



УДК 534.2, 539,32:534.8.081.7

© В. И. Римлянд, В. Н. Старикова, А. И. Кондратьев, А. А. Король, 2009

ДИНАМИКА ДИСПЕРСИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АКУСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛИМЕРИЗУЮЩИХСЯ СОСТАВОВ

Римлянд В. И. – проректор по научной работе д-р техн. наук, проф. кафедры «Физика» (ТОГУ), тел.: (4212) 22-44-19, e-mail: Vlalimih.Rimlyand@mfil.khstu.ru; *Старикова В. Н.* – преп. кафедры «Физика» (ТОГУ); *Кондратьев А. И.* – д-р техн. наук, проф. кафедры «Прикладная математика» (ДВГУПС), тел.: (4212) 40-70-89, e-mail kondrlm@rambler.ru; *Король А. А.* – преп. кафедры «Прикладная математика» (ДВГУПС)

Проведен анализ дисперсионных характеристик скорости и коэффициента затухания ультразвуковых колебаний для составов на основе эпоксидных смол, находящихся на различных стадиях процесса полимеризации или температурных переходов.

The analysis of dispersion characteristics of speed and attenuation factor of ultrasonic fluctuations has been carried out for compositions on the basis of epoxy resins which are at various stages of polymerization or temperature transitions.

Ключевые слова: скорость, коэффициент затухания, дифракционные поправки, преобразование Фурье, полимеризация, вязкоупругие среды.

В настоящее время достаточно часто используются материалы, полученные на основе полимеризующихся составов эпоксидных смол с добавлением в качестве отвердителя полиэтиленполиамин (ПЭПа). Качество конечной продукции во многом зависит от условий процесса полимеризации и процентного содержания ПЭПа. Для определения свойств, качества и динамики процесса полимеризации образцов используются ротационные и капиллярные реометры, вибрационные методы, метод давления на образец, методы свободных колебаний и акустические методы [1–4].

Акустические методы, особенно их импульсная реализация, являются наиболее простыми в реализации и вместе с тем позволяют определить основные особенности процесса полимеризации. Для расширения их возможностей необходимо определение частотных (дисперсионных) зависимостей скорости распространения звука C и коэффициента затухания α ультразвуково-

вых колебаний, которые позволят более полно исследовать динамику процесса.

В данной работе мы рассмотрели возможности определения дисперсионных характеристик параметров C и α полимеризующихся составов на основе эпоксидных смол с добавлением ПЭПа для различных стадий процесса при измерениях, полученных в импульсном режиме. Следует отметить, что широко применяемые сейчас методы вейвлет-преобразования при измерениях скорости звука неприменимы вследствие значительных искажений фазовых характеристик исходного сигнала.

Схема проведения измерений и характерная форма акустического сигнала для различных стадий процесса полимеризации приведены на рис. 1.

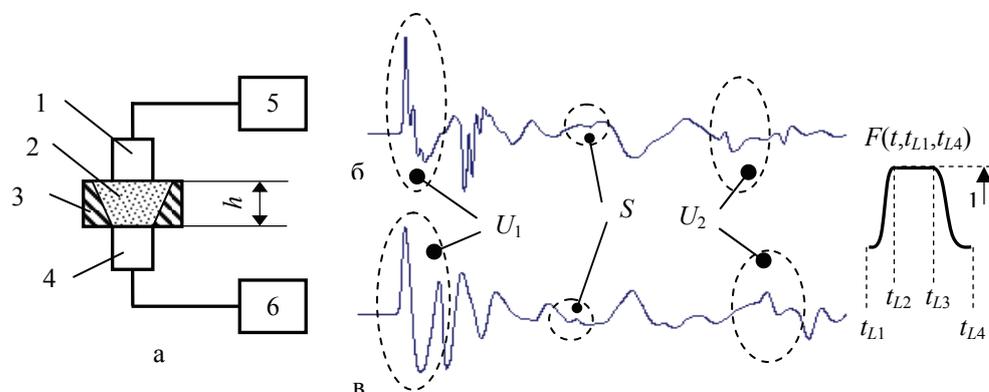


Рис. 1. Схема измерительной установки (а) и характерная форма сигнала на заключительной фазе (б) и начальной фазе (в) процесса

Измерения проводятся следующим образом. Исследуемый состав 2 (образец) заливался в специальную фторопластовую кювету 3 конусной формы высотой $h = 32$ мм, помещенной между излучателем 1 и приемником 4 ультразвуковых колебаний. В качестве излучателя и приемника использовались пьезопреобразователи диаметром рабочих поверхностей ($2r$) 12 мм и полосой рабочих частот $(0,01 \div 3)$ МГц. Сигнал с генератора 5 амплитудой 70 В и длительностью 4 мкс подавался на излучатель 1. Сигнал с приемника 4 поступает на блок регистрации 6, запуск которого производится синхроимпульсом генератора 5. Рабочий диапазон частот блока 6 составлял $(0,001 \div 10)$ МГц.

Блок регистрации 6 позволяет сохранять сигнал в цифровом виде с шагом дискретизации по времени 10 нс. На рис. 1, б, в достаточно отчетливо выделяются первый пришедший ультразвуковой ($УЗ$) U_1 и второй переотраженный U_2 . Сдвиговая составляющая сигнала (помечена на рисунке символом S) выделяется достаточно сложно. Кроме того, следует отметить наложение переотраженных от «стенок» кюветы составляющих сигнала на импульс U_2 . Для снижения влияния этого фактора при определении дисперсионных зависимостей параметров C и α мы предприняли следующие шаги:



1) локализовали временные области анализируемых импульсов U_1 и U_2 (определяется по длительности первой полуволны, см. рис. 1, б, в);

2) выбрали «шапку» $F(t, t_{L1}, t_{L4})$ (t – время; t_{L1}, t_{L4} – времена начала и окончания области локализации, соответственно, L – номер выбранного импульса, $L = 1$ – первый, пришедший УЗ импульс, $L = 2$ – первый переотраженный УЗ импульс и т. д.), обеспечивающую «вырезание» анализируемого интервала без существенных искажений АЧХ и ФЧХ сигнала;

3) абсолютное значение коэффициента затухания $\alpha_0(f)$ определяли по спектрам импульсам U_{10}, U_{20} для образцов, находящихся в полностью отвержденном состоянии;

4) относительные изменения коэффициента затухания $\Delta\alpha(f)$ и значение скорости $C(f)$ для образцов, находящихся на промежуточном этапе процесса полимеризации, определяли, анализируя спектры импульсов U_{10} и U_1 (сигнал на промежуточном этапе).

Функция $F(t_{L1}, t_{L4})$ имеет следующую форму:

$$F(t, t_{L1}, t_{L4}) = h(t - t_{L1})h(t_{L2} - t) \left(\frac{(t - t_{L1})(t - 2t_{L2} + t_{L1})}{(t_{L2} - t_{L1})^2} \right)^2 + \\ + h(t - t_{L2})h(t_{L4} - t) - h(t - t_{L3})h(t_{L4} - t) \left(\frac{(t - t_{L3})(t - 2t_{L4} + t_{L3})}{(t_{L4} - t_{L3})^2} \right)^2, \quad (1)$$

где $h(t)$ – функция Хевисайда; t_{L2}, t_{L3} – времена, определяющие скорость перехода значения функции $F(t, t_{L1}, t_{L4})$ от 0 до 1 и от 1 до 0 соответственно (см. рис. 1).

Для определения частотной заисти параметров α и C находим спектральные характеристики первого пришедшего и первого переотраженного импульсов, с учетом «шапки»:

$$U_1(\omega) = \frac{K}{\sqrt{2\pi}} \int_{t_{11}}^{t_{14}} U_1(t, h) e^{-i\omega t} dt \approx \frac{K}{2\pi} U^*(\omega) \cdot W \cdot K_{DIF}(\omega, h) \cdot e^{-\alpha(\omega)h} e^{-i \cdot k \cdot h}; \quad (2)$$

$$U_2(\omega) = \frac{K}{\sqrt{2\pi}} \int_{t_{21}}^{t_{24}} U_2(t, 3h) e^{-i\omega t} dt \approx \frac{K}{2\pi} U^*(\omega) \cdot W \cdot V^2 \cdot K_{DIF}(\omega, 3h) \cdot e^{-3\alpha(\omega)h} e^{-3i \cdot k \cdot h},$$

где K – коэффициент усиления блока б (см. рис. 1); $U^*(\omega)$ – спектр сигнала на входе в образец; $K_{DIF}(\omega, h)$ – коэффициент, учитывающий дифракционные искажения сигнала; $W = 4Z_P Z_O / (Z_P + Z_O)^2$ – коэффициент прохождения УЗ колебаний через границы раздела преобразователь – образец, образец – преобразователь; $Z_P = 2,5 \cdot 10^7$ кг/м²/с – акустический импеданс преобразователя; $Z_O = \rho C$ – акустический импеданс образца; $\rho = 1170$ кг/м³ – плотность материала образца; $\omega = 2\pi f$; f – частота УЗ колебаний; $k = \omega / C$; $V = (Z_P - Z_O) / (Z_P + Z_O)$ – коэффициент отражения УЗ колебаний от границы раздела образец – преобразователь.

Для определения $K_{DIF}(\omega, x)$ мы воспользовались соотношением [5]

$$K_{DIF}(\omega, x) = [1 - (A \cdot J_0(\zeta) + I \cdot B \cdot J_1(\zeta))e^{-I \cdot \zeta}] = |K_{DIF}(\omega, x)|e^{I \cdot \Psi_{DIF}}, \quad (3)$$

где $A = [1 - \zeta^2 / (2k^2 r^2)]$; $B = B + \zeta / (k^2 r^2)$; $\zeta = k(\sqrt{x^2 + 4r^2} - x) / 2$, x – путь, пройденный УЗ импульсом; $J_0(\zeta)$, $J_1(\zeta)$ – функции Бесселя; $|K_{DIF}(\omega, x)| = \{1 + [AJ_0(\zeta)]^2 + [BJ_1(\zeta)]^2 - 2[BJ_0(\zeta)\cos\zeta + DJ_1(\zeta)\sin\zeta]\}^{1/2}$ – модуль $K_{DIF}(\omega, x)$; $\Psi_{DIF}(\omega, x) = \arctg \frac{BJ_0(\xi)\sin\xi - DJ_1(\xi)\cos\xi}{1 - BJ_0(\xi)\cos\xi - DJ_1(\xi)\sin\xi}$ – фаза $K_{DIF}(\omega, x)$.

Времена t_{L1} , t_{L2} , t_{L3} , t_{L4} подбирались следующим образом: t_{L2} определяется по времени прихода максимума первой полуволны импульса. $t_{L1} = t_{L2} - t_{L\Phi} - 0,5$ мкс, $t_{L3} = t_{L2} + 2$ мкс, $t_{L4} = t_{L3} + 3$ мкс ($t_{L\Phi}$ – длительность переднего фронта импульса).

Для иллюстрации на рис. 2 приведены форма исходного сигнала и сигналов, полученных путем нахождения спектра с применением «шапки» $F(t, t_{L1}, t_{L4})$ и его обратного преобразования Фурье во временную форму (пунктиром обозначена область «вырезки сигнала»).

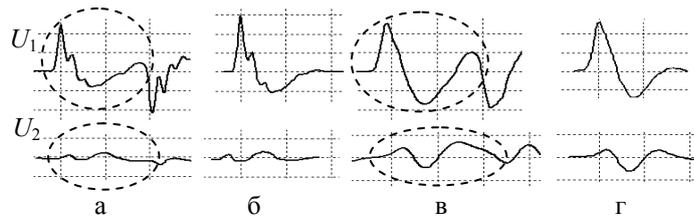


Рис. 2. Форма импульсов, исходная (а, в) и восстановленная (б, г).
 а, б – образец полностью полимеризовавшийся; в, г – начальная фаза процесса

На рис. 2 видно, что основные особенности сигнала при его восстановлении сохраняются. Кроме того, видно, что полностью устранить наложение составляющих сигнала, отраженных от ограничивающих поверхностей кюветы на переотраженный импульс U_2 , не удастся. Диапазон частот накладываемого сигнала для разных стадий процесса колеблется в интервале от $20 \div 100$ до $500 \div 1000$ кГц.

В соответствии с выражением (2) для $\alpha_0(f)$ и $C_0(f)$ (образцы находятся в полностью отвержденном состоянии) получаем

$$\alpha_0(f) = \frac{20}{2h} \lg \left(\frac{|U_{10}(\omega)| \cdot |K_{DIF}(\omega, h)|_0}{|U_{20}(\omega)| \cdot |K_{DIF}(\omega, 3h)|_0} V^2 \right); \quad (4)$$

$$C_0(f) = \frac{2h}{t_{20} - t_{10} + \frac{\varphi_{10}(\omega) - \varphi_{20}(\omega) - \Psi_{DIF}(\omega, h)|_0 + \Psi_{DIF}(\omega, 3h)|_0}{\omega}}, \quad (5)$$

где $|U_{10}(\omega)|$, $\varphi_{10}(\omega)$, t_{10} , $|U_{20}(\omega)|$, $\varphi_{20}(\omega)$, t_{20} – АЧХ, ФЧХ и времена прихода импульсов U_{10} и U_{20} соответственно.



Значения t_{10} , t_{20} определялись по результатам измерения времен прихода переднего фронта импульсов U_{10} и U_{20} .

$\Delta\alpha(f)$ и $C(f)$ для образцов, находящихся на промежуточном этапе процесса полимеризации, рассчитывали по формулам

$$\Delta\alpha(f) = \frac{20}{h} \lg \left(\frac{|U_{10}(\omega)| \cdot |K_{DIF}(\omega, h)| \cdot W \cdot K}{|U_1(\omega)| \cdot |K_{DIF}(\omega, h)|_0 \cdot W_0 \cdot K_0} \right); \quad (6)$$

$$C(f) = \frac{C_0(f)}{1 + \frac{C_0(f)}{h} \left(t_1 - t_{10} + \frac{\varphi_{10}(\omega) - \varphi_1(\omega) - \Psi_{DIF}(\omega, h)|_0 + \Psi_{DIF}(\omega, h)}{\omega} \right)}. \quad (7)$$

Погрешности расчета параметров $\alpha_0(f)$, $C_0(f)$, $\Delta\alpha(f)$ и $C(f)$ можно представить в виде (погрешностью определения частоты пренебрегаем):

$$\begin{aligned} \delta\alpha_0 &= \frac{1}{h} \sqrt{(\alpha_0 \delta h)^2 + (\lg(e))^2 \left(\left(\frac{\delta|U_{10}|}{|U_{10}|} \right)^2 + \left(\frac{\delta|U_{20}|}{|U_{20}|} \right)^2 + 2 \left(\frac{\delta|K_{DIF}|}{|K_{DIF}|} \right)^2 + 4 \left(\frac{\delta V}{V} \right)^2 \right)}; \\ \frac{\delta C_0}{C_0} &= \sqrt{\left(\frac{\delta h}{h} \right)^2 + \left(\frac{C_0}{2h} \right)^2 \left(2(\delta t)^2 + \frac{(\delta\varphi_{10})^2 + (\delta\varphi_{20})^2 + 2(\delta\Psi_{DIF})^2}{\omega^2} \right)}; \quad (8) \\ \delta(\Delta\alpha) &= \frac{1}{h} \sqrt{(\Delta\alpha \cdot \delta h)^2 + (\lg(e))^2 \left(\left(\frac{\delta|U_{10}|}{|U_{10}|} \right)^2 + \left(\frac{\delta|U_1|}{|U_1|} \right)^2 + 2 \left(\frac{\delta|K_{DIF}|}{|K_{DIF}|} \right)^2 + 2 \left(\frac{\delta W}{W} \right)^2 \right)}; \\ \frac{\delta C}{C} &= \sqrt{\left(\frac{\delta C_0}{C_0} \right)^2 + \left(\frac{C_0}{h} \right)^2 \left(2(\delta t)^2 + \frac{(\delta\varphi_{10})^2 + (\delta\varphi_{20})^2 + 2(\delta\Psi_{DIF})^2}{\omega^2} \right)}, \end{aligned}$$

где δX – погрешности определения соответствующих параметров: $\delta h \leq 0,1$ мм – определяется погрешностью измерения размера кюветы; $\delta V/V \approx \delta W/W \leq 0,1$ – определяется погрешностью оценки акустических импедансов образца и преобразователя; $\delta|K_{DIF}|/|K_{DIF}| \leq 0,05$ и $\delta\Psi_{DIF} \leq 0,01$ рад – погрешности выражения (4) при выполнении условий: $h \geq a^2 f l (2C)$; $\Delta a/a \leq 0,05$; $\Delta C/C \leq 0,1$ (в нашем случае эти условия выполнены для всех экспериментов); $\delta t \approx 0,02$ мкс – определяется точностью измерения временных интервалов (для импульсов U_{10} , U_{20} и U_1 она примерно одинакова).

Обработка экспериментальных данных для всех образцов и проведение численных экспериментов с известными АЧХ, ФЧХ и заданным уровнем шума (или наложений переотражений от стенок кюветы) $k_N = U_N/U$ позволили оценить погрешности вычисления АЧХ и ФЧХ анализируемых сигналов: $\delta|U_{10}|/|U_{10}| \leq 0,1$ и $\delta\varphi_{10} \leq 0,1$ рад – в диапазоне частот от 0,1 до 3 МГц; $\delta|U_{20}|/|U_{20}| \approx 0,05 + k_{N|20}/(1 - k_{N|20})$, $\delta|U_1|/|U_1| \approx 0,05 + k_{N|1}/(1 - k_{N|1})$ (сигналы U_{20} и U_1 являются результатом сложения полезного сигнала и шума U_N); $\delta\varphi_{20} \approx 0,05 + \arctg[k_{N|20}/(1 - k_{N|20})]$, $\delta\varphi_1 \approx 0,05 + \arctg[k_{N|1}/(1 - k_{N|1})]$.

Для групповой скорости распространения сдвиговых волн C_S (диапазон частот от 0,1 до 2 МГц) и погрешности ее определения имеют следующий вид:

$$C_S = \frac{h}{t_S}; \quad \frac{\delta C_S}{C_S} = \sqrt{\left(\frac{\delta h}{h}\right)^2 + \left(\frac{\delta t_S}{t_S}\right)^2 + \left(\frac{\delta C_P}{C_S}\right)^2} \quad (9)$$

где δt_S – погрешность определения времени прихода сдвиговой составляющей УЗ импульса (не превышает 0,05 мкс); δC_P – погрешность, определяемая размерами кюветы и преобразователей (по данным работы [6] в наших экспериментах она не превышала 50 м/с).

На рис. 3 показаны зависимости погрешностей $\delta\alpha$ и $\delta C/C$ от уровня шума k_N при $\alpha_0 \leq 1000$ дБ/м.

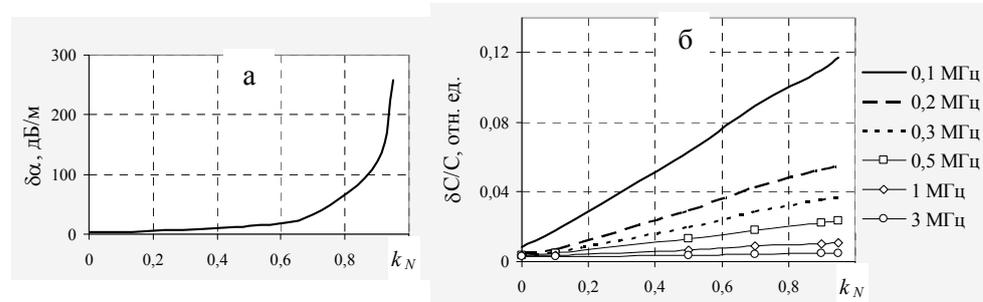


Рис. 3. Зависимость погрешности измерения от уровня шума: а – коэффициент затухания; б – скорость распространения на различных частотах

На рис. 3, а видно, что при $k_N \leq 0,6$ погрешность определения коэффициента затухания не превышает 20 дБ/м, при $k_N > 0,6$ – погрешность начинает резко возрастать и при $k_N = 0,9$ достигает 120 дБ/м. Для скорости (рис. 2, б), на частотах выше 0,5 МГц, при $k_N \leq 0,95$ погрешность не превышает 2 %. На частотах ниже 0,5 МГц влияние шума (наложений) проявляется при любом уровне и достигает 12 % при $k_N = 0,95$ на частоте 0,1 МГц.

Для проведения экспериментов мы выбрали 4 образца: образец 1 – эпоксидная смола + 15 % ПЭПа; образец 2 – эпоксидная смола + 12 % ПЭПа; образец 3 – эпоксидная смола + 10 % ПЭПа; образец 4 – эпоксидная смола, выдержанная при температуре -16°C в течение 3 суток и находящаяся в «льдообразном» состоянии. Для всех образцов измерения проводились с интервалом 2 ÷ 5 мин от начала до окончания процесса отверждения (для образца 4 – до перехода в равновесное жидкое состояние). Для образцов 1–3 измерения проводились при температуре $(20 \pm 1)^{\circ}\text{C}$. Данные, полученные в результате экспериментов, были обработаны по описанной выше методике.

На рис. 4 приведены форма УЗ импульсов и дисперсионные характеристики образцов, находящихся на заключительных стадиях процесса (для образца 4 – начальная стадия). Формы импульсов для образцов 1–4 близки (рис. 4, а, г), так же и для образцов 2–3 (рис. 4, б, в).

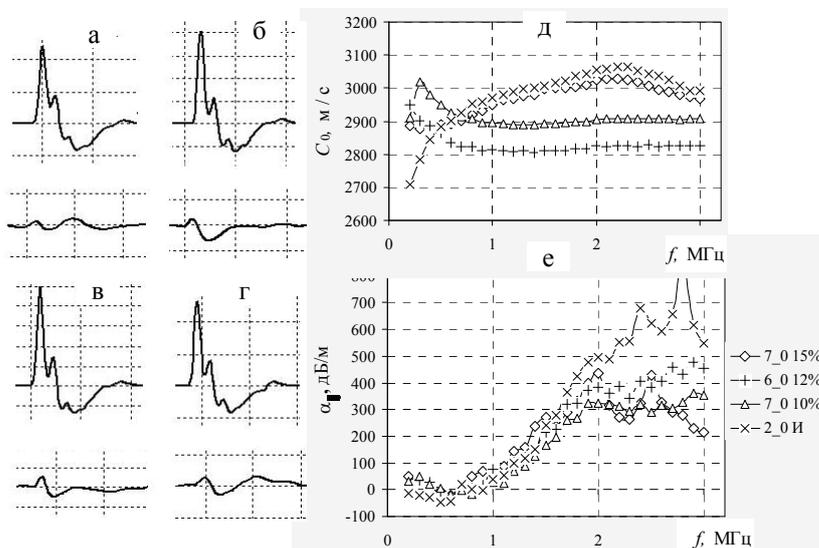


Рис. 4. Форма УЗ импульсов (а–г, сверху первый пришедший, внизу переотраженный) и их дисперсионные характеристики (д, е). 7_0 15 % – образец 1, трое суток от начала процесса (полная полимеризация); 6_0 12 % – образец 2, полтора суток от начала процесса; 7_0 10 % – образец 3, трое суток от начала процесса; 2_0 И – образец 4, начало процесса

На рис. 4, д, е видно, что похожи и их дисперсионные характеристики (частота выше 0,3 МГц).

На рис. 4, е для всех образцов достаточно четко выделяются области наложения переотражений от стенок кюветы (частота от 0,1 до 1 МГц) и шумовой составляющей сигнала (частота более 2 МГц), причем для наложений $k_N \approx 0,5 \div 0,6$, а для «шума» $k_N > 0,7$. В интервале частот от 1 до 2 МГц для всех образцов $k_N < 0,5$ и погрешность измерения коэффициента затухания менее 20 дБ/м.

По данным для этих образцов был определен также параметр a , характеризующий коэффициент затухания (a определяется методом наименьших квадратов по значениям α для диапазона частот 1 ÷ 2 МГц, полагаем, что $\alpha = af^2$). Значения a (размерность, дБ·с²/м): образец 1 – $(1,05 \pm 0,05) \cdot 10^{10}$; образец 1 – $(1,05 \pm 0,05) \cdot 10^{10}$; образец 2 – $(0,93 \pm 0,05) \cdot 10^{10}$; образец 3 – $(0,76 \pm 0,05) \cdot 10^{10}$; образец 4 – $(1,13 \pm 0,05) \cdot 10^{10}$.

На основании данных рис. 3, б можно оценить погрешности измерения скорости (рис. 4, д): на частоте 0,1 МГц – до 200 м/с; на частоте 0,2 МГц – до 100 м/с; на частоте 0,5 МГц – до 30 м/с; в диапазоне частот 1 ÷ 2 МГц – менее 15 м/с; в диапазоне частот 2 ÷ 3 МГц – до 30 м/с.

Значения групповой скорости звука C_{LM} , измеренные по переднему фронту, достаточно хорошо совпадают со значениями фазовой скорости для диапазона частот 2 ÷ 2,5 МГц, т. е. в формировании первой полуволны сигнала

ла основную роль играют «высокие» частоты. В пределах погрешности отношения C_{LM}/C_S для всех образцов совпадают и находятся в интервале от 2,12 для образца 2 до 2,17 для образца 1.

При определении параметра $\Delta\alpha(f)$ составляющая погрешности, обусловленная переотражениями от стенок кюветы, отсутствует вследствие исключения наложений и погрешность на «высоких» частотах определяется в основном наложением шума. При $k_N < 0,5$ $\delta(\Delta\alpha) < 20$ дБ/м, а при $k_N = 0,9$ достигает 120 дБ/м. Для скорости погрешность определяется, в основном, погрешностью определения C_0 .

На рис. 5 приведены временные зависимости параметров $\Delta\alpha$, C и C_S для всех образцов на различных частотах.

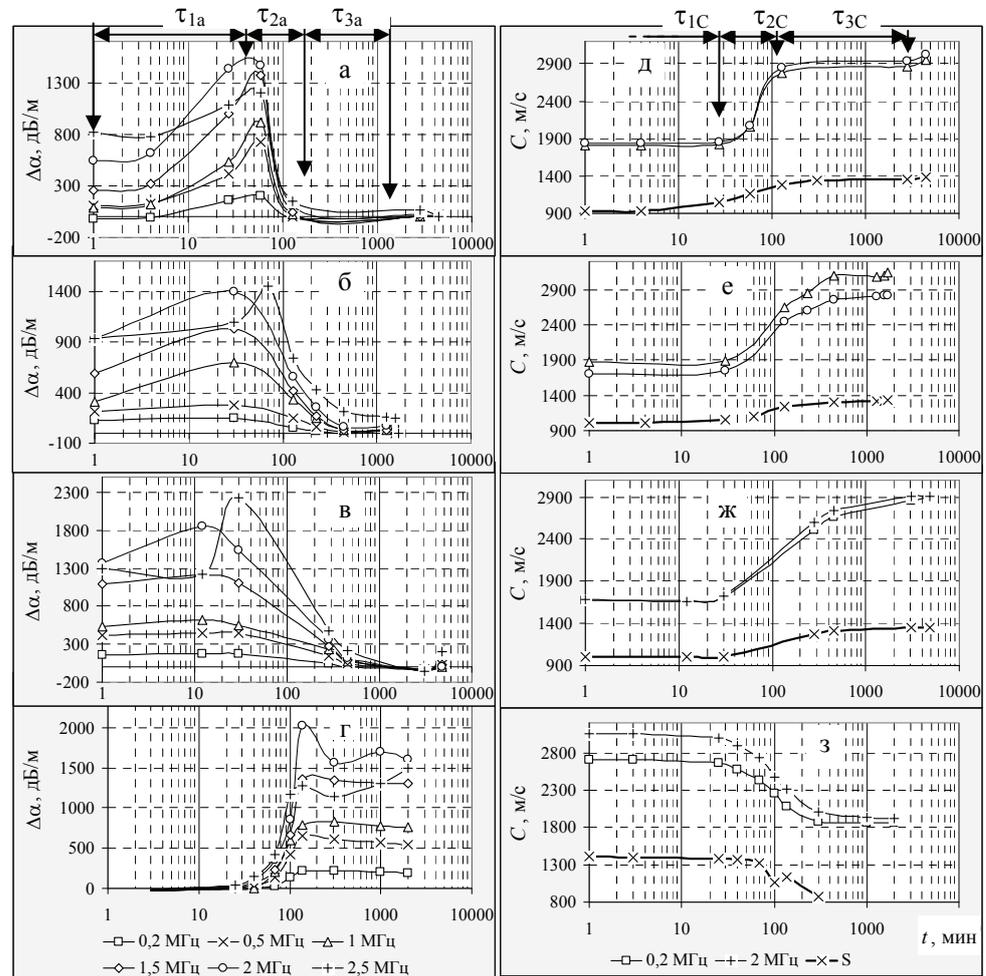


Рис. 5. Зависимость параметра $\Delta\alpha$, C и C_S от времени. а, д – образец 1; б, е – образец 2; в, ж – образец 3; г, з – образец 4. S – сдвиговая волна



При $f \geq 2$ МГц (рис. 5) для параметра $\Delta\alpha$ ($\Delta\alpha > 2000$) могут наблюдаться искажения, обусловленные наложениями шумового сигнала.

На рис. 6, а, в приведены временные зависимости параметров a ($a = a_0 + \Delta a$), C_{LM}/C_S для всех образцов на различных частотах. Параметр a определялся по диапазону частот, для которого погрешностью, обусловленной наложением шума (высокие частоты) можно пренебречь. На рис. 6, б, г показаны температурные зависимости параметров $\Delta\alpha$ и C для образца 4.

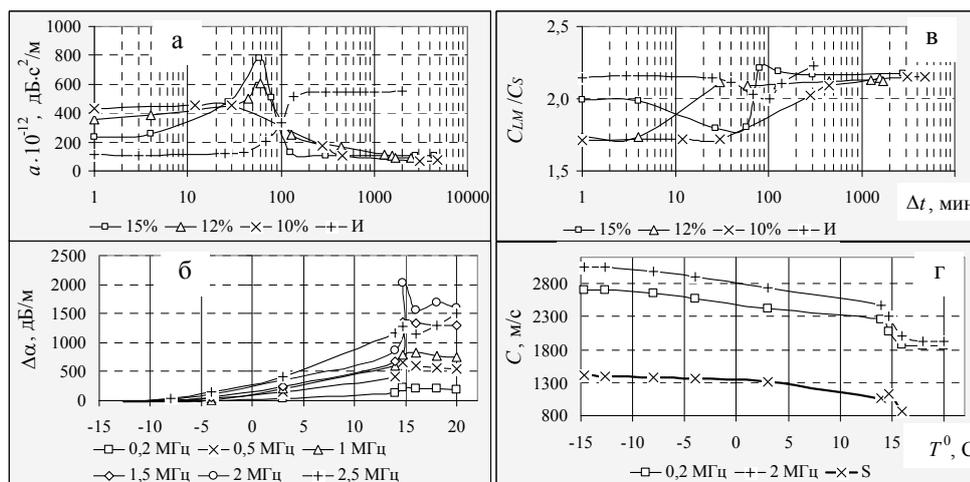


Рис. 6. Зависимость параметров a и C_{LM}/C_S от времени (а, в) и $\Delta\alpha$ и C от температуры (б, г)

Следует отметить особый вид зависимости параметра C от $\lg(\Delta t)$ для образца 3 (рис. 5, ж). Она имеет линейный вид со своим коэффициентом для всех выделенных выше интервалов.

На рис. 6, а можно отметить область в интервале $90 \div 100$ мин, в которой параметр a для всех образцов принимает примерно одинаковое значение. Отношения C_{LM}/C_S для образцов 1–3 в начале процесса несколько меньше, чем в конце (для образца 4 – наоборот), однако других особых закономерностей не наблюдается (рис. 6, в).

Для образца 4 (рис. 6, б, в) в интервале температур от -15 до -11°C модуль этого коэффициента меньше, чем для интервала $-11 \div 15^\circ\text{C}$. В интервале от 14 до 16°C наблюдается достаточно резкое увеличение параметра $\Delta\alpha$ и снижение параметра C . При температурах выше 16°C происходит переход $\Delta\alpha$ и C к стационарным значениям. Таким образом, при переходе из стеклообразного состояния в жидкое в эпоксидной смоле наблюдаются два фазовых перехода. Эти переходы отличаются от процессов, происходящих при отверждении в процессе полимеризации.

Качественно характер полученных результатов можно трактовать следующим образом. При добавлении ПЭПа в смолу происходит уменьшение

вязкости состава примерно пропорционально концентрации, этим и объясняется уменьшение коэффициента затухания для образцов 2, 3 по сравнению с образцом 1, при временах менее 30 мин (рис. 6 д). Далее, вследствие большей концентрации ПЭПа скорость образования новых связей становится больше и переходы в вязкоупругое состояние, а затем и в упругое происходят быстрее для образца 1. Малое содержание ПЭПа в образце 3 приводит к тому, что процесс перехода в упругое состояние затягивается до 1000 минут и более.

Следует отметить, что приведенные выше особенности протекания процесса полимеризации не были выявленные при обработке тех же исходных данных по традиционной методике, основанной на контроле только времени прихода и амплитуды УЗ импульса.

В заключение следует отметить, что полученные результаты показывают целесообразность анализа дисперсионных характеристик при исследовании акустическими методами различных динамических процессов.

Библиографические ссылки

1. Мищенко С. В., Дмитриев А. О., Дмитриев С. О. Информационно-измерительная система для определения реологических характеристик термореактивных связующих в процессе отверждения композитных материалов // Информационные процессы и управление. Тамбов, 2006.
2. Малкин А. Я., Аскадский А. А., Коврига В. В. Методы измерения механических свойств полимеров. М., 1978.
3. Перепечко И. И. Акустические методы исследования полимеров. М., 1973.
4. Исследование процесса полимеризации эпоксидных смол акустическими методами / А. И. Кондратьев, В. И. Римлянд, А. В. Казарбин, В. А. Иванов // Акустический журнал. 1995. Т. 41. № 3.
5. Гитис М. Б., Химуни А. С. О поправках на дифракцию при измерениях коэффициента затухания и скорости звука // Акустический журнал. 1968. Т. № 3.
6. Кондратьев А. И. Прецизионные методы и средства измерения акустических величин твердых сред (в двух частях). Хабаровск, 2006.
7. Аскадский А. А. Химическое строение и физические свойства полимеров. М., 1983.
8. Бартенев Г. М., Френкель С. Я. Физика полимеров. Л., 1990.