

УДК 534.8

ВЫБОР ТЕМПЕРАТУРНО-ЧАСТОТНЫХ ПАРАМЕТРОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛАСТОМЕРОВ

© 2020 г. С. Г. Тихомиров^{1, *}, С. Л. Подвальный², В. И. Ряжских²,
А. А. Хвостов^{2, 3}, А. В. Карманов²

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Воронежский государственный университет инженерных технологий”, Воронеж, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Воронежский государственный технический университет”, Воронеж, Россия

³Военно-учебно-научный центр военно-воздушных сил “Военно-воздушная академия
имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина”, Воронеж, Россия

*E-mail: tikhomirov_57@mail.ru

Поступила в редакцию 18.06.2020 г.

После доработки 10.07.2020 г.

Принята к публикации 27.07.2020 г.

Рассмотрены методы косвенного ультразвукового контроля показателей качества эластомеров: предела прочности при разрыве и вязкости по Муни с учетом разработанной процедуры минимизации погрешности измерений. Ультразвуковым методом исследованы образцы каучука СКС-30. Определены оптимальные температурно-частотные условия измерений показателей.

DOI: 10.31857/S0367676520110307

Одним из перспективных методов оперативного измерения показателей качества полимеров является ультразвуковой (УЗ) метод. Однако в случае одновременного измерения нескольких показателей качества его практическое применение затруднено, так как возникает неоднозначность трактовки результатов при различных условиях измерений (частотах и температурах) [1]. При этом следует учитывать, что для полимеров выполняется принцип температурно-временной суперпозиции [2]. Так, уменьшение температуры на 5–7°C соответствует увеличению частоты внешнего воздействия на порядок [2]. Это связано, прежде всего, с особенностями строения полимерных цепей, которое обуславливает специфическое течение процессов отклика полимера на различные виды внешних воздействий, в том числе тепловых.

С учетом положений феноменологической релаксационной теории выявлено, что каждой структурообразующей единице объема полимера соответствует свой диапазон частот и времен релаксации в участке его релаксационного спектра [2, 3]. Кроме того, еще одной особенностью является тот факт, что этот участок смещается по оси ча-

стот (времен релаксации) с изменением температуры исследуемого образца.

Ранее предложены способы УЗ контроля таких показателей качества эластомеров, как предел прочности при разрыве σ_p и его вязкость по Муни M_h [5, 6]. Отмечено, что при изменении частоты и температуры при измерениях возникают существенные погрешности косвенной оценки этих показателей качества УЗ методом. В связи с этим для решения задачи косвенного контроля показателей качества разработана процедура минимизации погрешности измерений. Дискретный набор частот и температур исследований позволяет сформулировать задачу поиска оптимальной частоты как минимизацию критерия S_{X_j} , представляющего собой линейную суперпозицию квадрата ошибки измерения $\varepsilon^2 = (X_j^{\text{расч}} - X_j^{\text{эксп}})^2$ и чувствительности ξ_{X_j} вида

$$S_{X_j} = A_1 \varepsilon_{X_j}^2(\omega_i, T_i) + A_2 \xi_{X_j}^{-2} \times \times (\omega_i, T_i) \xrightarrow{\omega_i, T_i} \min, \quad j = 1, 2, \quad (1)$$

где $X = (M_h, \sigma_p)$ – вектор измеряемых показателей качества; A_1, A_2 – весовые коэффициенты; ω_i, T_i – частота УЗ воздействия и температура при i -ом

Таблица 1. Показатели качества образцов каучука СКС-30

№	Марка	Партия	σ_p , МПа	Mh , усл. ед.
1	СКС-30 АРКМ-15	1.1	28.4	50
2	СКС-30 АРКМ-15	1.2	25.9	46
3	СКС-30 АРКМ-15	1.3	26.2	51
4	СКС-30 АРКМ-27	2.1	22.4	51
5	СКС-30 АРКМ-27	2.2	21.9	49
6	СКС-30 АРКМ-27	2.3	22.3	52
7	СКС-30 АРКПН	3.1	28.8	53
8	СКС-30 АРКПН	3.2	28.2	52
9	СКС-30 АРКПН	3.3	28.5	50

измерении; ξ_{X_j} – функция чувствительности, характеризующая чувствительность α к изменению X_j образца; m – количество точек измерения;

$$\xi_{X_j} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^m \frac{\partial X_j(\alpha_i, c_i)}{\partial \alpha} \Big|_{\alpha_i} \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^m \frac{\partial X_j(\alpha_i, c_i)}{\partial c} \Big|_{c_i} \right)^2}, \quad (2)$$

α , c – коэффициент затухания и скорость УЗ, соответственно. Оценка чувствительности осуществлялась по отношению изменения X_j к изменению измеряемой величины [4].

Для поиска оптимальных условий измерений проведены экспериментальные исследования девяти образцов каучука СКС-30 трех марок: СКС-30АРКМ-15, СКС-30АРКМ-27, СКС-30АРКПН и трех партий (табл. 1) Проведение экспериментальных исследований заключалось в “прозвучивании” образцов эластомеров с помощью пьезокварцевых преобразователей, возбуждаемых генератором, регистрации прошедших через образец сигналов и расчете скорости звука c в образце и коэффициента затухания α (рис. 1).

Для излучения и приема УЗ сигнала использовались ультразвуковые пьезоэлектрические преобразователи с резонансными частотами 0.6, 1.25, 2.5 МГц. Образцы выдерживались в термостате при температурах 293 и 373 К. При этом для каждого образца лабораторными методами проводилось измерение σ_p с использованием разрывной машины РМИ-250 (ГОСТ ISO 37-2013) при температуре 293 К и Mh с использованием вискозиметра Муни ВМ-1 (ГОСТ 10722-76) при температуре 373 К и частоте вращения ротора 2 об./мин (табл. 1).

Оценка показателей качества осуществлялась по формулам (3), (4), выбор структуры которых обоснован в [5, 6]:

$$Mh = Z_1 \left\{ \frac{\rho \alpha c^3}{\omega^2 [1 + (\alpha c / \omega)^2]^2} \right\}^{Z_2}, \quad (3)$$

$$\sigma_p = P \left\{ \frac{\rho c^2 \omega^2}{\alpha h} \frac{\omega^2 - \alpha^2 c^2}{(\omega^2 + \alpha^2 c^2)^2} \right\}^p, \quad (4)$$

где Z_1, Z_2, P, p – параметры, определяемые по экспериментальным данным [7], исходя из минимизации среднеквадратичного критерия отклоне-

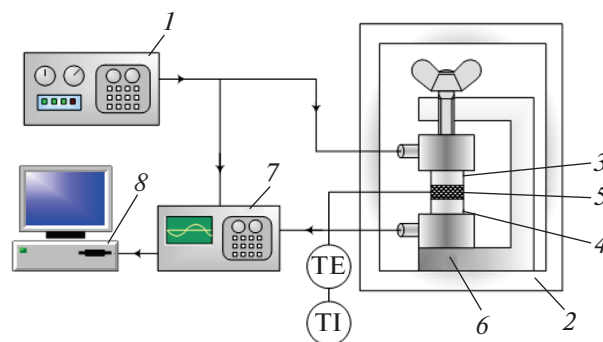


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – генератор; 2 – термостат; 3 – пьезопреобразователь (излучатель); 4 – пьезопреобразователь (приемник); 5 – образец полимера; 6 – струбцина; 7 – двухканальный цифровой осциллограф; 8 – ЭВМ.

Таблица 2. Погрешности и чувствительность расчетов по (3) для каучука СКС-30

Частота измерения, МГц	0.6	0.6	1.25	2.5
Температура измерения, К	373	293	293	293
Максимальная ошибка, %	1.933	2.465	9.356	9.318
Средняя ошибка, %	0.952	1.438	4.373	3.518
Относительная чувствительность	0.159	0.192	0.033	0.017

ния Mh , σ_p измеренных эталонным и УЗ методом, ρ – плотность полимера.

В табл. 2 и 3 приведены погрешности расчетов по формулам (3), (4) и чувствительность измерений

при различных частотах и температурах измерения.

Графики $\sigma_p \left(\frac{c^2}{\alpha h} \right)$ и $Mh \left(\frac{\alpha c^3}{h} \right)$ расчетных и экспериментальных данных представлены на рис. 2 и 3.

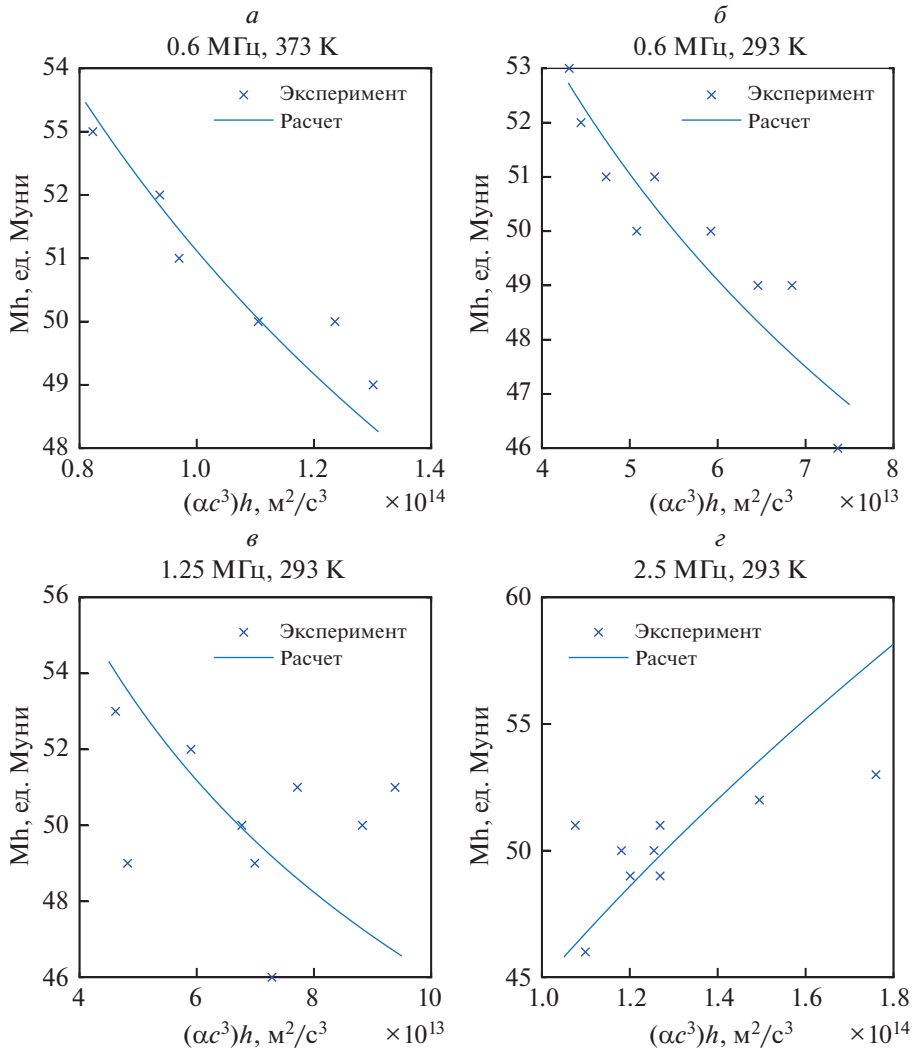


Рис. 2. Рассчитанные по формуле (3) “—” и экспериментальные (×) значения вязкости по Муни для образцов каучука СКС-30. Условия эксперимента (а) 0.6 МГц, 373 К, (б) 0.6 МГц, 293 К, (в) 1.25 МГц, 293 К, (г) 2.5 МГц, 293 К.

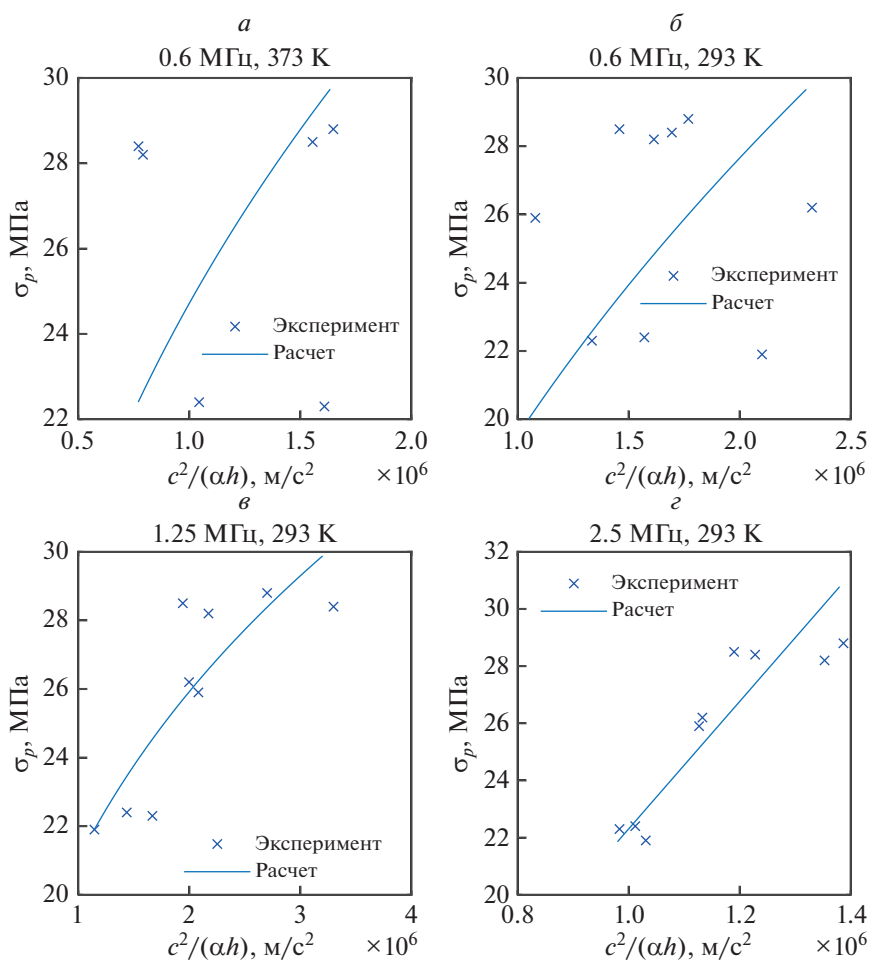


Рис. 3. Рассчитанные по формуле (4) “—” и экспериментальные (×) значения предела прочности при разрыве для образцов каучука СКС-30. Условия эксперимента (а) 0.6 МГц, 373 К, (б) 0.6 МГц, 293 К, (в) 1.25 МГц, 293 К, (г) 2.5 МГц, 293 К.

Анализ экспериментальных данных (табл. 2 и 3) показал, что минимальная погрешность измерений обеспечивается при следующих условиях: для оценки M_h – частота 0.6 МГц и температура

373 К, для оценки σ_p – частота 2.5 МГц и температура 293 К.

Разработанная методика может быть использована для оценки показателей качества

Таблица 3. Погрешности и чувствительность расчетов по (4) для каучука СКС-30

Частота измерения, МГц	0.6	0.6	1.25	2.5
Температура измерения, К	373	293	293	293
Максимальная относительная погрешность, %	28.42	31.80	21.28	7.22
Средняя относительная погрешность, %	14.04	13.99	8.65	4.28
Относительная чувствительность	0.037	0.017	0.287	0.816

полимеров на измерительных установках, реализующих различные температурно-частотные режимы.

Работа выполнена в рамках гранта программы “У.М.Н.И.К-2018”, г/к № 14279ГУ/2019 от 10.07.2019 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Li Y.Y., Chang J.J., Huang L., Tang Y.H.* // *Materials*. 2019. V. 12. № 18. Art. № 2948.
2. *Малкин А.Я., Исаев А.И.* Реология: концепции, методы приложения. СПб.: Профессия, 2010. 557 с.
3. *Properties and behavior of polymers.* Wiley, 2012. 1616 p.
4. *Радкевич Я.М., Схиртладзе А.Г.* Метрология, стандартизация и сертификация. Часть 1. Метрология. М.: Юрайт, 2018. 235 с.
5. *Битюков В.К., Тихомиров С.Г., Хвостов А.А. и др.* Способ ультразвукового контроля вязкости по Муни полимеров. Пат. РФ № 2319956, 2006.
6. *Битюков В.К., Тихомиров С.Г., Хвостов А.А. и др.* Способ ультразвукового контроля предела прочности при разрыве полимеров. Пат. РФ № 2319957, 2006.
7. *Битюков В.К., Тихомиров С.Г., Хвостов А.А., Зайчиков М.А.* // *Мехатроника, автоматиз., упр.* 2007. № 7. С. 55.