

Дорохов М.А., аспирант
(ИФНТУНГ),
Агальцов Г.Н., инженер,
Новикова А.В., магистр,
Калганков Е.В., аспирант,
Цаниди И.Н., аспирант
(ИГТМ НАН Украины),
Черний А.А., магистр
(ДГАЭУ),
Луценко С.Н., аспирант
(ИГТМ НАН Украины)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕОЛОГИИ РЕЗИН

Дорохов М.А., аспирант
(ИФНТУНГ),
Агальцов Г.М., инженер,
Новикова А.В., магистр,
Калганков Є.В., аспирант,
Цаніди І.М., аспирант
(ІГТМ НАН України),
Черній О.А., магистр
(ДДАЕУ),
Луценко С.М., аспирант
(ІГТМ НАН України)

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕОЛОГІЇ ГУМ

Dorokhov M.A., Doctoral Student
(IFNUOG),
Agaltsov G.N., Master of Science,
Novikova A.V., M.S. (Tech.),
Kalgankov Ye.V., Doctoral Student,
Tsanidy I.N., Doctoral Student
(IGTM NAS of Ukraine),
Cherniy A.A., M.S. (Tech.)
(DSAEU),
Lutsenko S.N., Doctoral Student
(IGTM NAS of Ukraine)

EXPERIMENTAL RESEARCH OF RUBBER RHEOLOGY

Аннотация. Рассматривается методика определения реологических характеристик резин, включающая: выбор марки резины; определение квазистатических характеристик резиновых образцов; определение динамических характеристик образцов. Рассматриваются два метода определения реологических параметров резиновых элементов: первый метод основан на ис-

пользовании релаксационного пика на частотной зависимости коэффициента поглощения материала; второй метод предусматривает использование параметров петли гистерезиса, регистрируемых в широком диапазоне изменений нагружения. Показано, что для резин, используемых для изготовления силовых элементов, наиболее подходящей является четырёхпараметрическая дробно-экспоненциальная функция Работнова; при наполнении резины свыше 65 масс.ч. техническим углеродом необходимо использовать β -метод.

Ключевые слова: резина, реология, ядро Работнова, упругий потенциал

1 Выбор марок резин для исследования

Тяжёлые машины обычно работают при гармоническом нагружении с частотами (8-50) Гц и амплитудами колеблющихся масс (0-20) мм.

Традиционные марки резин на основе НК типа 2959, 1224, 3311 и на основе СКИ – СКД типа 1378 оказались неприемлемыми для таких машин вследствие большого диссипативного разогрева, повышенного старения и крайне неудовлетворительной долговечности. Данные по этим резинам приведены в табл. 1 (ψ – коэффициент диссипации; G_0 – мгновенный модуль сдвига; G_∞ – условно-равновесный модуль; λ_p – коэффициент теплопроводности резины; θ – приращение температуры диссипативного саморазогрева; N^* – долговечность). Приращение температуры θ и долговечность N^* даны для элементов типа БРМ102, разрушаемых при амплитуде циклического сдвига $A = 10,5$ мм $\nu_0 = 0,21$ и частоте 11,6 Гц.

Таблица 1 – Термомеханические и усталостные характеристики резин

| Резина | Наполнение | | ψ | G_0 , МПа | G_∞ , МПа | λ_p , Вт/(м·К) | θ , К | $\lg N^*$, циклы |
|----------|------------|-----|--------|-------------|------------------|------------------------|--------------|-------------------|
| | углерод | ZnO | | | | | | |
| 2959 | 45 | 15 | 0,31 | 1,76 | 0,74 | 0,240 | 160 | 5,60 |
| 1378 | 15 | 5 | 0,13 | 1,30 | 0,73 | 0,180 | 70 | 7,20–7,40 |
| 1224 | 3 | 50 | 0,11 | 1,30 | 0,93 | 0,160 | 40–45 | 7,40–7,60 |
| 4 | 34 | 27 | 0,40 | 1,60 | 0,90 | 0,215 | 74–76 | 7,80–7,86 |
| 67Л | 15 | 20 | 0,35 | 1,50 | 0,78 | 0,178 | 64–66 | 8,40–8,50 |
| 59Л | 10 | 40 | 0,32 | 1,50 | 0,72 | 0,174 | 60–62 | 8,40–8,60 |
| 28Э | 20 | 10 | 0,30 | 1,70 | 1,12 | 0,182 | 54–62 | 8,57–8,65 |
| 169 | 20 | 5 | 0,30 | 1,50 | 0,93 | 0,173 | 58–61 | 8,5–8,66 |
| 310 | 15 | 15 | 0,25 | 1,40 | 0,90 | 0,177 | 45–50 | 8,58–8,66 |
| 51-1562 | 5 | 5 | 0,17 | 0,78 | 0,51 | 0,155 | 32–36 | 9,06–9,20 |
| ИРП-1293 | 2 | 40 | 0,35 | 2,10 | 1,31 | – | – | – |

Вместе с тем по указанным резинам накоплена обширная экспериментальная информация, к тому же они удовлетворительно зарекомендовали себя при эксплуатации с меньшими величинами деформаций.

2 Определение квазистатических характеристик

В качестве экспериментального стенда для получения статических (условно-равновесных) характеристик E_∞ и G_∞ резиновых элементов использовалась установка, подробно описанная в [1], 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 , 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 [1], которая позволяла реализовать быстрое нагружение (время нагружения $0,05 \div 0,1$ с).

3 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 [1, 2].

Определение реологических параметров резиновых деталей по релаксационному пику на частотной зависимости $\psi \sim \lg \omega$. В этом случае реологические параметры резиновых деталей определяются по формулам [1]

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

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

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

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 рисунке 1.

Такие кривые, как правило, получают на специальных экспериментальных стендах типа «Инстрон». Кроме этого, экспериментальные исследования показывают, что погрешность таких расчётов более 20 % и связана, прежде всего, с трудностью определения частоты ω_0 ($\omega_0 \square 10 \text{ с}^{-1}$) и некоторой размытостью релаксационного пика для слабонаполненных резин.

Определение реологических параметров резиновых деталей 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, 2]:

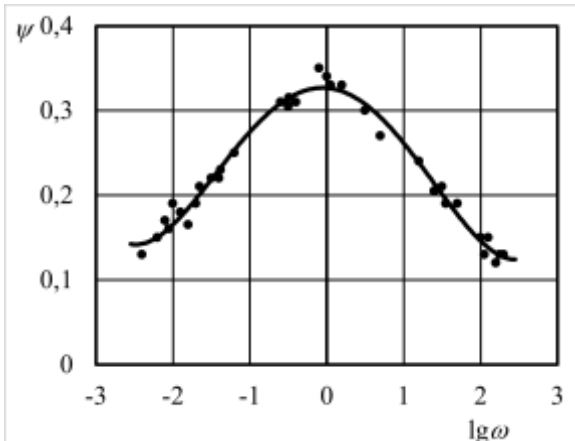


Рисунок 1 – Частотные зависимости $\psi(\omega)$ для БРМ101 из резины 1562 (данные получены на «Инстрон»-1162)

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

$$\psi = 2\pi\chi B(\omega);$$

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

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

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

Далее по приведённым выше формулам определяют реологические параметры α , β , λ ядра. 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]

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

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

Эти формулы легко преобразуются в соотношения

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

$$\alpha = -1 + \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{\lambda B(\omega)}{\sqrt{[A^2(\omega_1) - \lambda A(\omega_1) + B^2(\omega_1)]^2 + \lambda^2 B^2(\omega_1)}}. \quad (3)$$

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 (1)-(3). В этом случае методика обработки опытных данных сводится к тому, что описанным ранее способом находятся величины $E(\omega)$ или $G(\omega)$ и $\psi(\omega)$ при определённом значении частоты $\omega = \omega_1$, а также находятся величины мгновенных модулей E_0 и G_0 ; вычисляются значения реологических характеристик $A(\omega)$ и $B(\omega)$ при $\omega = \omega_1$; при решении уравнений (1), (2) находятся 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 помощью соотношений находятся 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 и определены частотные зависимости $G(\omega)$ и $\psi(\omega)$. Эти зависимости удовлетворительно совпадают с экспериментом в области частот $\omega > 0,8$ Гц.

Выводы

1. Для резин, используемых в качестве конструкционного материала для изготовления силовых элементов, наиболее подходящим для описания вязкоупругого поведения является дробно-экспоненциальная функция Работнова. Четырёхпараметрическое 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 55-65 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.

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. Определение физико-механических свойств наполненных резин / В.И. Дырда, Г.Н. Агальцов, А.В. Новикова, Е.В. Калганков, И.Н. Цаниди, М.А. Дорохов // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. – 2014. – Вып. № 116. – С. 158-173.

3. Marvalova, B. Viscoelastic properties of filled rubber. Experimental observations and material modelling / B. Marvalova // *Engineering Mechanics*. – 2007. – Vol. 14, No. 1/2. – Pp. 81-89.

4. Study the effect of recycled tire rubber on the mechanical and rheological properties of TPV (HDPE/Recycled tire rubber) / Z.T. Al-Malki, E.A. Al-Nasir, M.N. Khalaf, R.K. Zidan // *Open Journal of Polymer Chemistry*. – 2013. – Vol. 3. – Pp. 99-103.

5. Ageing of rubber – accelerated heat ageing tests results / R.P. Brown, T. Butler, S.W. Hawley. – Rapra Technology Limited, 2001. – 193 p.

REFERENCES

1. Bulat, A.F., Dyrda, V.I., Zvyagil'skiy, Ye.L. and Kobets, A.S. (2011), *Prikladnaya mekhanika uprugogo-nasledstvennykh 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., Agal'tsov, G.N., Novikova, A.V. (et al.) "Determination of physical and mechanical properties of the filled rubber", *Geo-Technical Mechanics*, no. 116, pp. 158-173.

3. Marvalova, B. (2007), "Viscoelastic properties of filled rubber. Experimental observations and material modelling", *Engineering Mechanics*, vol. 14, no. 1/2, pp. 81-89.

4. Al-Malki, Z.T., Al-Nasir, E.A., Khalaf, M.N. and Zidan, R.K. (2013), "Study the effect of recycled tire rubber on the mechanical and rheological properties of TPV (HDPE/Recycled tire rubber)", *Open Journal of Polymer Chemistry*, vol. 3, pp. 99-103.

5. Brown, R.P., Butler, T. and Hawley, S.W. (2001), *Ageing of rubber – accelerated heat ageing tests results*, Rapra Technology Limited.

Об авторах

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

Агалъцов 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, ag.gena@gmail.com

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, vita.igtm@gmail.com

Цаниди Иван Николаевич, аспирант, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепропетровск, Украина, vita.igtm@gmail.com

Черний Александр Анатольевич, магистр, старший преподаватель, Днепропетровский государственный аграрно-экономический университет (ДГАЭУ), Днепропетровск, Украина, sanek20.1984@gmail.com

Луценко Сергей Николаевич, аспирант, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепропетровск, Украина, vita.igtm@gmail.com

About the authors

Dorokhov Maksim Anatol'yevich, Master of Science, Doctoral 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

Agaltsov Gennady Nikolaevich, Master of Science, 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, ag.gena@gmail.com

Novikova Alina Vyacheslavovna, Master of Science, Junior Researcher in Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machines, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the

Kalgankov Evgeniy Vasilyevich, Doctoral 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, vita.igtm@gmail.com

Tsanidy Ivan Nikolaevich, Doctoral 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, vita.igtm@gmail.com

Cherniy Alexandr Anatolyevich, Master of Science, Senior Teacher, Dnepropetrovsk State Agrarian and Economic University (DSAEU), Dnepropetrovsk, Ukraine, sanek20.1984@gmail.com

Lutsenko Sergey Nikolayevich, Doctoral 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, vita.igtm@gmail.com

Анотація. Розглядається методика визначення реологічних характеристик гум, що включає: вибір марки гуми; визначення квазістатичних характеристик гумових зразків; визначення динамічних характеристик зразків. Розглядаються два методи визначення реологічних параметрів гумових елементів: перший метод заснований на використанні релаксаційного піку на частотній залежності коефіцієнта поглинання матеріалу; другий метод передбачає використання параметрів петлі гістерезису, що реєструються в широкому діапазоні змін навантаження. Показано, що для гум, що використовуються для виготовлення силових елементів, найбільш придатною є чотирипараметрична дрібно-експоненційна функція Работнова; при наповненні гуми понад 65 мас.ч. технічним вуглецем необхідно використовувати β -метод.

Ключові слова: гума, реологія, ядро Работнова, пружний потенціал

Abstract. A technique of determining rubber rheological properties are considered including: selection of rubber stamps; definition of quasi-static characteristics of the rubber samples; determining of the sample dynamic characteristics. Two methods are considered for determining the rubber element rheological properties: the first method uses relaxation peak of the frequency dependence of the material absorption coefficient; the second method applies hysteresis loop parameters recorded in the wide range of the loading changes. It is shown that the Rabotnov four-parametric fraction-exponential function is the most appropriate for rubber used in load-bearing element production; and β -method should be used when carbon part in the rubber is more than 65 parts by weight.

Keywords: rubber, rheology, Rabotnov's kernel, elastic potential

Стаття поступила в редакцію 03.03.2015

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук, проф. В.И. Дырдой