{\frac{0,42 \cdot 10^{24} P_{\text{ак}} (\rho c)_{\text{ср}}}{2d_{33}^2 E^2 \eta_{\text{ма}}^2}}, \quad (4)$$

где $(\rho c)_{\text{ср}}$ – волновое сопротивление среды, кг/(м²·с); $\eta_{\text{ма}}$ – механико-акустический КПД, обычно выбирается 0,75–0,80.

Напряжение возбуждения U определяется формулой (5):

$$U = E_m l. \quad (5)$$

Для нахождения активного сопротивления преобразователя R , Ом, по формуле (6) необходимо рассчитать емкость C , Ф, которая представляет собой электрическую емкость, определяемую по формуле для плоского конденсатора, сопротивление потерь $R_{\text{д}}$, Ом, и сопротивление излучения при работе на резонансной частоте R_s , Ом, по выражениям, представленным согласно [8].

$$R = R_s R_{\text{д}} / (R_s + R_{\text{д}}). \quad (6)$$

Определив емкостное сопротивление x_c , Ом [6], можно рассчитать полное сопротивление z , Ом, по формуле (7):

$$z = R x_c / \sqrt{R^2 + x_c^2}. \quad (7)$$

Общий электроакустический КПД представляет собой произведение КПД электромеханического и механико-акустического согласно формуле (8):

$$\eta_{\text{за}} = \eta_{\text{ма}} \eta_{\text{эм}}. \quad (8)$$

Исходные данные пьезоэлектрического преобразователя, приведенные в работе [8], позволяют согласовать выходные параметры цепей генератора с указанным пьезоэлектрическим преобразователем. Т.к. конструкция колебательной системы имеет два пьезоэлемента, общая толщина которых $2l$, все сопротивление преобразователя на резонансной частоте равняется половине сопротивления преобразователя с одним пьезоэлементом толщиной l , а напряжение возбуждения увеличивается в два раза.

Для увеличения амплитуды колебаний рабочего инструмента и согласования преобразователя с нагрузкой (обрабатываемой средой) применяются УЗ концентраторы. Приведенный сравнительный анализ возможных форм образующей концентраторов в работах [6–8] показал, что более совершенными конструктивными формами обладают составные концентраторы. Особенно перспективными из них являются ступенчатые концентраторы с плавными экспоненциальными или радиальными переходами. В данной работе концентратор состоит из двух участков: экспоненциального и цилиндрического, как показано на рис. 1. Особенностью конструкции экспоненциального участка является незначительный в продольном направлении порядка 1–3 мм цилиндрический буртик, который определяет входной диаметр экспоненциального участка.

В работе [9] показано, что устойчивость УЗ колебательных систем зависит от характера и величины технологической нагрузки, а также от материала, из которого изготовлен УЗ-инструмент. Величина технологической нагрузки $z_{\text{н}}$

в модифицируемом материале определяется по формуле (9):

$$z_n = R_n + x_n, \quad (9)$$

и включает в себя активную составляющую R_n и пассивную составляющую x_n сопротивления нагрузки, первая из которых вызывается диссипацией энергии, а вторая — упруго-инерционной реакцией.

Для определения величины нагрузочного и входного сопротивлений необходимо рассмотреть продольные колебания стержня постоянного сечения, один конец которого свободен, а другой нагружен. Формула (10) представляет собой дифференциальное уравнение распространения продольных волн:

$$\frac{\partial}{\partial z} (EF \frac{\partial W}{\partial z}) = \rho F \frac{\partial^2 W}{\partial t^2}, \quad (10)$$

где E — модуль Юнга материала; $W(z, t)$ — функция пропорциональная смещению и времени; $F(z)$ — произвольно меняющаяся по координате z площадь сечения; ρ — плотность материала; t — время.

Представленное уравнение является линейным однородным. Применяв к его решению метод Фурье и введя константу λ , которая называется волновым числом и зависит от рабочей частоты и скорости звука в материале, получается уравнение (11), которое имеет различные решения в зависимости от закона изменения площади поперечного сечения:

$$F \cdot X'' + F' X' + \lambda^2 FX = 0. \quad (11)$$

Разбиение стержневого волновода на участки, как показано на рис. 3, осуществляется с учетом условия непрерывности функции (12) изменения площади поперечного сечения, а сам стержень воздействуют на модифицируемый материал с жесткостью C_j .

$$F(z) = \begin{cases} F_1^0 e^{-2\alpha_1 z_1}; & 0 < z_1 < l_1, \\ F_2^0 e^{-2\alpha_2 z_2}; & l_1 < z_2 < l_2, \end{cases} \quad (12)$$

где $F(z)$ — экспоненциальный закон изменения площади поперечного сечения волновода; F^0 — начальная площадь участка; z — координата сечения по длине волновода; α — показатель экспоненты.

Методология решения данных уравнений позволяет представить составной стержневой концентратор в виде совокупности последовательно акустически жестко связанных соединенных элементов, площадь поперечного сечения которых меняется по приведенной системе уравнений (12). Длина участков УЗ концентратора определяется по формуле (13) из условия

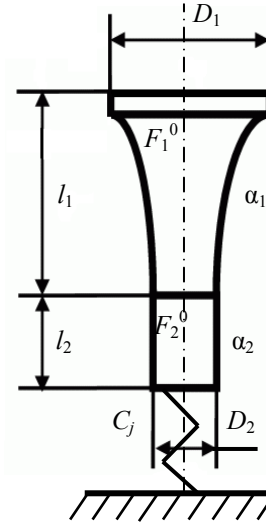


Рис. 3. Составной ступенчато-экспоненциальный концентратор

резонанса акустической системы. Частота колебаний, физические свойства материала и реактивная составляющая сопротивления нагрузки полагаются известными, а $K_i = 1, P_i = \alpha_i$.

$$l_i = \frac{1}{\beta_i \lambda_i} \left\{ \arctg \left(\frac{(\alpha_i + \psi_i) K_i - P_i}{K_i \beta_i \lambda_i + \frac{P_i}{\beta_i \lambda_i} (\alpha_i + \psi_i)} \right) + \pi_n \right\},$$

где K_i — коэффициент, определяемый как

$$K_i = K_{i-1} \cos(\beta_{i-1} l_{i-1} \lambda_{i-1}) - P_{i-1} \sin(\beta_{i-1} l_{i-1} \lambda_{i-1}) / \beta_{i-1} \lambda_{i-1}; \quad (14)$$

P_i — безразмерный коэффициент, который рассчитывается по формуле (15):

$$P_i = E_{i-1} F_{i-1} (\beta_{i-1} \lambda_{i-1} (K_{i-1} \sin(\beta_{i-1} l_{i-1} \lambda_{i-1}) + P_{i-1} \cos(\beta_{i-1} l_{i-1} \lambda_{i-1}) / \beta_{i-1} \lambda_{i-1}) E_i F_i - K_i [E_{i-1} F_{i-1} \alpha_{i-1} / E_i F_i - \alpha_i]), \quad (15)$$

где $\beta = (1 - (\alpha^2 / \lambda^2))^{1/2}$ — коэффициент; ψ — величина реактивной составляющей сопротивления нагрузки, которая определяется как $\psi = 2\pi m f_0 C_j / E_2 F_2$, где m — масса обрабатываемой среды.

Особое значение имеет зависимость, связывающая геометрию стержневой системы, свойства материала и величину нагрузки и определяемая по формуле (16):

$$\psi_i = \frac{P_i (\alpha_i \operatorname{tg}(\gamma_i) / \beta_i \lambda_i + 1) - (\alpha_i - \beta_i \operatorname{tg}(\gamma_i)) / K_i}{1 - P_i \operatorname{tg}(\gamma_i) / \beta_i \lambda_i K_i},$$

где $\gamma_i = \beta_i \cdot \lambda_i \cdot l_i$.

По приведенной формуле расчет ведется путем последовательного перехода от предыдущих звеньев системы к последующим, с учетом,

что последующие звенья являются нагрузкой на предыдущие [9].

Коэффициент усиления ультразвукового инструмента K_y находится по формуле (17), а амплитудные значения продольных деформаций E_i в стержне по формуле (18):

$$K_y = M_i e^{a_i l_i} (K_i \cos(\xi_i) - P_i \sin(\xi_i) / \beta_i \lambda_i), \quad (17)$$

где $M_i = M_{i-1} e^{a_{i-1} l_{i-1}}$; $M_1 = 1$ – безразмерный коэффициент, учитывающий изменение площади поперечного сечения;

$$E_i = A_i M_i e^{a_i z} \left[\frac{K_i (\alpha_i \cos(\xi_i) - \beta_i \lambda_i \sin(\xi_i)) - P_i (\alpha_i \sin(\xi_i) + \beta_i \lambda_i \cos(\xi_i))}{\beta_i} \right],$$

где A_i – амплитуда в начале первого участка ($i = 1$; $z = 0$); а $\xi_i = \beta_i \lambda_i z$.

Координата сечения с максимальными деформациями Z_{\max_i} определяется по формуле (19):

$$Z_{m_i} = \frac{1}{\beta_i \lambda_i} \operatorname{arctg} \left[\frac{K_i (\alpha_i^2 - (\beta_i \lambda_i)^2) - P_i 2\alpha_i}{K_i 2\alpha_i \beta_i \lambda_i + \zeta_i (\alpha_i - (\beta_i \lambda_i)^2)} \right],$$

где $\zeta_i = P_i / (\beta_i \lambda_i)$.

Нулевая амплитуда Z_{0_i} – по формуле (20):

$$Z_{0_i} = \frac{1}{\beta_i \lambda_i} \operatorname{arctg} \left(\frac{K_i \beta_i \lambda_i}{P_i} \right). \quad (20)$$

Таким образом, приведенные выражения (13)–(20) позволяют рассчитать колебательные системы составного УЗ концентратора.

Непосредственная же передача УЗ колебаний от преобразователя через концентратор в обрабатываемую среду осуществляется с помощью рабочего инструмента, который соединяется с торцевой поверхностью цилиндрического участка резьбовым соединением с мелким шагом через мягкие металлические прокладки.

Рабочие инструменты должны отвечать следующим требованиям: максимальный диаметр рабочего инструмента должен быть меньше половины длины волны изгибных колебаний, а продольный размер должен быть меньше четверти длины волны продольных колебаний в инструменте.

В качестве источника питания электроакустической колебательной системы выбран УЗ генератор на транзисторах с автоматической подстройкой частоты УЗГ13-0,1/22 со следующими техническими характеристиками: номинальная выходная мощность $P_{\text{вых}} = 100 \pm 10$ Вт; регулировка мощности плавная 10–100%; рабочая частота $f_0 = 22 \pm 1,65$ кГц; потребляемая от сети мощность $P < 0,2$ кВт; напряжение однофазной питающей сети $U = 220$ В; частота питающей

сети 50 Гц; габаритные размеры не более $310 \times 285 \times 150$ мм; масса не более 9,0 кг.

Закключение. Предложенная методика подбора и расчета акустических параметров полуволновой колебательной системы и четвертьволновых преобразователя и концентратора для процесса полимеризации флексографских ФПФ позволяет найти необходимые акустические параметры ультразвуковой системы с учетом рабочей нагрузки и тем самым увеличить устойчивость этой системы при выполнении модификации ФПФ, а также снизить ее энергоемкость.

Литература

1. Гармонова, И. В. Синтетический каучук / И. В. Гармонова. — Л.: Химия, 1983. — С. 154–158.
2. Медведев, С. В. Гомогенизация структуры фотополимерных печатных форм флексографской печати ультразвуковыми колебаниями / С. В. Медведев, С. А. Барташевич, М. А. Тылецкая // Труды БГТУ. Сер. IX, Издат. дело и полиграфия. — 2009. — Вып. XVII. — С. 36–39.
3. Медведев, С. В. Методы и способы повышения качества флексографских фотополимерных форм / С. В. Медведев, С. А. Барташевич, Т. А. Ковальчук // Труды БГТУ. Сер. IX, Издат. дело и полиграфия. — 2008. — Вып. XVI. — С. 29–32.
4. Эльпинер, И. Е. Биофика ультразвука / И. Е. Эльпинер. — М.: Наука, 1973. — С. 155–161.
5. Медведев, С. В. Повышение эксплуатационных характеристик фотополимерных печатных форм путем облучения их ультразвуковыми колебаниями / С. В. Медведев, С. А. Барташевич // Труды БГТУ. — 2011. — № 9: Издат. дело и полиграфия. — С. 61–66.
6. Хмелёв, В. Н. Ультразвуковая размерная обработка материалов: монография / В. Н. Хмелёв, Р. В. Барсуков, С. Н. Цыганок // Алт. гос. техн. ун-т. им. И. И. Ползунова. — Барнаул: АлтГТУ, 1997. — С. 120.
7. Ультразвук, передающийся контактным путем. Предельно допустимые уровни на рабочих местах: СН РБ № 9-88-98. — Введ. 16.12.1998. — Минск: М-во здравоохранения Респ. Беларусь, 1998. — 5 с.
8. Донской, А. В. Ультразвуковые электротехнологические установки / А. В. Донской, О. К. Келлер. — Л.: Энергоиздат, 1982. — С. 60–71.
9. Негров, Д. А. Влияние энергии УЗ-колебаний на структуру и свойства полимерного композиционного материала на основе ПТФЭ: автореф. дис. ... канд. наук: 05.02.01 / Д. А. Негров; Омский гос. техн. ун-т. — Омск, 2009. — 20 с.

Поступила 21.03.2012