

Дырда В.И., д-р техн. наук, профессор,
Агальцов Г.Н., инженер
Новикова А.В., магистр
Калганков Е.В., аспирант,
Цаниди И.Н., магистр
(ИГТМ НАН Украины),
Дорохов М.А., аспирант
(ИФНТУНГ)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАПОЛНЕННЫХ РЕЗИН

Дирда В.І., д-р техн. наук, професор
Агальцов Г.М., інженер
Новікова А.В., магістр
Калганков Є.В., аспірант
Цаніді І.М., магістр
(ІГТМ НАН України),
Дорохов М.А., аспірант
(ІФНТУНГ)

ВИЗНАЧЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НАПОВНЕНИХ ГУМ

Dyrda V.I., D. Sc. (Tech.), Professor,
Agaltsov G.N., Engineer
Novikova A.V., M. Sc. (Tech.)
Kalgankov Ye.V., Ph. D. Student,
Tsanidy I.N., M. Sc. (Tech.)
(IGTM NAS of Ukraine),
Dorokhov M.A., Ph. D. Student
(IFNUOG)

DETERMINATION OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE FILLED RUBBER

Аннотация. Рассмотрено проявление эффектов физической нелинейности материала в зависимости от степени наполнения резин. Установлено, что проводить расчёт механических характеристик наполненных резин целесообразно по петлям гистерезиса и по сдвигу фаз синусоидальных кривых «деформация-нагрузка». Экспериментальные исследования подтверждают зависимость механических характеристик резин от степени их наполнения техническим углеродом.

Установлено, что при наполнении резин менее 20 масс.ч. рост модулей сдвига выражен слабо и носит линейный характер, а при наполнении резин более 20 масс.ч. рост становится нелинейным и более сильным. Для таких наполненных резин наиболее целесообразно применять ядро Работнова.

Для получения реологических характеристик наполненных резин, необходимо экспериментально получить петли гистерезиса и мгновенные модули, после математической обработки экспериментальных результатов определяются основные реологические характеристики наполненных резин.

Ключевые слова: резина, деформация, диссипация, наполненные резины, сильно наполненные резины, нелинейность, механика эластомеров, ядро Работнова, реология

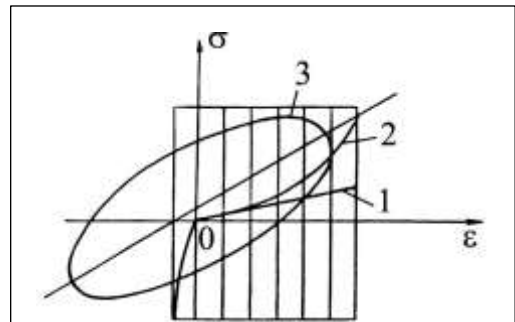
С увеличением наполнения резин техническим углеродом всё отчетливее проявляются эффекты физической нелинейности материала в форме зависимости модулей (податливостей) и тангенса угла потерь от амплитуды деформации (напряжения). Они весьма существенны уже для средненаполненных резин на основе НК и СКИ-3. В частности, для этих резин в диапазоне амплитуд деформаций от 0,01 до 10 % механические характеристики изменяются более чем вдвое, что свидетельствует о существенности физической нелинейности.

Одна из особенностей расчёта деталей из сильнонаполненных резин состоит в том, что зависимость напряжение – деформации для эластомера существенно отличается от линейного закона Гука, при циклической деформации таких резин нелинейность хорошо

определяется по петлям гистерезиса и по сдвигу фаз синусоидальных кривых деформация – нагрузка, регистрируемых известными способами [1].

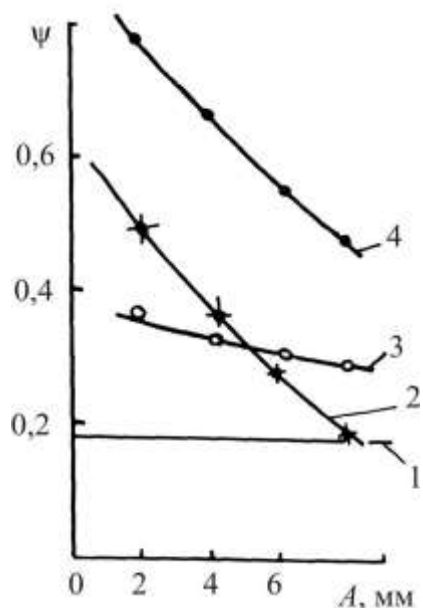
Линейный участок экспериментальной кривой 2 (см. рис. 1), зависит от степени наполнения эластомера, качества смеси; для ненаполненных и слабонаполненных резин он сохраняется в некоторых случаях до 50, а для сильнонаполненных до 1...10 %. Этот факт говорит о том, что использование закона Гука при расчёте высокоэластичных конструкций, которые обычно изготавливаются из сильнонаполненных эластомеров, требует определённой осторожности, так как может привести к грубым ошибкам.

Проведенные ранее исследования нелинейных эффектов в резинах с различным наполнением техническим углеродом показывают, что на динамические характеристики резиновых деталей значительное влияние оказывает степень наполнения техническим углеродом исходного материала. Для резин с малым наполнением (5 масс.ч.) (см. табл. 1, рис. 2, рис. 3) коэффициент диссипации энергии и динамический модуль практически не зависят от амплитуды деформации и статического поджатия, сохраняя некоторое постоянное значение. Указанные зависимости становятся заметными для резин со степенью наполнения 15-20 масс.ч. Для исследуемых резин при наполнении 50 масс.ч. и более изменение динамических характеристик может составлять примерно 50 % и этот факт нельзя не учитывать при расчётах и проектировании конструкций.



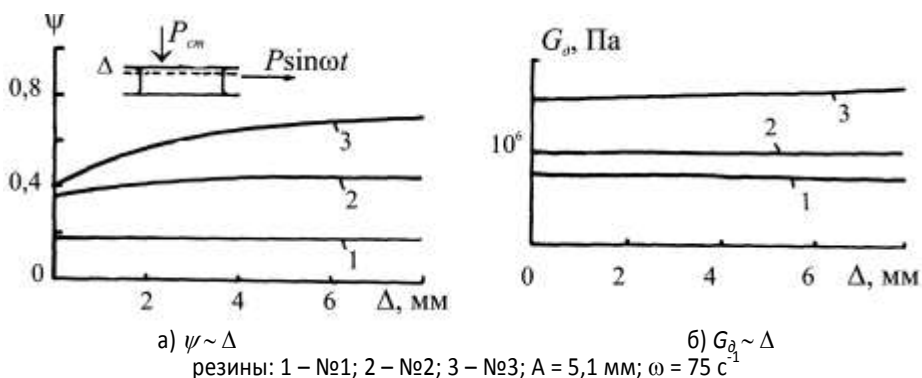
1 – закон Гука; 2 – по данным экспериментов; 3 – петля гистерезиса

Рисунок 1 – Зависимости «напряжение – деформация» для эластомеров



резины: 1 – №1; 2 – №5; 3 – №2; 4 – №1

Рисунок 2 – Зависимость коэффициента диссипации энергии ψ от амплитуды деформации A для различных резин



а) $\psi \sim \Delta$ б) $G_d \sim \Delta$
 резины: 1 – №1; 2 – №2; 3 – №3; $A = 5,1 \text{ мм}$; $\omega = 75 \text{ с}^{-1}$

Рис. 3 – Зависимость динамических характеристик резиновых деталей от степени статического поджатия Δ

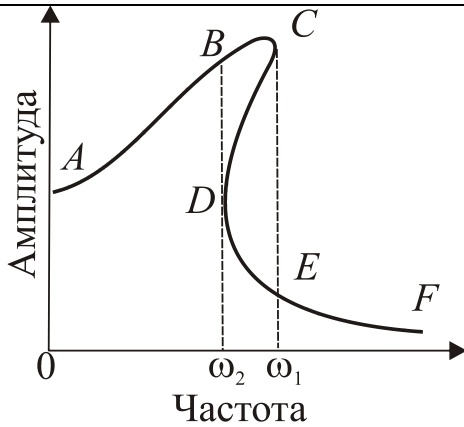


Рисунок 4 – Зависимость амплитуды от частоты ω при нелинейных свойствах резин в области резонансных частот

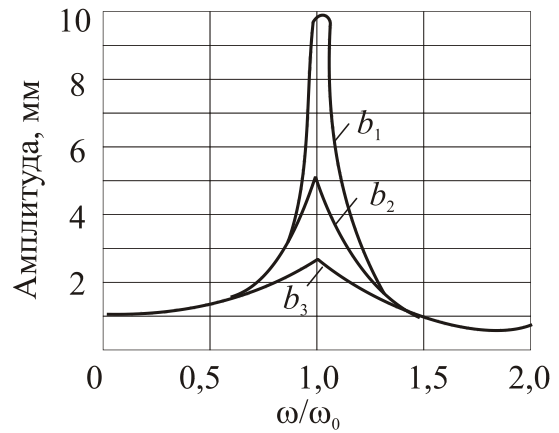


Рисунок 5 – Резонансные кривые для линейных систем

Таблица 1 – Реологические характеристики резин (α – фиксировано)

№ резины	Технический углерод, масс.ч.	G_0 , МПа	G_∞ , МПа	ψ	α	β	λ
1	5	0,72	0,51	0,17	-0,60	0,91	0,35
2	15	1,40	0,90	0,25	-0,60	1,61	0,36
3	30	1,60	0,90	0,40	-0,60	2,85	0,44
4	45	1,76	0,74	0,31	-0,60	1,06	0,58
5	65	2,20	1,51	0,60	-0,60	1,82	0,31
6	75	2,60	1,96	0,71	-0,60	1,96	0,24

Нелинейность деформационных свойств резин проявляется и в области резонансных частот гармонического нагружения, близких к собственной частоте колебаний системы. Нелинейность выражается в аномальной (со скачком) зависимости амплитуды u_0 перемещения вынужденных колебаний от частоты ω (рис. 4) наблюдаемой вместо симметричных относительно максимума кривых для линейных систем (см. рис. 5).

Графически связь между напряжением σ и деформацией ε при гармоническом режиме в этом случае изобразится замкнутой эллиптической петлёй, площадь которой пропорциональна механическим потерям цикла и поэтому носит название гистерезисной петли (рис. 6).

Амплитудно-зависимые модули G' и G'' , проще всего измерять, если в образце реализовано однородное деформированное состояние.

В настоящее время практически отсутствуют данные об амплитудной зависимости свойств при сложном напряжённом состоянии или полигармоническом нагружении, необходимые для расчёта реальных деталей.

Параметры квазистатических петель гистерезиса целесообразно использовать для определения реологических параметров в случае геометрической нелинейности

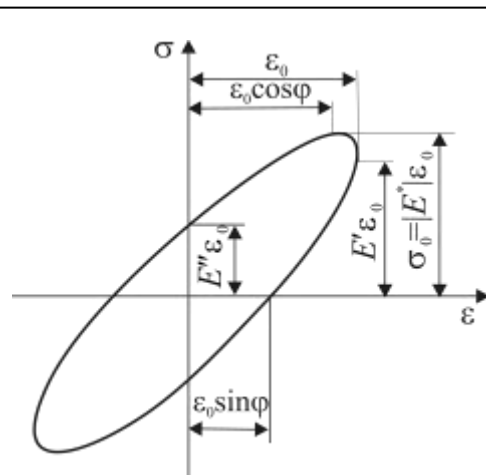


Рисунок 6 – Петля динамического гистерезиса и её параметры

и в «зоне подобия» для нелинейно наследственных материалов.

Чётко выраженная физическая нелинейность наполненных резин, возрастающая по мере увеличения наполнения резины техническим углеродом, значительно усложняет математическое описание зависимости «деформация – нагрузка» для деталей, выполненных из саженаполненных резин.

Как указывается в [2], технические резины при комнатных и повышенных температурах соответствуют области высокоэластического состояния, в которой практически пренебрежимо мала зависимость E' и E'' от температуры, однако хорошо выражена нелинейность свойств как физическая (нелинейные соотношения $\sigma - \varepsilon$), так и геометрическая (большие неоднородные деформации). В области малых деформаций, реализуемых при эксплуатации многих видов, наиболее широко применяемых резиновых изделий, для стационарных режимов можно пренебречь геометрической, но не физической нелинейностью. Влияние величины и вида деформации оказывается существенным, поэтому найденные в линейном приближении характеристики являются некоторыми эффективными величинами. Их применение для обработки экспериментальных результатов полезно как при качественном рассмотрении общих закономерностей механического поведения резин, так и для использования при решениях нелинейных задач динамического нагружения, например, методом последовательных приближений (в качестве первого приближения для решения).

Модели учёта физической нелинейности наполненных резин. В настоящее время все большее применение находят материалы с ярко выраженными вязкоупругими свойствами (наполненные техническим углеродом резины, композиты на основе полимерной матрицы, чистые полимеры и др.). В связи с этим для практики термомеханического анализа элементов конструкций из таких материалов возникает необходимость комплексного описания основных особенностей нелинейного поведения таких материалов при различных режимах нагружения и построения моделей, идентифицируемых при совместном использовании данных доступного для практической реализации эксперимента при квазистатических и динамических испытаниях.

При построении определяющих уравнений $\sigma - \varepsilon$ для описания деформации твёрдых тел, наиболее простым и перспективным подходом, является использование принципа наследственности. В общем виде нелинейное уравнение было написано ещё Вольтерра и представляет собой бесконечный ряд кратных интегралов вида (1)

$$E \cdot \varepsilon = \sigma + \int_{-\infty}^t K_1(t-\tau) \sigma(\tau) d\tau + \int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^t K_2(t-\tau) \sigma(\tau_1) \sigma(\tau_2) d\tau_1 d\tau_2 + \\ + \int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^t K_3(t-\tau) \sigma(\tau_1) \sigma(\tau_2) \sigma(\tau_3) d\tau_1 d\tau_2 d\tau_3 + \dots, \quad (1)$$

где E – модуль упругости;

t – время наблюдения;

τ – время, предшествующее моменту наблюдения;

$K(t-\tau)$ – ядро релаксации.

Выбирая достаточно большое число членов этого ряда, и определив каким-либо образом ядра, можно описать любой процесс деформирования с любой точностью. Развитию этого направления посвящено много работ. Основные усилия направляются на введение дополнительных гипотез: несжимаемость, одинаковое поведение при растяжении и сжатии и пр. Это даёт возможность упростить ядра и сократить число членов ряда. Однако очевидно, что использование кратных интегралов и определение большого числа ядер

наследственности весьма затруднительно, поэтому работы в этом направлении, как правило, являются теоретическими.

Для более упрощённого описания физической нелинейности резин используются зависимости, представляющие собой частные случаи уравнения (1) и содержащие лишь один интеграл. Такие попытки основаны на нелинейном принципе суперпозиции, обобщающем известный принцип Больцмана-Вольтерра. Согласно этому принципу

$$d\varepsilon(t) = \sigma(\tau) f(t - \tau) d\tau, \quad (2)$$

где $f(t - \tau)$ – ядро ползучести.

Для физически нелинейного члена будет

$$d\varepsilon(t) = f[\sigma(\tau), t - \tau] d\tau. \quad (3)$$

Выражение (3) известно как принцип Больцмана-Персо, а нелинейное уравнение, ему соответствующее, имеет вид

$$\varepsilon(t) = a\sigma + \int_0^t f[\sigma(\tau), t - \tau].$$

В практических расчётах чаще используются приближенные варианты уравнений нелинейной наследственности, предложенные:

Ю.Н. Работновым

$$\varphi[\varepsilon(t)] = \sigma(\tau) + \int_0^t K(t - \tau) \sigma(\tau) d\tau \quad (4)$$

а также М.А. Колтуновым, Лидерманом, Розовским и другими.

Существенен вопрос о выборе ядра наследственности. Известно, что наиболее подходящими являются простые ядра со слабой особенностью в нуле, но они, чаще всего, хорошо описывают начальные участки кривых ползучести (или релаксации), но оказываются непригодными при больших временах. Это происходит потому, что с течением времени все сильнее оказывается нелинейность.

Наиболее широкое применение в механике эластомеров получили:

- ядро Ю.Н. Работнова – дробно-экспоненциальная функция $\mathcal{E}_\alpha(-\beta, t - \tau)$ вида

$$\mathcal{E}_\alpha(-\beta, t - \tau) = \chi(t - \tau)^\alpha \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-\beta)^n (t - \tau)^{n(1+\alpha)}}{\Gamma[(n+1)(1+\alpha)]}, \quad (5)$$

$$(-1 < \alpha < 0, \beta > 0),$$

где $-1 < \alpha < 0; \beta > 0; \chi > 0, \alpha, \beta, \lambda$ – параметры ядер – реологические параметры материала;

а также ядра Ржаницына, Колтунова, Бронского и других авторов [1, 3].

Широкому применению этих ядер способствовали создание практических методов определения их параметров по экспериментальным данным.

Приведённые ядра содержат, как правило, три или четыре параметра, имеют дробную степень времени, так как только в этом случае возможно описание экспериментальных данных по релаксации напряжения и ползучести с хорошим приближением. Выбор соответствующего ядра зависит от свойств материала, при этом большую роль играют следующие факторы: явное выражение ядра релаксации для соответствующего ядра ползучести, количество определяемых по экспериментальным данным параметров ядер – наличие методик определения этих параметров, математическая сложность ядер, гибкость аналитических выражений при описании экспериментов.

Успешному применению дробно-экспоненциальных функций \mathcal{E}_α – Работнова при исследовании вязкоупругого поведения реальных полимеров, способствовало существование алгебры резольвентных операторов, наличие таблиц \mathcal{E}_α – функций, создание методики определения параметров \mathcal{E}_α – функций α, β, λ , являющихся реологическими параметрами материала при циклическом деформировании резиновых деталей, таблицы параметров \mathcal{E}_α – функции широко представлены в [1, 2] для большинства эластомеров (наполненных и ненаполненных), используемых в инженерной технике.

Эффекты физической нелинейности. Для средне- и высоконаполненных резин в области малых гармонических деформаций область линейного деформирования незначительна, характерными являются эффекты физической нелинейности, проявляющиеся в амплитудной зависимости динамических характеристик, используемых в линейной теории: модуля сдвига \tilde{G} или упругости \tilde{E} , модуля объёмного сжатия \tilde{K} , коэффициента Пуассона и. При аналитическом описании указанных характеристик удобно пользоваться комплексным представлением динамического модуля, являющегося функцией частоты, температуры, амплитуды гармонического деформирования.

Для случая общего циклического деформирования соответствующая экспериментальная программа очень трудоёмка и практически нереализуема. При простом (монофазном) гармоническом нагружении, характерном для условий эксплуатации резиновых элементов в большинстве машин, она существенно упрощается, и требуемые зависимости могут быть получены из опытов на простой сдвиг. Обширные экспериментальные данные, приведенные в [1, 2], обзоры по нелинейным эффектам в эластомерах при циклическом деформировании, свидетельствуют о решающем влиянии степени наполнения на уровень амплитудной зависимости сдвиговых динамических характеристик накопления G' и потерь G'' .

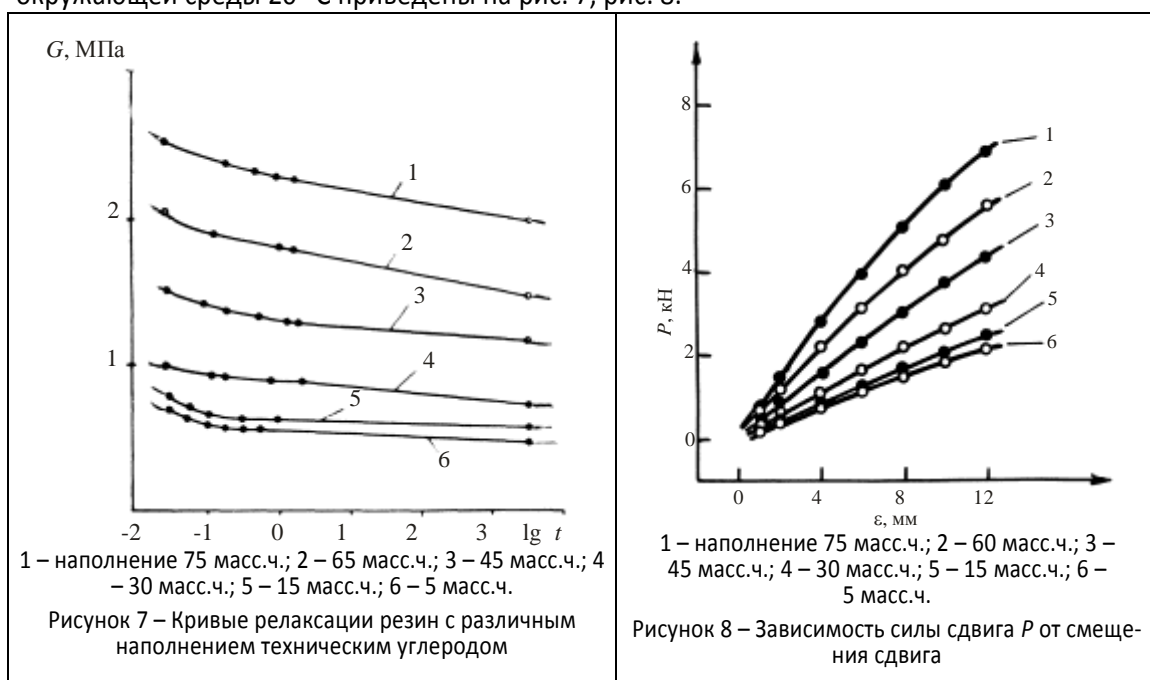
При циклическом деформировании физическая нелинейность проявляется в зависимости динамических свойств материала от амплитуд деформации или напряжения. Подробная теория соответствующих определяющих уравнений обобщена в [1]. Несмотря на то, что в общем случае уравнения, связывающие амплитуды тензоров напряжений и деформаций, являются весьма сложными, для ряда частных, но широко реализуемых на практике типов деформации, они существенно упрощаются. Это имеет место в случае так называемого простого гармонического деформирования, при котором все компоненты тензора деформации совершают колебания с одинаковыми фазами. При этом уравнения наиболее обоснованной в теоретическом и экспериментальном аспектах квазилинейной (тензорнолинейной) теории формально имеют тот же вид, что и в линейной теории, т.е. допускают представление в терминах комплексных амплитуд и модулей. Вещественные части этих модулей зависят не только от температуры и частоты, но и от амплитуд деформации.

В простейшем варианте теории, получившей для эластомеров достаточно надёжное экспериментальное подтверждение в [2], деформационная зависимость модулей реализуется через единственный инвариант – интенсивность полной амплитуды деформации e . При этом появляется возможность полностью конкретизировать определяющие уравнения по результатам экспериментов при одноосной деформации, например, при простом гармоническом сдвиге. Постановка связанной задачи, описывающей колебания и разогрев нелинейно-вязкоупругих тел при простом гармоническом деформировании, формально совпадает с соответствующей постановкой в рамках линейной теории. Это позволяет использовать для решения нелинейной задачи итерационный метод типа переменных параметров упругости, широко применяемый в теории пластичности. Линейную краевую задачу, возникающую на каждом шаге итерационного процесса, целесообразно решать мето-

дом конечных элементов (МКЭ). Такой алгоритм даёт эффективную численную реализацию задачи. На его основе возможна разработка инженерных методов и методик расчёта виброизоляторов.

В основе расчётов лежит введение универсального конструкционно-деформационного параметра $\tilde{\beta}$ [3], который позволяет установить параметры жёсткости, температуры диссипативного разогрева и долговечности для элементов различной конфигурации, выполненных из наполненных резин. С его использованием можно производить учёт эффектов физической нелинейности. Более подробно этот вопрос рассмотрен в [1].

Экспериментальные исследования параметров деформирования элементов из наполненных резин. Исследованиям подлежали резинометаллические элементы типа БРМ-101, выполненные из резин на основе СКИ-3 с различным наполнением техническим углеродом: от 5 до 75 масс.ч. Измерялись следующие механические характеристики: условно-равновесный и динамический модули сдвига, коэффициент диссипации энергии. Измерения проводились согласно методик [1, 4] с использованием стандартной измерительной аппаратуры. Наиболее характерные результаты измерений при температуре окружающей среды 20 °С приведены на рис. 7, рис. 8.



Погрешность измерений при динамическом нагружении согласно принятой методике не превосходила (с вероятностью 0,95) 5-10 %, при статическом нагружении с той же вероятностью она не превышала 3-5 %.

Полученные данные подтверждают тот вывод, что упругие и демпфирующие характеристики резиновых элементов весьма существенно зависят от степени наполнения резины техническим углеродом. Эта зависимость, как видно из графиков, выражается в монотонном росте всех измеренных величин при увеличении степени наполнения. Характер и скорость роста модулей сдвига несколько различны на двух участках: при наполнении меньше 20 масс.ч. рост выражен слабо и носит линейный характер, для наполнения более 20 масс.ч. рост становится практически нелинейным и более сильным.

Ядро Работнова (5) использовано в дальнейших исследованиях. Параметры ядра являются реологическими характеристиками материала, имеющими конкретный физический

смысл. В соответствии с методикой [2] реологические параметры α , β , λ , χ для резин имеют следующий смысл: α – параметр дробности функции (5), явно выражающийся через параметры спектра времён релаксации и позволяющий учитывать его размытость; параметр $\beta = \frac{1}{t_0^{1+\alpha}}$, где t_0 – наиболее «весомое» время релаксации; $\chi = \lambda \cdot \beta = \frac{G_0 - G_\infty}{G_0} \cdot \frac{1}{t_0^{1+\alpha}}$

обобщённое время релаксации; параметр $\lambda = \frac{G_0 - G_\infty}{G_0}$ (или $\lambda = \frac{E_0 - E_\infty}{E_0}$ в случае деформации сжатия) – дефекты модуля.

Здесь G_0 и E_0 мгновенные значения модулей, а G_∞ и E_∞ – условно-равновесные значения модулей сдвига и упругости соответственно.

Ниже приведены результаты исследования реологического поведения резиновых элементов, отличающихся содержанием в них технического углерода: 5, 15, 30, 45, 65 и 75 массовых частей.

Реологические параметры α , β , λ и χ резин с различным наполнением приведены в табл. 1.

Полученные результаты и анализ ранее проведенных исследований для ненаполненных резин [2] позволяют сделать вывод, что до наполнения резин 65 масс.ч. технического углерода с погрешностью (8-10) %, лежащей в пределах погрешности эксперимента, реологическое поведение их в диапазоне гармонических режимов нагружения, описываются интегральными операторами с дробно-экспоненциальной функцией релаксации Ю.Н. Работнова. Для высоконаполненных резин (более 65 масс.ч.), погрешность значительно возрастает (до 20 % и более), характерными являются зависимости модулей сдвига от амплитуды деформаций, проявляются так называемые эффекты физической нелинейности. В этом случае искажается линейный характер связи напряжение-деформация и для описания реологического поведения наполненных резин следует использовать разработанный β -метод в рамках интегральной математической модели [2].

Таким образом: 1. Для резин, используемых в качестве конструкционного материала для изготовления силовых элементов (защитных футеровок, виброизоляторов, упругих звеньев и т.д.) наиболее подходящим для описания вязкоупругого поведения является дробноэкспоненциальная функция Работнова. Четырехпараметрическое ядро с параметрами α , β , λ , χ позволяет наиболее полно учесть частотные и амплитудные зависимости информативных параметров G и ψ в диапазоне частот $10^{-4} \div 10^6$ Гц и величин относительной деформации $\varepsilon < 0,45$.

2. Для описания механического поведения резин, наполненных техническим углеродом (до 65 масс.ч.) можно использовать ядро Работнова; при наполнении свыше 65 масс.ч. необходимо использовать полученные линейные параметры для применения их в разработанном β -методе учёта физической нелинейности материала.

3. Установлено, что параметры ядра α и β является структурно-чувствительными величинами и отражают природу нестабильности физико-механических характеристик резин во времени (параметр α определяется при этом через пик релаксационного спектра); параметр λ также отражает изменение жесткостных характеристик резин во времени.

Цель. Определить физико-механические свойства наполненных резин и разработать методику расчёта их реологических параметров.

Определение реологических параметров резин. Решение задач квазистатики и динамики вязкоупругих систем сводится, как правило, к анализу функциональных зависимостей, содержащих ограниченный набор функций времени или частоты. Эти функции опи-

сывают механическую реакцию материала. Это, так называемые, механические характеристики материала. К ним относятся приведённые выше функции ползучести и релаксации, синус и косинус преобразования ядер ползучести и релаксации.

По результатам экспериментальных исследований обычно получают кривые ползучести, релаксации и параметры петель гистерезиса при различных частотах, по которым находят механические характеристики. Затем реологические параметры выражают (явно или неявно) через механические характеристики при фиксированных значениях времени или частоты циклического деформирования.

Для определения реологических параметров используют несколько методов, дополняющих друг друга. К ним относятся определение реологических параметров непосредственно по кривой релаксации; по релаксационному пику на частотной зависимости коэффициента диссипации $\psi \sim \lg \omega$; по параметрам петли гистерезиса при произвольной частоте нагружения.

Если в качестве ядра релаксации используется функция вида (5) и обобщённое время релаксации порядка $t_0 = 10^4 \div 10^6$ с (что характерно для наполненных резин), определение реологических параметров целесообразно проводить непосредственно по кривым релаксации и ползучести. При исследовании ненаполненных амортизационных резин, для которых обобщённое время релаксации весьма мало $t_0 = 10^{-1} \div 10$ с, целесообразно использовать метод обработки деформационных петель гистерезиса, полученных в широком частотном диапазоне. При наличии экспериментальных кривых $\psi \sim \lg \omega$ в широком частотном диапазоне с чётко обозначенным релаксационным пиком реологические параметры определяют по релаксационному пику на кривой $\psi \sim \lg \omega$. В общем случае при определении реологических параметров новых, особенно опытных марок резин, используют, как правило, комбинацию перечисленных методов и сравнивают полученные результаты.

Перечисленные выше методы определения реологических параметров требуют проведения целого комплекса экспериментальных исследований по определению физико-механических характеристик резин и резиновых элементов, включающих определение квазистатических характеристик (условно-равновесных) E_∞ , G_∞ , мгновенных значений E_0 и G_0 , динамического модуля сдвига $G_{дин}(\omega)$ и технического коэффициента диссипации энергии ψ , регистрации кривых ползучести и релаксации.

Общие требования к проведению физико-механических испытаний. На общие требования к проведению физико-механических испытаний резины существуют стандарты, устанавливающие требования к способам заготовки образцов, проведению испытаний и обработке их результатов. При отборе образцов необходимо выполнять следующие требования:

- образцы отбираются по величине условно-равновесного модуля сжатия или сдвига, а также по твёрдости; образцы с различными дефектами резины, такими как царапины, вырывы, а также недовулканизованные образцы не испытываются;
- исходя из жёсткости образцов, они комплектуются по партиям, разброс жёсткости не должен превышать 5 %; для установления однородности резинового массива необходимо проводить выборочное расчленение образцов.

Определение квазистатических характеристик. В качестве экспериментального стенда для получения статических (условно-равновесных) характеристик E_∞ и G_∞ резиновых элементов использовалась установка, подробно описанная в [2], позволяющая фиксировать величину деформирующей силы P и величину относительной деформации ε или γ . Деформация образцов измерялась индикатором часового типа с точностью до 0,01 мм. Выдержка образцов под нагрузкой соответствовала 1 ч при температуре 343 К.

Нагрузению подвергались блоки резинометаллические (БРМ).

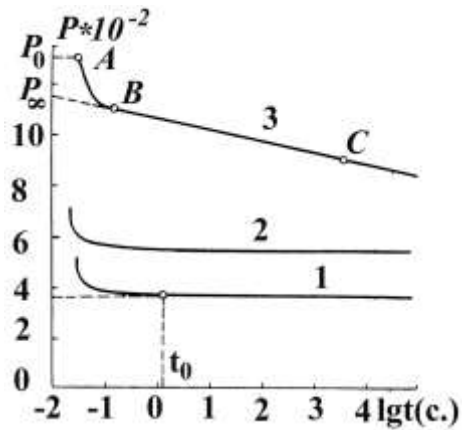
Значения установившегося модуля E_∞ или G_∞ находились по величине деформирующей силы P_∞ , определяемой экстраполяцией линейного участка кривой релаксации на ось сил P (рис. 9), при фиксированной величине относительной деформации ε_∞ (или γ_∞) по формуле: для пары плоских элементов сдвига типа БРМ

$$G_\infty = \frac{P_\infty h}{2F\Delta_\infty},$$

где F – площадь сдвига;
 h – высота элемента;
 Δ_∞ – деформация.

Определение мгновенного модуля сдвига. При определении мгновенных значений E_0 и G_0 применялась специально созданная установка (рис. 10), которая позволяла реализовать быстрое нагружение (время нагружения $0,05 \div 0,1$ с). Установка состоит из электрического магнита 7 с неподвижной пластиной 6, который притягивает через подвижную пластину 5 образцы 4, расположенные в латунной скобе 3. Сила реакции резиновых образцов фиксируется тензоизмерительной втулкой 2, которая закреплена к станине 1, затем передаётся через тензоусилитель на шлейфовый осциллограф. Величина деформации образцов Δ определяется индикатором часового типа. После расшифровки осциллограмм рассчитываются мгновенные значения модулей E_0 и G_0 .

Определение динамических характеристик. Нагружение при определении динамических, механических параметров и технического коэффициента поглощения энергии ψ резинометаллических деталей целесообразно производить с помощью деформационных машин с эксцентриковым регулируемым приводом при гармоническом стационарном режиме. Конструкция экспериментальных стендов должна позволять исследовать резиновые детали: а) в зависимости от частоты нагружения при постоянной амплитуде; б) в зависимости от амплитуды нагружения при постоянной частоте. На рис. 11 представлена одна из конструкций стенда, на котором производят нагружение при



для резин: 1 – №1, 2 – №2, 3 – №4

Рисунок 9 – Кривые релаксации при сдвиге БРМ
101

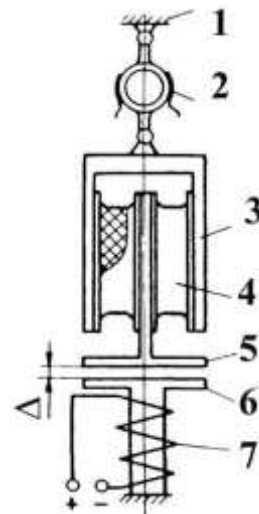


Рисунок 10 – Схема установки для определения мгновенного значения модуля

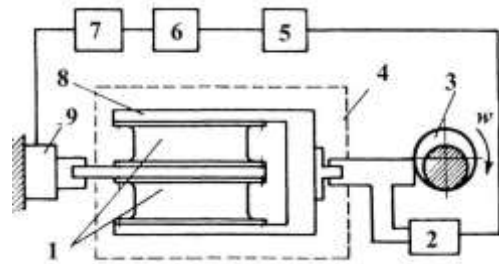


Рисунок 11 – Схема экспериментальной установки

нагружение при гармоническом стационарном режиме. Конструкция экспериментальных стендов должна позволять исследовать резиновые детали: а) в зависимости от частоты нагружения при постоянной амплитуде; б) в зависимости от амплитуды нагружения при постоянной частоте. На рис. 11 представлена одна из конструкций стенда, на котором производят нагружение при

определении динамических характеристик плоских резинометаллических элементов при сдвиге.

На рис. 10 показана блок-схема подключения измерительной аппаратуры применительно к исследованию элементов сдвига. Эксцентриковый привод 3 экспериментального стенда задавал одноосные гармонические перемещения скобе 8 и присоединённым к ней резинометаллическим элементам 1. Перемещение скобы измерялось реохордным датчиком 2. Электрические сигналы, пропорциональные величине заданного перемещения, через усилитель 5 подавались на горизонтальную ось электронного осциллографа 6; на вертикальную ось подавались сигналы, пропорциональные силе реакции резинового элемента, регистрируемые тензоизмерительным кольцом 9. Числовые данные получали путём измерений петель гистерезиса, фотографируемых с экрана осциллографа 6; и измерений осциллограмм силы реакции, фиксируемых шлейфовым осциллографом 7. Для того, чтобы получить действительные результаты измерений, перед каждым испытанием проводится специальная проверка регистрирующей аппаратуры.

Определение реологических параметров РД по релаксационному пику на частотной зависимости $\psi \sim \lg \omega$. В этом случае реологические параметры РД для ядра релаксации (5) определяются по формулам [1]

$$\alpha = 1 - \frac{4}{3} \operatorname{arctg} \frac{\psi_{\max}}{\pi \lambda}; \quad (6)$$

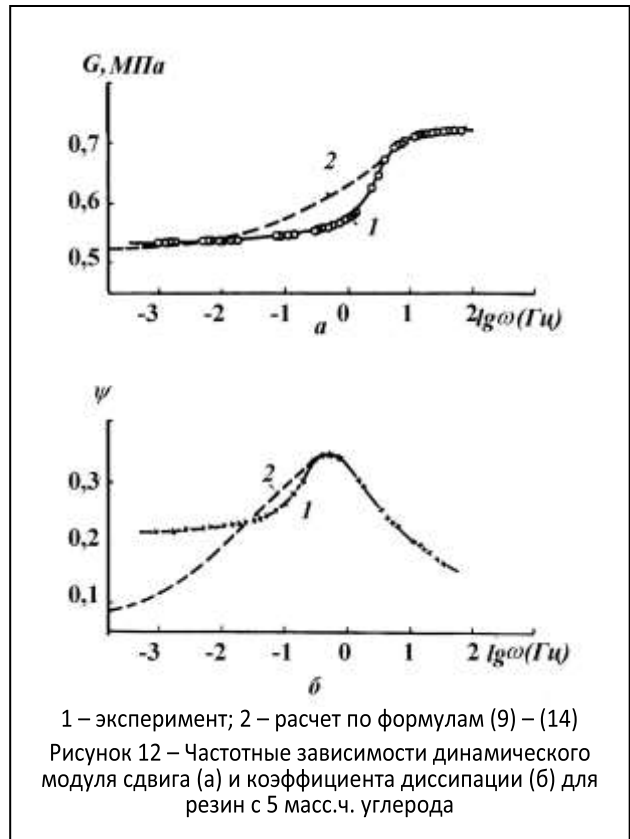
$$\lambda = \frac{G_0 - G_\infty}{G_0} \quad \text{или} \quad \lambda = \frac{E_0 - E_\infty}{E_0}; \quad (7)$$

$$\beta = \frac{1}{t_0^{1+\alpha}}, \quad \chi = \lambda \cdot \beta, \quad t_0 = \frac{1}{\omega_0} = [\omega(\psi_{\max})]^{-1}, \quad (8)$$

где ω_0 – частота релаксационного пика, при которой $\psi = \psi_{\max}$.

Для использования этих соотношений необходимо располагать экспериментальной кривой $\psi \sim \lg \omega$ в широком частотном диапазоне с чётко обозначенным релаксационным пиком, как, например, на рис. 12.

Такие кривые, как правило, получают на специальных экспериментальных стендах типа «Инстрон». Кроме этого, экспериментальные исследования [2] показывают, что погрешность таких расчетов более 20 % и связана прежде всего с трудностью определения частоты ω_0 ($\omega_0 \approx 10 \text{ с}^{-1}$) и некоторой размытостью релаксационного пика для слабонаполненных резин. Все это в значительной степени затрудняет использование зависимостей



(6)-(8) для инженерного определения реологических параметров РД. Они могут быть использованы для более глубокого изучения вязкоупругого поведения резин.

Определение реологических параметров РД при циклическом деформировании.

Для более глубокого и всестороннего изучения резины, особенно опытных марок, целесообразней использовать определение реологических параметров по параметрам петель гистерезиса, регистрируемых в широком диапазоне изменений нагружения, температуры и влияния внешней активной среды. В этом случае реологические параметры ядра Работнова определяются следующими соотношениями [1, 4, 5]:

$$\frac{G(\omega)}{G_0} = 1 - A(\omega) \quad \text{или} \quad \frac{E(\omega)}{E_0} = 1 - A(\omega); \tag{9}$$

$$\psi = 2\pi\chi B(\omega); \tag{10}$$

$$A(\omega) = \frac{\chi(\omega^{1+\alpha} \cos \delta + \beta)}{\omega^{2(1+\alpha)} + 2\omega^{1+\alpha} \beta \cos \delta + \beta^2}; \tag{11}$$

$$B(\omega) = \frac{\chi\omega^{1+\alpha} \sin \delta}{\omega^{2(1+\alpha)} + 2\omega^{1+\alpha} \beta \cos \delta + \beta^2}; \tag{12}$$

где $G(\omega), E(\omega)$ – модули динамический и упругости при частоте ω ;
 $A(\omega), B(\omega)$ – косинус и синус преобразования ядра (5);
 α, β, χ – реологические параметры, параметры ядра (5).

В результате экспериментальных исследований РД определяют параметры петель гистерезиса и амплитудные значения деформирующей силы $P(\omega)$ при различных частотах нагружения в заданном диапазоне.

Типичная петля гистерезиса резиновых элементов представлена на рис. 13 и имеет вид эллипса, наклонённого под определённым углом φ_1 к оси деформации. По найденным значениям $P(\omega)$ и параметрам петель гистерезиса определяют величины динамических модулей и технического коэффициента диссипации энергии $\psi(\omega)$ при конкретных значениях частоты нагружения, а также зависимости от частоты реологических параметров материала $A(\omega)$ и $B(\omega)$ по формулам



Рисунок 13 – Петля гистерезиса при циклическом нагружении

$$A(\omega) = 1 - \frac{G(\omega)}{G_0} = \sqrt{\frac{[P_1(\omega)]^2}{P_0^2} - \frac{\psi^2}{4\pi^2}}; \tag{13}$$

$$B(\omega) = \frac{\psi}{2\pi} = \frac{S}{2\pi S_0}, \tag{14}$$

где S – площадь петли гистерезиса;

S_0 – площадь прямоугольного треугольника со сторонами X_0 и P_0 , т.е. полная энергия при идеальной упругости резины;

P_0 – амплитуда усилия в предположении идеальной упругости резины;

X_0 и P_1 – амплитуда перемещения и усилия соответственно.

Далее по формулам (11), (12) и (6)-(8) определяют реологические параметры α , β , λ ядра (5). В этом случае для определения реологических характеристик α и β необходимо располагать данными о значении величины $E(\omega)$ (или $G(\omega)$) и $\psi(\omega)$ в весьма широком диапазоне частот нагружения. Однако при $\omega < 1,5$ Гц определение коэффициента поглощения энергии $\psi(\omega)$ представляет значительные трудности. Поэтому ниже приводятся соотношения, обеспечивающие определение параметров α и β через реологические характеристики $A(\omega)$ и $B(\omega)$, найденные опытным путём для произвольного значения частоты нагружения $\omega = \omega_1$ [1, 4]

$$\frac{A(\omega_1)}{B(\omega_1)} = -\operatorname{tg} \delta + \frac{\beta}{\omega_1^{1+\alpha} \sin \delta} \quad (15)$$

$$\beta_{1,2} = \frac{\omega_1^{1+\alpha}}{B} \left\{ 0,5\lambda \sin \delta - B(\omega_1) \cos \delta \pm \sqrt{[0,5\lambda \sin \delta - B(\omega_1) \cos \delta]^2 - [B(\omega)]^2} \right\} \quad (16)$$

Эти формулы легко преобразуются в соотношения

$$\beta = \omega_1^{1+\alpha} \sin \delta A(\omega_1) B^{-1}(\omega_1) - \omega_1^{1+\alpha} \cos \delta;$$

$$\alpha = -1 + \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{\lambda B(\omega)}{\sqrt{[A^2(\omega_1) - \lambda A(\omega_1) + B^2(\omega_1)]^2 + \lambda^2 B^2(\omega_1)}}. \quad (17)$$

Таким образом, используя представленные выше математические соотношения, методика определения основных реологических параметров РД сводится к следующему.

1. На испытательной установке с помощью измерительной аппаратуры при гармоническом нагружении образцов в заданном диапазоне частот определяются амплитудные значения упругой деформирующей силы P резинового элемента и регистрируются петли гистерезиса.

2. По величине силы P с помощью соответствующих формул находят значения модулей $E(\omega)$ или $G(\omega)$ при различных частотах нагружения.

3. На деформационных машинах при максимальной реализующей частоте нагружения или на установке, описанной выше, определяются мгновенные значения модулей E_0 , G_0 .

4. Обрабатываются петли гистерезиса и определяются их основные параметры S , S_0 , $P_1(\omega)$ и P_0 , по которым находится зависимость технического коэффициента поглощения энергии от частоты нагружения $\psi(\omega)$, а также величины реологических характеристик $A(\omega)$ и $B(\omega)$.

5. По формулам (11), (12) находят величины основных реологических параметров резины α , λ , t_0 .

Если известны величины $G(\omega)/G_0$ и $\psi(\omega)$, найденные экспериментально при произвольном значении частоты нагружения $\omega = \omega_1$, то реологические параметры резины определяются соотношениями (15) – (17). В этом случае методика обработки опытных данных сводится к тому, что описанным ранее способом находят величины $E(\omega)$ или $G(\omega)$ и $\psi(\omega)$ при определённом значении частоты $\omega = \omega_1$, а также находят величины мгновенных модулей E_0 и G_0 ; вычисляются значения реологических характеристик $A(\omega)$ и $B(\omega)$ при $\omega = \omega_1$; при решении уравнений (15), (16) находят значения основных реологических параметров α , β , λ , χ , в дальнейшем вычисляются реологические характеристики $A(\omega)$ и $E(\omega)$ в широком диапазоне изменения частот нагружения; по найденным значениям $A(\omega)$ и $B(\omega)$ с по-

мощью соотношений (9), (10) находят-ся частотные зависимости величин $G(\omega)/G_0$ и $\psi(\omega)$, проводится полный цикл экспериментальных исследований резинометаллических изделий, результаты которых сравниваются с результатами, найденными аналитическим путём.

С помощью приведённых соотношений были вычислены параметры ядра Работнова для исследуемых резиновых элементов (табл. 1) и определены частотные зависимости $G(\omega)$ и $\psi(\omega)$. Эти зависимости удовлетворительно совпадают с экспериментом в области частот $\omega > 0,8$ Гц. При более низких частотах нагружения экспериментальные и расчётные значения не совпадают, как показано на примере резины 51-1562 (рис. 14).

Пример расчёта. Рассмотрим определение реологических характеристик элементов типа БРМ101 (размер эластичного блока $0,35 \times 0,060 \times 100$ м) из серийной марки резины типа 51-1562 (на основе СКИ-3, сажи 5 масс.ч., окиси цинка 5 масс.ч.). Три пары элементов, статическая жёсткость которых отличалась от среднего значения не более 5% подвергались комплексу испытаний согласно изложенной методике.

Найденные реологические характеристики показаны в табл. 1.

Статический (условно-равновесный) модуль сдвига G_∞ определялся на установке при скорости нагружения 0,05 м/с, выдержке под нагрузкой 60 мин при температуре 343 К (70 °С) и величине деформации 5 мм.

Мгновенный модуль сдвига определялся на описанной выше установке при времени срабатывания магнита (время нагружения) $t = 0,05$ с и величине деформации $\Delta = 1,9$ мм.

Динамические характеристики исследуемых элементов определялись на специальном стенде в широком диапазоне изменения частоты нагружения (4÷100 Гц). При расшифровке петель гистерезиса и осциллограмм силы определялись значения динамического модуля $G_{дин}$ и коэффициента диссипации ψ . На рис. 14 показаны эти значения для трёх пар исследуемых элементов. В дальнейшем с помощью изложенного выше алгоритма расчёта производилась обработка полученных результатов при конкретной частоте нагружения $\omega = 10,8$ Гц. На рис. 13 результаты обработки показаны сплошной линией. Как видно, результаты расчёта при фиксированной частоте и экспериментальные результаты удовлетворительно совпадают.

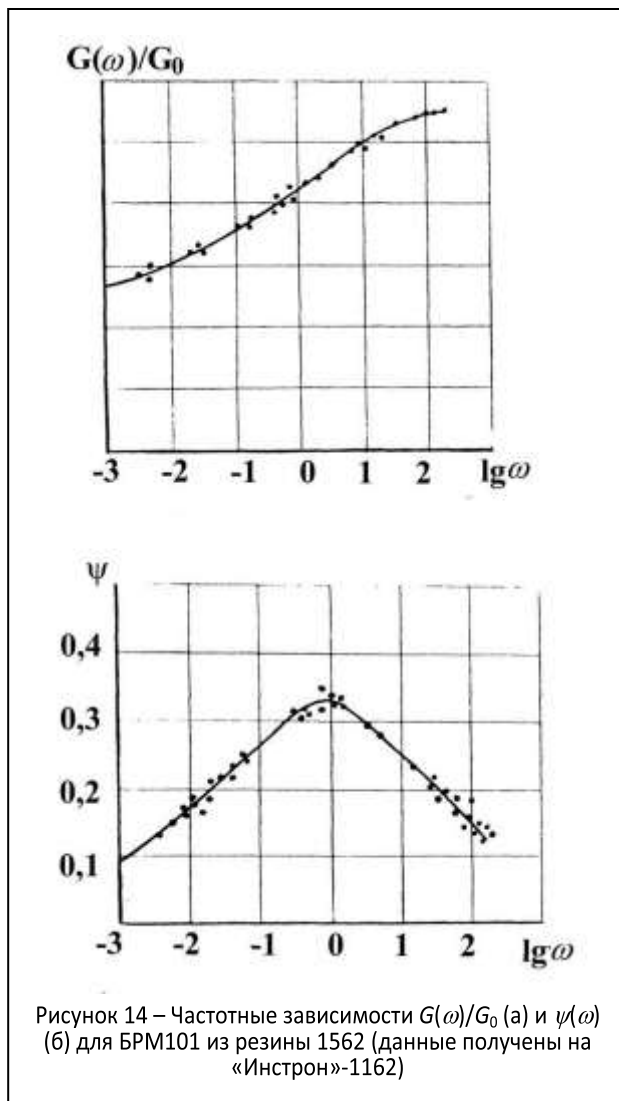


Рисунок 14 – Частотные зависимости $G(\omega)/G_0$ (а) и $\psi(\omega)$ (б) для БРМ101 из резины 1562 (данные получены на «Инстрон»-1162)

В табл. 1 представлены значения реологических характеристик резин (их определение осуществлялось по изложенной методике для элементов сдвига типа БРМ101, изготовленных в НИИРПе), наиболее часто используемых в общем машиностроении для изготовления виброизоляторов, резиновых футеровок и т.д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прикладная механика упруго-наследственных сред. Т. 1. Механика деформирования и разрушения эластомеров / А.Ф. Булат, В.И. Дырда, Е.Л. Звягильский, А.С. Кобец. – К.: Наукова думка, 2011. – 568 с.
2. Дырда, В.И. Резиновые футеровки технологических машин / В.И. Дырда, Р.П. Зозуля. – Москва – Днепропетровск, 2013. – 237 с.
3. Гнучий, Ю.Б. Геометрическое представление внутренних связей в телах / Ю.Б. Гнучий // Проблемы прочности. – 1990. – № 7. – С. 107-111.
4. Прикладная механика упруго-наследственных сред. Т. 2. Методы расчета эластомерных деталей / А.Ф. Булат, В.И. Дырда, Е.Л. Звягильский, А.С. Кобец. – К.: Наукова думка, 2012. – 616 с.
5. Дырда, В.И. Прочность и разрушение эластомерных конструкций в экстремальных условиях / В.И. Дырда. – К.: Наук. думка, 1988. – 239 с.

REFERENCES

1. Bulat, A.F., Dyrda, V.I., Zvyagilskiy, Ye.L. and Kobets, A.S. (2011), *Prikladnaya mekhanika uprugonasledstvennykh sred. Tom 1. Mehanika deformirovaniia i razrusheniia elastomerov* [Applied mechanics of elastic-hereditary media. Vol. 1. Mechanics of deforming and breaking down of elastomers], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
2. Dyrda, V.I. and Zozulya, R.P. (2013), *Rezinovyve futerovki tekhnologicheskikh mashin* [Rubber linings of technological machines], Dnepropetrovsk, Ukraine.
3. Gnuchiy, Yu.B. (1990), "Geometric representation of the internal connections in the bodies", *Journal Strength of Materials*, no. 7, pp. 107-111.
4. Bulat, A.F., Dyrda, V.I., Zviagilskii, E.L. and Kobets, A.S. (2012), *Prikladnaya mekhanika uprugonasledstvennykh sred. Tom 2. Metody rascheta elastomernykh detalei* [Applied mechanics of elastic-hereditary media. Vol. 2. Design techniques of elastomeric parts], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
5. Dyrda, V.I. (1988), *Prochnost i razrusheniye elastomernykh konstruksiy v ekstremalnykh usloviyakh* [Strength and fracture of elastomeric constructions under extreme conditions], Naukova dumka, Kiev, USSR.

Об авторах

Дырда Виталий Илларионович, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом механики эластомерных конструкций горных машин, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепропетровск, Украина, vita.igtm@gmail.com

Агальцов Геннадий Николаевич, инженер, младший научный сотрудник отдела механики эластомерных конструкций горных машин, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепропетровск, Украина

Новикова Алина Вячеславовна, магистр, младший научный сотрудник отдела механики эластомерных конструкций, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепропетровск, Украина, a_v_novikova@mail.ru

Калганков Евгений Васильевич, аспирант, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепропетровск, Украина

Цаниди Иван Николаевич, магистр, старший преподаватель Днепропетровский государственный аграрно-экономический университет, Украина, Днепропетровск, Украина

Дорохов Максим Анатольевич, аспирант кафедры нефтегазового оборудования Ивано-Франковского национального технического университета нефти и газа (ИФНТУНГ), Ивано-Франковск, Украина, maximpu.5@gmail.com

About the authors

Dyrda Vitaly Illarionovich, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Professor, Head of Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machines, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, vita.igtm@gmail.com

Novikova Alina Vyacheslavovna, Master of Science (Tech.), Junior Researcher in Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machines, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, a_v_novikova@mail.ru

Agaltsov Gennady Nikolaevich, Engineer, Junior Researcher of Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machines, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine

Kalgankov Evgeniy Vasilyevich, Ph. D. Student in Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machines, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine

Tsanidy Ivan Nikolaevich, Master of Science, Department «Reliability and repair of machinery», Dnepropetrovsk State Agrarian and Economic University (DSAEU), Dnepropetrovsk, Ukraine

Dorokhov Maksim Anatol'yevich, Master of Science (Tech.), Ph. D. Student of the Department Oil and Gas Equipment in Ivano-Frankovsk National Technical University of Oil and Gas (IFNUOG), Ivano-Frankovsk, Ukraine, maximpu.5@gmail.com

Анотація. Розглянуто прояв ефектів фізичної нелінійності матеріалу залежно від ступеня наповнення гум. Також визначено, що проводити розрахунок механічних характеристик наповнених гум доцільно по петлях гістерезису і по зсуву фаз синусоїдальних кривих «деформація-навантаження». Експериментальні дослідження підтверджують залежність механічних характеристик гум від ступеня їх наповнення технічним вуглецем.

Встановлено, що при наповненні гум менше 20 мас. ч. зростання модулю зсуву виражене слабо і носить лінійний характер, а при наповненні гум більш 20 мас. ч. зростання стає нелінійним і сильнішим. Таким чином для наповнених гум найбільш доцільно застосовувати ядро Работнова. Для отримання реологічних характеристик наповнених гум, необхідно експериментально отримати петлі гістерезиса і миттєві модулі, після математичної обробки експериментальних результатів визначаються основні реологічні характеристики наповнених гум.

Ключові слова: гума, деформація, дисипація, наповнені гуми, сильно наповнені гуми, нелінійність, механіка еластомерів, ядро Работнова, реологія

Abstract. The article considers effects of material physical nonlinearity depending on degree of rubber filling. It is determined that mechanical characteristics of the filled rubbers should be calculated by hysteresis loops and phase shift of the sinusoidal curves «strain-load». Experimental studies have confirmed dependence between rubber mechanical properties and degree of rubber filled with carbon.

It is established that when rubber is filled by less than 20 wt. h., growth of the shear modulus is weak and linear, and when rubber is filled by more than 20 wt. h. increase becomes non-linear and stronger. Thus, for filled rubbers, the most appropriate is to apply the Rabotnov kernel.

In order to specify basic rheological properties of the filled rubbers it is necessary first to obtain experimental hysteresis loops and instant modules and then, after mathematical processing of the experimental results, the basic rheological properties of the filled rubbers are determined.

Keywords: rubber, deformation, dissipation, filled rubber, heavily filled rubber, non-linearity, mechanics of elastomers, Rabotnov kernel, rheology

Статья поступила в редакцию 03.09.2014

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук, проф. В.П. Надутым