

УДК 539.51

DOI 10.46960/1816-210X_2025_4_121
EDN BORDNL

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ И ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛЕЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ НЕКОТОРЫХ РЕЗИН, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ

А.А. СуховORCID: 0009-0003-8491-1791 e-mail: asukhov95@yandex.ru

Российский федеральный ядерный центр –

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики
*Саров, Россия***В.А. Кузьмин**ORCID: 0000-0001-9958-527X e-mail v_a_kuzmin@mail.ru

Российский федеральный ядерный центр –

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики
*Саров, Россия***Д.В. Пресняков**ORCID: 0009-0007-1225-084X e-mail: presnyakov.diman@yandex.ru

Российский федеральный ядерный центр –

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики
*Саров, Россия***В.А. Кикеев**ORCID: 0000-0002-2375-0803 e-mail: kikeev.va@nntu.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Исследованы модели деформирования некоторых марок резин ТМКЩ-М-6, ТМКЩ-С-20, НО-68-ИНТА, наиболее часто используемых в конструкциях автомобилей, тракторов, подъемно-транспортных, строительных, дорожных, коммунальных машин, вспомогательного транспортно-технологического оборудования. Проведена верификация их параметров для численного моделирования динамики и прочности при механических воздействиях. Экспериментальные характеристики при сжатии исследуемых марок резин получены на испытательном стенде с использованием программ численного моделирования. Приведены параметры моделей деформирования рассматриваемых марок резин. Результаты работы могут быть использованы для расчета и проектирования транспортно-технологических средств и их комплексов.

Ключевые слова: механические характеристики конструкционных материалов транспортных средств; модели материалов транспортно-технологических комплексов; численное моделирование; опыт на сжатие; диаграмма напряжение-деформация; оценка износостойкости.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Сухов, А.А. Определение механических свойств материалов и параметров моделей деформирования некоторых резин, используемых в транспортно-технологических комплексах / А.А. Сухов, В.А. Кузьмин, Д.В. Пресняков, В.А. Кикеев // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2025. № 4. С. 121-130. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_4_121 EDN: BORDNL

DETERMINATION OF MATERIAL MECHANICAL PROPERTIES AND DEFORMATION MODELS PARAMETERS OF SOME RUBBERS USED IN TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL COMPLEXES

A.A. Sukhov

ORCID: 0009-0003-8491-1791 e-mail: asukhov95@yandex.ru

Russian Federal Nuclear Center – The All-Russian Research Institute of Experimental Physics
Sarov, Russia

V.A. Kuzmin

ORCID: 0000-0001-9958-527X e-mail v_a_kuzmin@mail.ru

Russian Federal Nuclear Center – The All-Russian Research Institute of Experimental Physics
Sarov, Russia

D.V. Presnyakov

ORCID: 0009-0007-1225-084X e-mail: presnyakov.diman@yandex.ru

Russian Federal Nuclear Center – The All-Russian Research Institute of Experimental Physics
Sarov, Russia

V.A. Kikeev

ORCID: 0000-0002-2375-0803 e-mail: kikeev.va@nntu.ru

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article presents studies of deformation models of some brands of rubbers TMKSh-M-6, TMKSh-S-20, NO-68-1NTA, most often used in the designs of cars, tractors, lifting and transport, construction, road, municipal vehicles, auxiliary transport and technological equipment. Their parameters were verified for numerical modeling of dynamics and strength under mechanical influences. Experimental compression characteristics of the studied rubber brands were obtained on a test bench using numerical simulation software. The parameters of the deformation models of the rubber brands under consideration were obtained. The results can be used for the calculation and design of transport and technological vehicles and their complexes.

Key words: mechanical characteristics of vehicle structural materials; models of materials for transport and technological complexes; numerical modeling; compression test; stress-strain diagram; wear resistance assessment.

FOR CITATION: A.A. Sukhov, V.A. Kuzmin, D.V. Presnyakov, and V.A. Kikeev. Determination of material mechanical properties and deformation models parameters of some rubbers used in transport and technological complexes. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2025. № 4. Pp. 121-130. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_4_121 EDN: BORDNL

Введение

Экспериментальные методы исследования свойств материалов являются важной составляющей процессов расчета и проектирования транспортно-технологических средств и их комплексов. Они часто выступают единственным источником информации о механических характеристиках конструкционных материалов, на основе которых проводится оценка поведения материалов в условиях реальной эксплуатации, их прочности, износостойкости, долговечности. Основная цель настоящей работы – исследование моделей деформирования при механических воздействиях марок резин, наиболее часто используемых в различных транспортно-технологических комплексах [1-11], в частности, в конструкциях подъемно-транспортных, строительных, дорожных, коммунальных машин, автомобилей, тракторов, вспомогательного транспортно-технологического оборудования. Как конструкционный материал резина имеет широкое распространение в транспортных средствах и их комплексах благодаря ряду свойств, выгодно отличающих ее от традиционных материалов (металлы и

жесткие пластики). К положительным качествам резины следует отнести ее большую энергоемкость; значительные обратимые деформации; хорошую перерабатываемость и легкость изготовления деталей, особенно в серийном производстве; высокую долговечность при циклическом нагружении; высокие демпфирующие и звукопоглощающие свойства [12-14].

Резины ТМКЩ (тепломорозокислотощелочейстойкие) являются высокоустойчивыми к воздействию температур, кислот и щелочей, а также механическим (ударным, деформационным, фрикционным, вибрационным) нагрузкам. Их используют для производства уплотнений неподвижных соединений (подкладок, прокладок), уплотнений, а также антифрикционных элементов, предотвращающих трение между металлическими деталями транспортных средств. Резиновая смесь НО-68-1 НТА используется для изготовления таких видов изделий как амортизаторы, уплотнители, а также шланги, рукава, трубки. Изделия из НО-68-1-НТА можно использовать для технических масел, бензинов и различных видов топлива, что является значимым аргументом для использования данного материала при изготовлении элементов конструкции транспортных средств. Также из данного материала изготавливаются транспортерные ленты.

Теоретические сведения

Для описания деформирования такого материала, как резина, необходимо использовать специальные модели гиперупругих материалов. Среди наиболее распространенных моделей гиперупругих материалов – модель Огдена, модель Муни-Ривлина и их модификации.

Модель Огдена – это модель гиперупругого материала, используемая для описания нелинейного поведения сложных материалов (каучуки, полимеры и биологические ткани) в условиях напряжения-деформации. Она была разработана Рэймондом Огденом в 1972 г. Как и другие модели гиперупругих материалов, она предполагает, что поведение материала может быть описано с помощью функции плотности энергии деформации, из которой могут быть выведены зависимости напряжение–деформация.

Потенциальная энергия деформации равна:

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} \left(\bar{\lambda}_1^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_2^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_3^{\alpha_i} - 3 \right) + \sum_{k=1}^N \frac{1}{d_k} (J - 1)^{2k}$$

где W – потенциальная энергия деформации;

$\bar{\lambda}_p$ ($p=1,2,3$) – главные девиаторы растяжения, определяемые как $\bar{\lambda}_p = J^{-\frac{1}{3}} \lambda_p$;

λ_p – главные растяжения левого тензора Коши-Грина;

J – детерминант градиента упругой деформации;

N , μ_p , α_p и d_p – константы материала.

Ограничений для константы N нет. Однако более высокое значение N может обеспечить лучшее соответствие точному решению, но это может вызвать численные трудности при подборе констант. Поэтому очень высокое значение N не рекомендуется.

Начальный модуль сдвига μ определяется по формуле:

$$\mu = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \alpha_i \mu_i$$

Начальный объемный модуль K определяется по формуле:

$$K = \frac{2}{d_1}$$

Для $N=1$ и $\alpha_1=2$, модель Огдена эквивалентна модели Гука. Для $N=2$, $\alpha_1=2$ и $\alpha_2=-2$ модель Огдена эквивалентна модели Муни-Ривлина с двумя параметрами.

Проведение эксперимента для определения механических характеристик резины

При испытаниях на сжатие использовалось по три образца на каждую из марок резины. Образец резины для сжатия имеет форму цилиндра. В табл. 1 приведены размеры и материалы резины. Определение характеристик при сжатии проведено по ГОСТ 265-77.

Таблица 1.

Размеры и материалы образцов резины для испытания на сжатие

Table 1.

Dimensions and materials of rubber specimens for compression testing

Материал	Диаметр d , мм	Высота h , мм
Пластина ПФ 500x500x20 НО-68-НТА ТУ 38 1051959-90	30	13
Пластина 2Н-1-ТМКЩ-М-6 ГОСТ 7338-90	30	13
Пластина 2Н-1-ТМКЩ-С-20 ГОСТ 7338-90	30	13

Усредненная диаграмма «нагрузка – перемещение» для испытанных марок резин при сжатии показана на рис. 1.

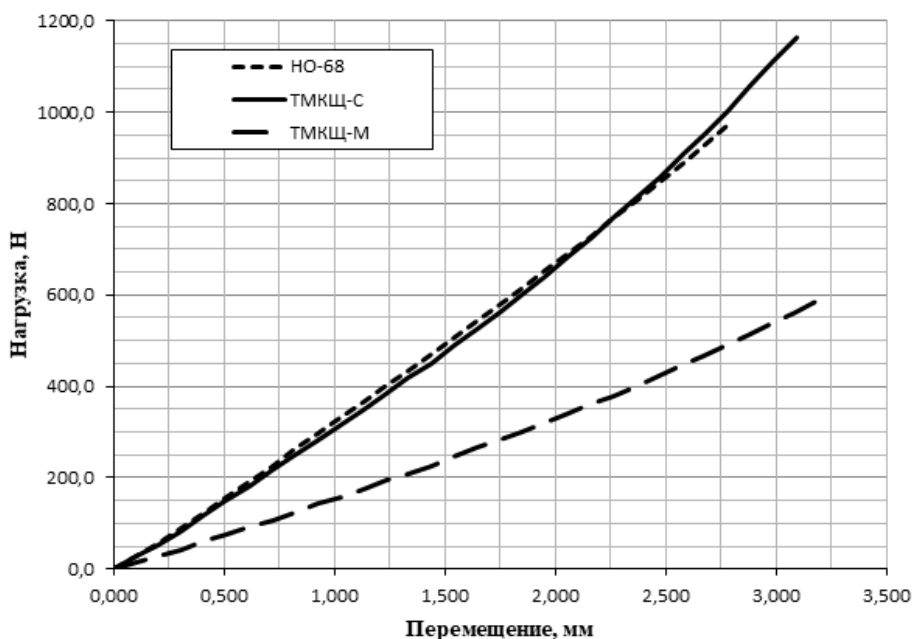


Рис. 1. Усредненные диаграммы для резин при испытании на сжатие

Fig. 1. Average diagrams for rubbers under compression testing

Проведение численного моделирования

Был проведен анализ ряда моделей гиперупругого деформирования материалов: Arruda-Boyce, Blatz-Ko, Gent, Neo-Hookean, Ogden 1st Order, Yeoh 1st Order. В результате обработки экспериментальных данных (рис. 1) для рассматриваемых марок резины были определены параметры указанных выше моделей деформирования. Численное моделирование с целью верификации моделей деформирования материалов по результатам экспериментов проводилось в современном программном комплексе. Учитывая осевую симметрию конструкции, при проведении расчета рассматривали $1/4$ часть конструкции с заданием соответствующих граничных условий.

Расчетная модель представляет собой образец резины, зажатый с двух сторон цилиндрами из стали. Контактное взаимодействие резины со стальными цилиндрами с двух сторон задавалась линейным контактом. В процессе моделирования один из стальных цилиндров

был зафиксирован в результате запрета перемещений вдоль оси. Узлам второго цилиндра задавалось соответствующее эксперименту перемещение. В качестве модели деформирования стальных цилиндров принята упругая модель: модуль упругости $E=2,1 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu=0,3$. В результате численного моделирования были получены результаты конечно-элементного моделирования сжатия резины. На рис. 2-4 показаны графики «нагрузка-перемещение» для рассматриваемых марок резин. Кривые результатов для моделей материалов Gent, Neo-Hookean и Yeoh 1st Order совпадают.

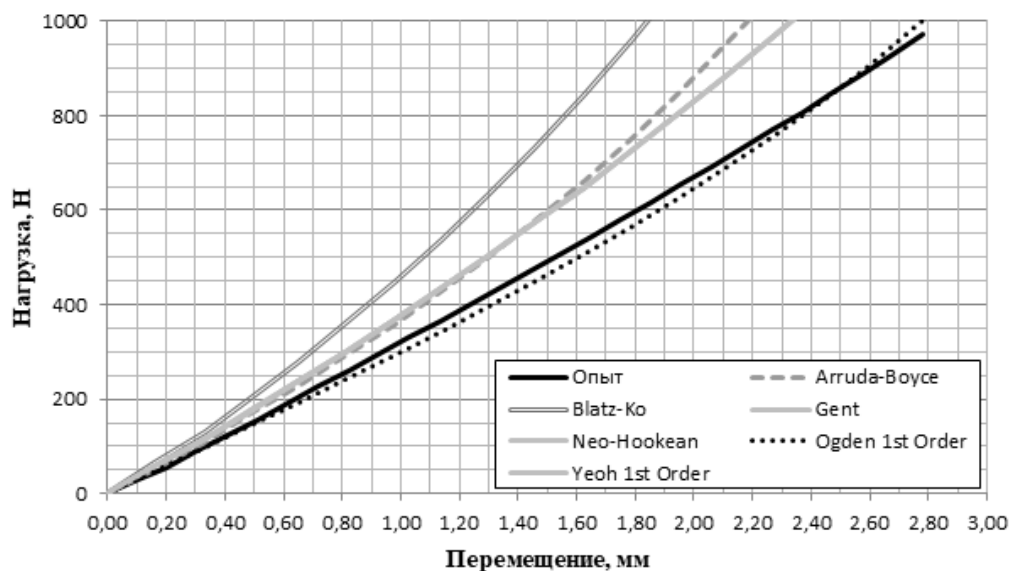


Рис. 2. Диаграмма «нагрузка – перемещение» для материала NO-68 при моделировании сжатия
 Fig. 2. Load-displacement diagram for NO-68 material during compression simulation

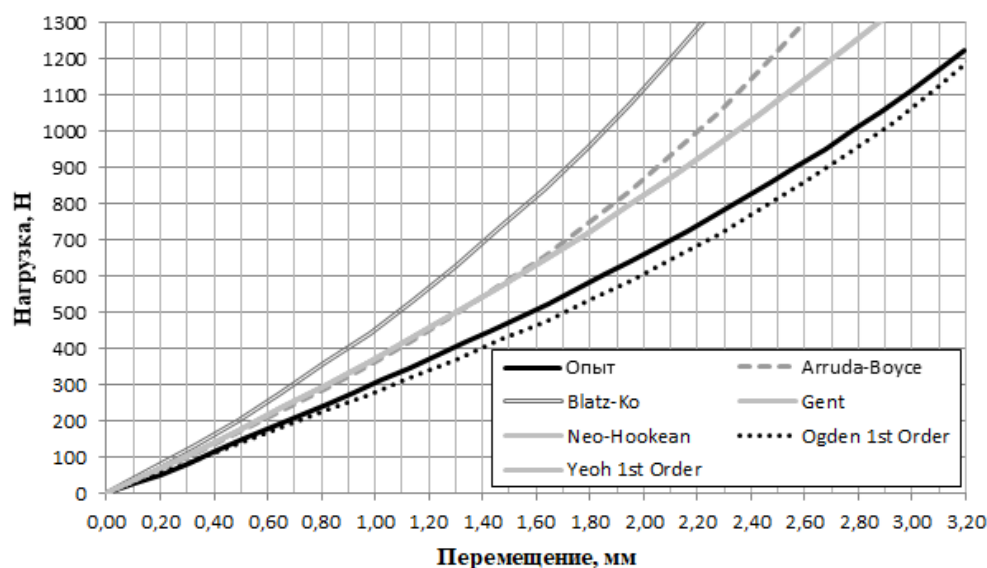


Рис. 3. Диаграмма «нагрузка – перемещение» для материала ТМКШ-С при моделировании сжатия

Fig. 3. Load-displacement diagram for TMKSh-S material during compression simulation

Исходя из данных численного моделирования, можно отметить, что при использовании модели Ogden 1st Order с определенными параметрами модели деформирования получено лучшее согласование с экспериментальными данными. Используемые параметры модели Ogden 1st Order для различных марок резин приведены в табл. 2. Максимальная относитель-

ная разница результатов численного моделирования и экспериментальных данных составляет: для резины НО-68 – не более 6,7 %, для резины ТМКЩ-С – не более 9,7 %, для резины ТМКЩ-М – не более 5,6 %.

Таблица 2.
Коэффициенты модели материала Ogden 1st Order

Table 2.
Ogden 1st Order material model coefficients

Марка резины	μ , МПа	A1	D1, МПа ⁻¹
НО-68	0,58121	6,7381	0
ТМКЩ-С	0,49512	7,4561	0
ТМКЩ-М	0,28608	6,7283	0

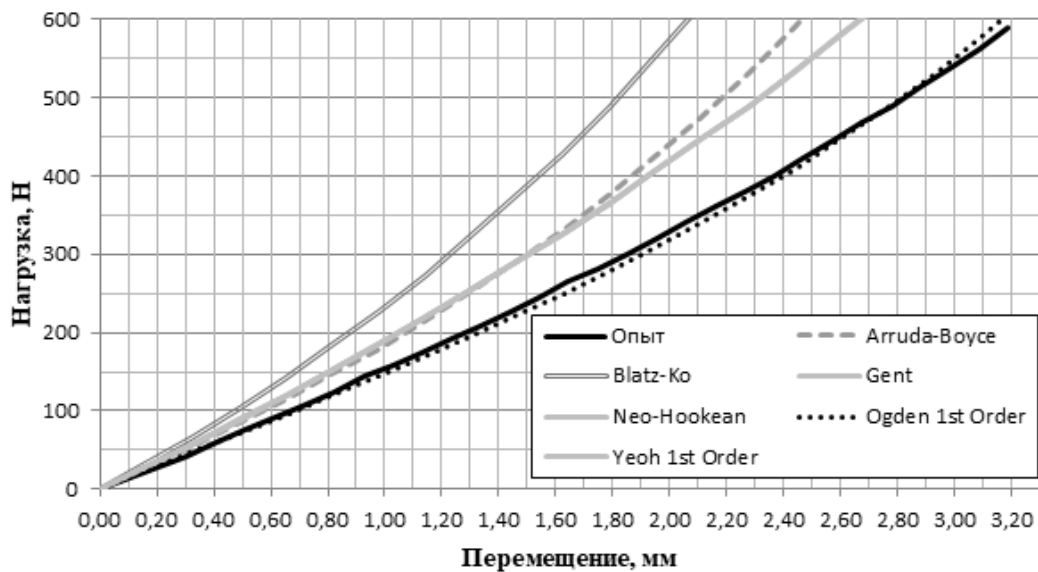


Рис. 4. Диаграмма «нагрузка – перемещение»
для материала ТМКЩ-М при моделировании сжатия

Fig. 4. Load-displacement diagram for TMKSh-M material during compression simulation

Дополнительно проводился эксперимент по вдавливанию стального шара в круглую пластинку из резины марок НО-68, ТМКЩ-С, ТМКЩ-М с целью валидации полученных параметров модели деформирования материала Ogden 1st Order. Диаметр стального шара 22 мм; размеры образцов и материалы резины приведены ранее в табл. 1. В результате эксперимента были получены диаграммы «нагрузка-перемещение» для каждой марки резины (рис. 5). Учитывая осевую симметрию конструкции, при проведении расчета рассматривалась $\frac{1}{4}$ часть конструкции с заданием соответствующих граничных условий. Расчетная модель представляет собой сборку, состоящую из стального цилиндра, с расположенным сверху образцом резины, на котором располагается стальной шарик. Нагружение осуществляется вдавливанием стального шарика в образец. Контактное взаимодействие резины с цилиндром и шаром задавалось линейным контактом. Контактное взаимодействие резины со стальным шаром задавалось с трением. Коэффициент трения, принятый в расчетах, задавался равным 0,49. В качестве модели деформирования стальных цилиндра и шарика принята упругая модель: модуль упругости $E=2,1 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu=0,3$.

По условиям эксперимента до начала нагружения шарик прижимался к образцу резины. Поджатие осуществлялось вдавливанием шарика в резину на величину 0,2 мм. Поэтому общее перемещение шарика при моделировании задавалось 3,45 мм. При обработке результатов начальное поджатие вычиталось. В результате проведенного численного моделирования были получены графики «нагрузка-перемещение» для рассматриваемых марок резины

(рис. 6-8). Максимальная относительная разница результатов численного моделирования и экспериментальных данных получилась с использованием модели Ogden 1st Order: для резины НО-68 – не более 14 %, для ТМКЩ-С – не более 17 %, для ТМКЩ-М – не более 8 %.

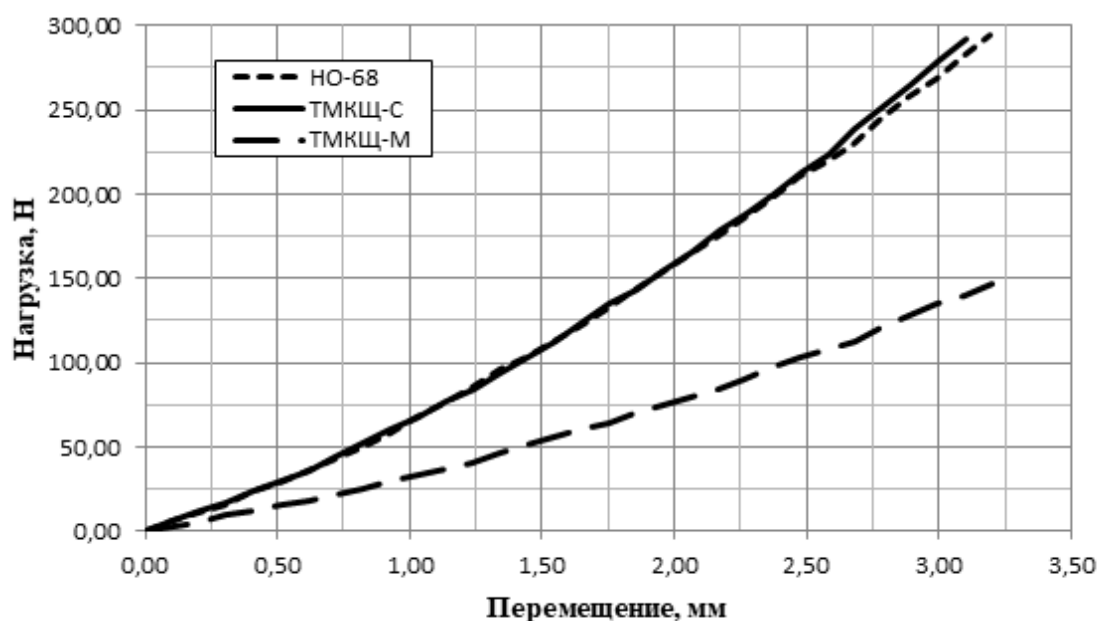


Рис. 5. Усредненная диаграмма «нагрузка – перемещение» для резин при испытании на вдавливание

Fig. 5. Average load-displacement diagram for rubbers in indentation testing

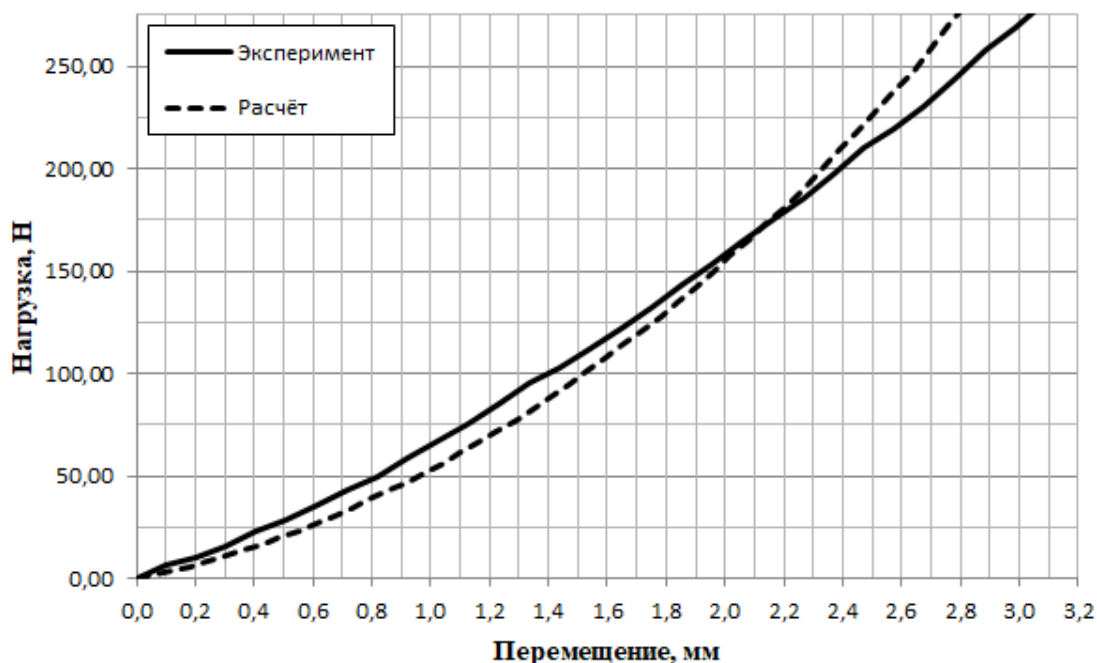


Рис. 6. Диаграмма «нагрузка – перемещение» для материала НО-68 при моделировании вдавливания шарика

Fig. 6. Load-displacement diagram for NO-68 material when simulating ball indentation

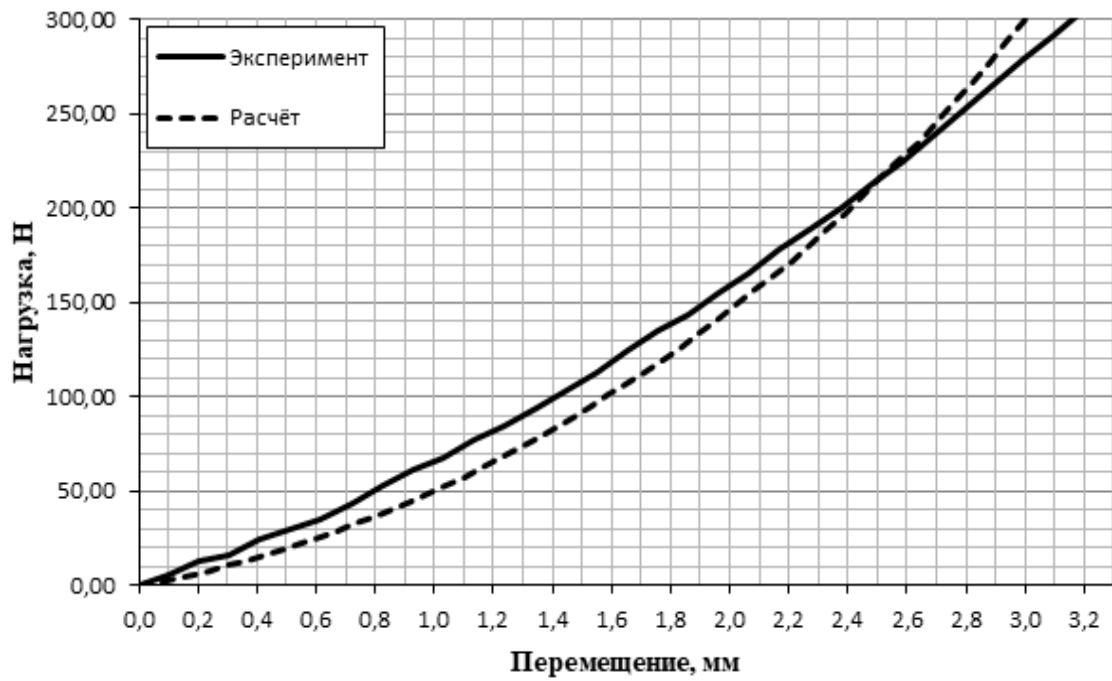


Рис. 7. Диаграмма «нагрузка – перемещение» для материала ТМКШ-С при моделировании вдавливания шарика

Fig. 7. Load-displacement diagram for TMKSh-S material when simulating ball indentation

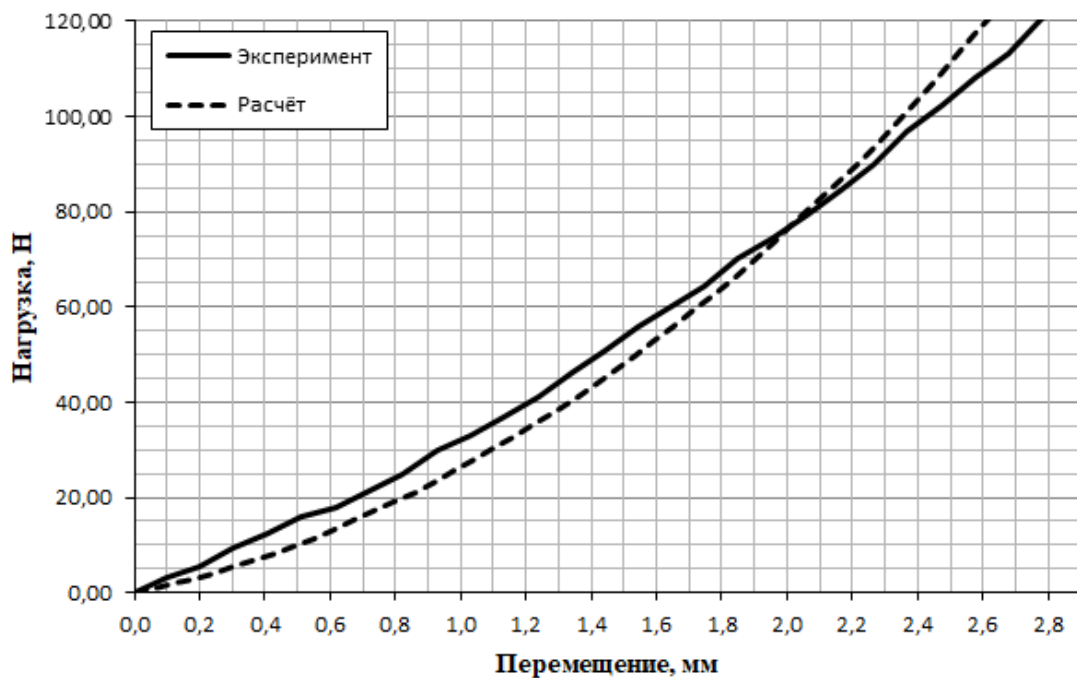


Рис. 8. Диаграмма «нагрузка – перемещение» для материала ТМКШ-М при моделировании вдавливания шарика

Fig. 8. Load-displacement diagram for TMKSh-M material when simulating ball indentation

Таким образом, получено хорошее согласование расчетных и экспериментальных данных.

Выводы

В данной работе представлены результаты экспериментов по сжатию резин марок ТМКЩ-М-6, ТМКЩ-С-20, НО-68-1НТА, часто используемых в различных транспортно-технологических комплексах. На основе экспериментальных данных получены параметры моделей деформирования рассматриваемых марок резин. Данные модели позволяют в дальнейшем проводить численные исследования по оценке поведения деталей машин в условиях эксплуатационного нагружения без проведения экспериментов, зачастую длительных и дорогостоящих. Проведена верификация и валидация моделей деформирования по результатам экспериментов.

По результатам численного моделирования деформирования модель Ogden 1st Order с определенными для каждой марки резины параметрами показала лучшее согласование с экспериментальными данными. Относительная разница результатов численного моделирования сжатия резины и экспериментальных данных составляет: для резины НО-68 – не более 6,7 %, для резины ТМКЩ-С – не более 9,7 %, для резины ТМКЩ-М – не более 5,6 %. Дополнительно был проведен эксперимент по вдавливанию стального шарика в резины марок НО-68, ТМКЩ-С, ТМКЩ-М с целью валидации полученной модели материала Ogden 1st Order

Относительная разница результатов численного моделирования вдавливания шарика и экспериментальных данных составляет: для резины НО-68 составила не более 14 %, для ТМКЩ-С – не более 17 %, для ТМКЩ-М – не более 8 %.

Библиографический список

1. **Бидерман, В.Л.** Автомобильные шины / В.Л. Бидерман [и др.]. – М.: Гос. науч.-техн. изд. хим. литературы, 1963. – 384 с.
2. **Цукерберг, С.М.** Пневматические шины / С.М. Цукерберг [и др.]. – М.: Химия, 1973. – 264 с.
3. **Тарковский, В.Н.** Автомобильные шины / В.Н. Тарковский, В.А. Гудков, О.Б. Третьяков. – М.: Транспорт, 1990. – 217 с.
4. **Власов, Г.Я.** Основы технологии шинного производства / Г.Я. Власов [и др.]. – Воронеж: Воронеж. гос. технол. акад., 2002. – 460 с.
5. **Бакфиш, К.** Новая книга о шинах / К. Бакфиш, Д. Хайнц. – М.: Астрель: АСТ, 2003. – 303 с.
6. **Алексеев, А.М.** Судовые виброгасители / А.М. Алексеев, А.К. Сборовский. – Л.: Судпромгиз, 1962. – 196 с.
7. **Алексеев, П.С.** Схемно-технические решения и экспериментальные исследования виброизолятора с преобразованием движения инерционных элементов / П.С. Алексеев, А.В. Синев, О.О. Мугин // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2012. – № 1. – С. 96-101.
8. **Шилько, С.В.** Расчет вязкоупругих и термомеханических параметров шинных резин по результатам динамических испытаний / С.В. Шилько, Д.А. Черноус, А.В. Хотько, А.П. Сазанков, С.Н. Бухаров // Механика машин, механизмов и материалов. – 2022. – № 2 (59). – С. 24–30.
9. **Ghoreishy Mir Hamid Reza.** Determination of the parameters of the Prony series in hyper-viscoelastic material models using the finite element method / Mir Hamid Reza Ghoreishy // Materials and Design. – 2012. – Vol. 35. – P. 791-797.
10. **Гамлицкий, Ю.А.** Прочность резины. Модель и расчет / Ю.А. Гамлицкий, М.В. Швичич // Высокмолекулярные соединения. Серия А. – 2005. – Т. 47, № 4. – С. 660-668.
11. **Третьякова, Н.А.** Увеличение стойкости резинокордных изделий к воздействию внешних факторов морского климата / Н.А. Третьякова // Промышленное производство и использование эластомеров. – 2018. – № 3. – С. 43-46.
12. **Дырда, В.И.** Резиновые элементы вибрационных машин (Конструкция. Прикладные методы расчетов) / В.И. Дырда. – Киев: Наукова думка, 1980. – 100 с.
13. **Григорьев, Е.Т.** Расчет и конструирование резиновых амортизаторов / Е.Т. Григорьев. – М.: Гос. науч.-тех. издательство машиностроительной литературы, 1960. – 160 с.
14. **Ляпунов, В.Т.** Резиновые виброизоляторы: Справочник / В.Т. Ляпунов, Э.Э. Лавендел, С.А. Шляпочников. – Л.: Судостроение, 1988. – 216 с.

References

1. Biderman V.L. [et al.]. 1963. *Avtomobil'nye shiny* [Automobile Tires]. Moscow: Gos. nauch.-tekhn. izd. khim. literatury.
2. Tsukerberg S.M. [et al.]. 1973. *Pnevmaticheskie shiny* [Pneumatic Tires]. Moscow: Khimiia.
3. Tarkovskii V.N., Gudkov V.A. and O.B. Tret'iakov. 1990. *Avtomobil'nye shiny* [Automobile Tires]. Moscow: Transport.
4. Vlasov G.Ia. [et al.]. 2002. *Osnovy tekhnologii shinnogo proizvodstva* [Fundamentals of Tire Manufacturing Technology]. Voronezh: Voronezh. gos. tekhnol. akad.
5. Bakfish K. and Khaïnts D. 2003. *Novaia kniga o shinakh* [The New Book About Tires]. Moscow: Astrel': AST.
6. Alekseev A.M. and Sborovskii A.K. 1962. *Sudovye vibrogasiteli* [Marine Vibration Dampers]. Leningrad: Sudpromgiz.
7. Alekseev P.S., Sinev A.V. and Mugin O.O. 2012. "Skhemno-tekhnicheskie resheniia i eksperimental'nye issledovaniia vibroizoliatora s preobrazovaniem dvizheniia inertsionnykh elementov" [Circuit-Technical Solutions and Experimental Studies of a Vibration Isolator with Motion Transformation of Inertial Elements]. *Problemy mashinostroeniia i nadezhnosti mashin* [Journal of Machinery Manufacture and Reliability], no. 1: 96-101.
8. Shilko S.V., Chernous D.A., Khotko A.V., Sazankov A.P., and Bukharov, S. N. 2022. "Raschet vyazkouprugikh i termomekhanicheskikh parametrov shinnykh rezin po rezul'tatam dinamicheskikh ispytaniy" [Calculation of viscoelastic and thermomechanical parameters of tire rubbers based on dynamic tests results]. *Mekhanika Mashin, Mekhanizmov i Materialov*, no. 2(59): 24-30.
9. Ghoreishy M.H.R. 2012. Determination of the parameters of the Prony series in hyper-viscoelastic material models using the finite element method. *Materials and Design*, no. 35: 791-797. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.10.005>
10. Gamilitskiy Y.A. and Shvichich M.V. 2005. "Prochnost' reziny. Model' i raschet" [Strength of rubber. Model and calculation]. *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya A* [Polymer Science. Series A], no. 47(4): 660-668.
11. Tret'iakova N.A. 2018. "Uvelichenie stoikosti rezinokordnykh izdelii k vozdeistviu vneshnikh faktorov morskogo klimata" [Increasing the Resistance of Rubber-Cord Products to External Factors of Marine Climate]. *Promyshlennoe proizvodstvo i ispol'zovanie elastomerov* [Industrial Production and Use of Elastomers], no. 3: 43-46.
12. Dyrda V.I. 1980. *Rezinovye elementy vibratsionnykh mashin (Konstruktsiia. Prikladnye metody raschetov)* [Rubber Elements of Vibration Machines (Design. Applied Calculation Methods)]. Kiev: Naukova dumka.
13. Grigor'ev E.T. 1960. *Raschet i konstruirovaniye rezinovykh amortizatorov* [Calculation and Design of Rubber Shock Absorbers]. Moscow: Gos. nauch.-tekhn. izdatel'stvo mashinostroitel'noi literatury.
14. Liapunov V.T., Lavendel E.E. and Shliapochnikov S.A. 1988. *Rezinovye vibroizoliatory: Spravochnik* [Rubber Vibration Isolators: A Handbook]. Leningrad: Sudostroenie.

**Дата поступления
в редакцию: 05.02.2024**

**Дата принятия
к публикации: 27.10.2025**