



Применение расчетно-экспериментального метода анализа сложнонапряженного состояния резиновых мембран для эффективных решений их производства

Дмитрий В. Куделин¹ kvmbaikal@ya.ru  0000-0002-5124-1168
Татьяна Н. Несиоловская² nesiolovskayatn@ystu.ru  0000-0003-2024-6625



1 ООО «Научно-технический центр «Интайр», ул. Советская, 81, г. Ярославль, 150003, Россия

2 Ярославский государственный технический университет, Московский пр-т, 88, г. Ярославль, 150023, Россия

Аннотация. Конкурентоспособность резиновых мембран во многом определяется их долговечностью, качеством, надежностью, в том числе и временем необходимым на создание. В процессе эксплуатации мембраны подвергаются сложным деформациям, вследствие чего возникает большое количество зон потенциальных разрушений различного характера, которые могут приводить к выходу изделия из строя. В тоже время, стандартные методы испытаний, используемые при разработке рецептур для мембран, в большинстве случаев предполагают испытание материала в условиях простого одноосного растяжения и не учитывают реальные условия нагружения изделия при эксплуатации, что существенно увеличивает сроки отработки новых рецептур для мембран. Для решения данной проблемы в работе представлен и применен на практике расчетно-экспериментальный метод анализа сложнонапряженного состояния резиновых мембран, включающий проведение простых лабораторных испытаний в неоднородном сложнонапряженном состоянии, реализующемся при эксплуатации резиновых мембран, и анализ напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов. Неоднородное сложнонапряженное состояние реализовывалось путем продавливания резиновой мембраны шарообразным индентором. Рассмотрено применение расчетно-экспериментального метода анализа сложнонапряженного состояния резиновых мембран на примере цельнорезиновой гофрированной мембраны автоматического клапана системы продувки рукавных фильтров. Проведена оценка физико-механических свойств резин в неоднородном сложнонапряженном состоянии, а также анализ напряженно-деформированного состояния мембраны при её нагружении сферическим индентором, позволивший выявить наиболее опасные зоны сечения. Комплексное использование расчетного и экспериментального метода анализа сложнонапряженного состояния позволило улучшить ресурс данной гофрированной мембраны на тридцать пять процентов по сравнению с эталоном при этом сократить сроки создания.

Ключевые слова: резиновая мембрана, метод анализа, неоднородное сложнонапряженное состояние, индентирование

Application of a computational and experimental method of analysis the complexly stressed state of rubber membranes for effective solutions for their production

Dmitry V. Kudelin¹ kvmbaikal@ya.ru  0000-0002-5124-1168
Tatyana N. Nesiolovskaya² nesiolovskayatn@ystu.ru  0000-0003-2024-6625

1 Research and Development center "Intire" LLC, Sovetskaya Str., 81, Yaroslavl, 150003, Russia

2 Yaroslavl Technical State University, Moskovsky Av., 88, Yaroslavl, 150023, Russia

Abstract. The competitiveness of rubber membranes determined by their durability, quality, reliability, including the time required to create. During operation, the membranes undergo complex deformations, as a result of which a large number of potential destruction zones of a different nature arise, which can lead to the failure of the product. The standard test methods used in the development of formulations for membranes involve testing the material under uniaxial tension conditions in most cases and do not take into account the actual loading conditions of the product during operation, which significantly increases the development time of new formulations for membranes. The paper presents and applies in practice a computational and experimental method of analysis the complexly stressed state of rubber membranes, including carrying out simple laboratory tests in a heterogeneous complexly stressed state, which is realized during the operation of rubber membranes, and analyzing the stress-strain state by the finite element method. An inhomogeneous complexly stressed state was realized by forcing the rubber membrane with a spherical indenter. The application of a computational-experimental method for analyzing the complexly stressed state of rubber membranes is considered on the example of a rubber corrugated membrane of an automatic valve of a bag filter purge system. An assessment of the physical and mechanical properties of rubbers in a heterogeneous complexly stressed state was carried out, as well as an analysis of the stress-strain state of the membrane when it was loaded with a spherical indenter, which made it possible to identify the most dangerous zones of the section. The complex use of this method made it possible to improve the resource of this corrugated membrane by thirty five percent in comparison with the standard, while reducing the creation time.

Keywords: rubber membrane, analysis method, heterogeneous complex stress state, indentation

Для цитирования

Куделин Д.В., Несиоловская Т.Н. Применение расчетно-экспериментального метода анализа сложнонапряженного состояния резиновых мембран для эффективных решений их производства // Вестник ВГУИТ. 2021. Т. 83. № 2. С. 230–236. doi:10.20914/2310-1202-2021-2-230-236

For citation

Kudelin D.V., Nesiolovskaya T.N. Application of a computational and experimental method of analysis the complexly stressed state of rubber membranes for effective solutions for their production. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2021. vol. 83. no. 2. pp. 230–236. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2021-2-230-236

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Резиновые мембраны нашли широкое применение в различных отраслях промышленности и в настоящее время область их использования постоянно расширяется. На практике существуют тысячи рецептов резиновых мембран, нередко на основе дорогостоящих каучуков, что связано с разнообразными условиями их эксплуатации и спектром предъявляемых к ним требований [1].

Конкурентоспособность создаваемого изделия, в том числе мембран, определяется совокупностью факторов [2-5]:

- качеством, в том числе требуемыми техническими характеристиками;
- стоимостью, в том числе возможностью производства из доступных материалов;
- сроками, в том числе временем от момента начала проектирования до поступления готовой продукции заказчику.

Существующий процесс создания резиновых мембран является ресурсоемким, т. к. требует проведения большого массива экспериментальных исследований. Кроме того, стандартные лабораторные испытания, которые используются при разработке рецептуры резин, не отражают неоднородное сложнапряженное состояние, характерное для реальных условий эксплуатации мембран [6].

Поскольку производство новых изделий с заданными характеристиками в современных реалиях происходит в условиях дефицита времени, а также материальных и финансовых ресурсов, то в соответствии с ГОСТ Р 54869–2011, РМВОК и PRINCE2 [7-8] процесс создания резиновых мембран, являющийся инженерным творчеством, можно рассматривать как проектное решение, т. е. комплекс взаимосвязанных мероприятий, направленный на создание уникального продукта или услуги в условиях временных и ресурсных ограничений.

Для реализации проектных решений, обеспечивающих конкурентоспособность резиновых мембран, был разработан новый подход к процессу их создания, включающий как проведение простых лабораторных испытаний, позволяющих моделировать поведение мембран в условиях эксплуатации, так и анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) с применением корректных физических моделей, максимально учитывающих характеристики резин и их изменение в процессе эксплуатации [9].

Методы исследований

Для создания резиновых мембран необходимо обоснованно подойти к выбору методов их испытания. К методам испытаний предъявляются следующие требования:

— условия испытания образца должны отражать реальные условия нагружения изделия и обеспечивать высокую точность и достоверность результатов;

— на одном типе образца можно определить не только деформационные, но и предельные характеристики материала;

— испытания можно проводить на существующем стандартном оборудовании с применением недорогих адаптированных приставок.

Данным требованиям полностью удовлетворяет метод продавливания резиновой мембраны стальным шарообразным индентором [10]. Авторы метода изучали механизм разрушения протекторных резин при движении по гравийной дороге, поэтому использовали сферический индентор малого диаметра, а также цилиндрический индентор и индентор в виде призмы с целью реализации разрушения образца в виде прокола. В настоящей работе требовалось оценить физико-механические характеристики резин для мембран, а также их напряженно-деформированное состояние, поэтому методы по оценке прочности и сопротивления раздиру были соответствующим образом адаптированы, в частности увеличен диаметр индентора [9]. Индентор цилиндрической формы и в форме призмы были исключены из дальнейших исследований.

Предлагаемые методики испытания резин в неоднородном сложнапряженном состоянии просты в аппаратном исполнении (рисунок 1) и обеспечивают высокую воспроизводимость результатов.

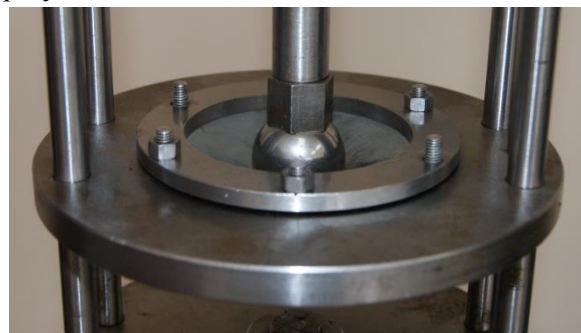


Рисунок 1. Нагружение резиновой мембраны шарообразным индентором

Figure 1. Loading of rubber membrane with a spherical indenter

При продавливании мембраны индентором возникает неоднородное сложнапряженное состояние, поэтому определить значения прочностных показателей на основании только экспериментальных данных невозможно. Решить данную проблему можно путем численного моделирования [11-14] процесса нагружения резиновой мембраны сферическим индентором.

На основании анализа напряженно-деформированного состояния резиновых мембран (рисунок 2), реализующегося при нагружении их шарообразным индентором, сформулирован критерий для прогнозирования прочности и выбрано уравнение состояния материала, адекватно отражающее его механические свойства (1).

$$F(S_1, S_2) = aS_1 + (1-a)S_2 = C, \quad (1)$$

где S_1 и S_2 – первый и второй инварианты тензора напряжений; a и C – экспериментально определяемые коэффициенты: $C = f_p a$ – характеризует прочность материала, МПа; f_p – условная прочность при одноосном растяжении, МПа; $a = S_2 / (f_p + S_2 - S_1)$ – характеризует относительный вклад первого инварианта (нормальных напряжений) в прочность, соответственно, $(1-a)$ характеризует стойкость к напряжениям, связанным с изменением формы.

Комплексное использование теоретического и экспериментального подходов является необходимым ресурсом для решения задачи создания резиновых мембран с заданными характеристиками.

Результаты

Данный подход рассмотрен на примере создания цельнорезиновой гофрированной мембраны автоматического клапана продувки рукавных фильтров.

Ресурс имеющихся мембран не отвечал требованиям потребителя.

Особенности работы изделия:

- мембрана подвергается статическим деформациям $\sim 20 \div 30\%$;
- в пневмолиниях, где эксплуатируется мембрана, возможно наличие паров масла;
- в процессе эксплуатации материал рабочей части мембраны испытывает разносторонне направленные напряжения;
- на рабочей поверхности мембраны имеется перепускное отверстие, предназначенное для предотвращения срабатывания пневматического устройства при небольших, «шумовых», значениях перепада давления воздуха по разные стороны мембраны.

С точки зрения распределения напряжений в рабочей части изделия при его эксплуатации, перепускное отверстие является конструктивно обусловленным дефектом и, следовательно, концентратором напряжений. Именно на поверхности этого отверстия в процессе работы возникали трещины, обуславливающие выход мембраны из строя. Таким образом, изделие работает в условиях неоднородного сложнапряженного состояния и искусственного концентратора напряжений.

При разработке рецептуры резиновых смесей для производства мембран рассматриваемого типа с повышенным ресурсом работы, в первую очередь следует добиваться максимально возможного значения сопротивления раздиру резин в условиях неоднородного сложнапряженного состояния (естественно, сохраняя в заданных пределах значения других необходимых свойств).

Испытание резин на основе широко используемых в промышленности РТИ [15] каучуков: СКИ-3, СКМС-30АРК, БНКС-18АМН, БНКС-28АМН и БНКС-40АМН предложенными методами показало, что лучшим сопротивлением раздиру обладают резины на основе бутадиен-нитрильных каучуков, наполненных техническим углеродом N339 (рисунок 2). Как известно эти же каучуки обеспечивают изделиям высокую маслостойкость, что важно для данной гофрированной мембраны.

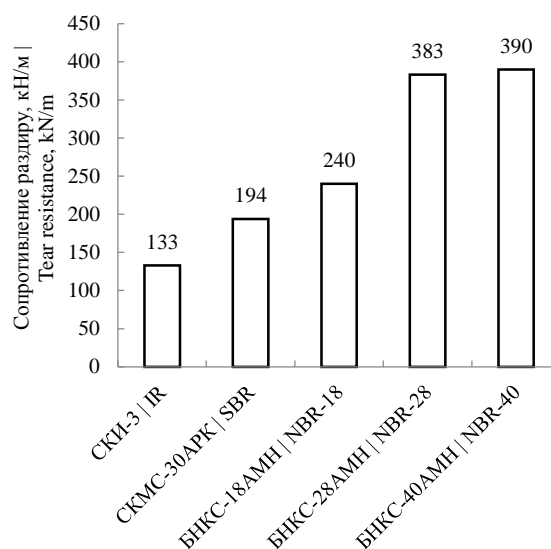


Рисунок 2. Сопротивление раздиру резин в неоднородном сложнапряженном состоянии

Figure 2. Tear resistance of rubbers in a heterogeneous complexly stressed state

Дальнейшие исследования проводили на бутадиен-нитрильных каучуках [16]. Содержание активного наполнителя – технического углерода N339 варьировалось от 30 до 50 мас. ч. на 100 мас. ч. каучука.

Вулканизаты были испытаны по методике оценки сопротивления раздиру в неоднородном сложнапряженном состоянии. Для оценки стойкости к воздействию масел дополнительно для всех резин были проведены серии экспериментов по определению прочностных характеристик после выдержки в течение одного месяца в индустриальном масле И-40А, широко используемом в промышленности, например, в качестве сказки для редукторов.

Прочностные характеристики резин оценивали по величине коэффициента «С», который определялся посредством расчета методом конечных элементов [17-19] по формуле (1). Задачу о продавливании резиновой мембраны сферическим индентором решали в осесимметричной постановке (рисунок 3). Для задания свойств резин при расчете методом конечных элементов использовался упругий потенциал Йоха, хорошо учитывающий нелинейность изменения свойств резин при нагружении [20–23]. Расчет показал, что при небольших деформациях область концентрации напряжений сосредоточена на оси симметрии модели в центре под областью контакта образца и индентора (рисунок 3, б). При дальнейшем деформировании происходит резкое перераспределение напряжений, и при больших перемещениях индентора область концентрации напряжений в центре образца сглаживается (рисунок 3, в), а концентрация

напряжений на периферии, наоборот возрастает и становится наиболее опасной зоной сечения. Характер разрушения образцов подтверждает корректность проведенного расчета. В таблице 1 приведена оценка прочностных характеристик резин до и после набухания в масле. При испытании резин, не подвергнутых воздействию масла значения коэффициента «С» повышаются в ряду каучуков: БНКС-18АМН → БНКС-28АМН → БНКС-40АМН, что свидетельствует о росте прочности резин с увеличением содержания нитрила акриловой кислоты в молекуле рассматриваемых каучуков. Увеличение прочности наблюдается и при увеличении дозировки технического углерода. После выдержки в масле прочность несколько снижается для всех резин на основе каучука БНКС-18АМН и практически не изменяется для резин на основе каучуков БНКС-28АМН и БНКС-40АМН.

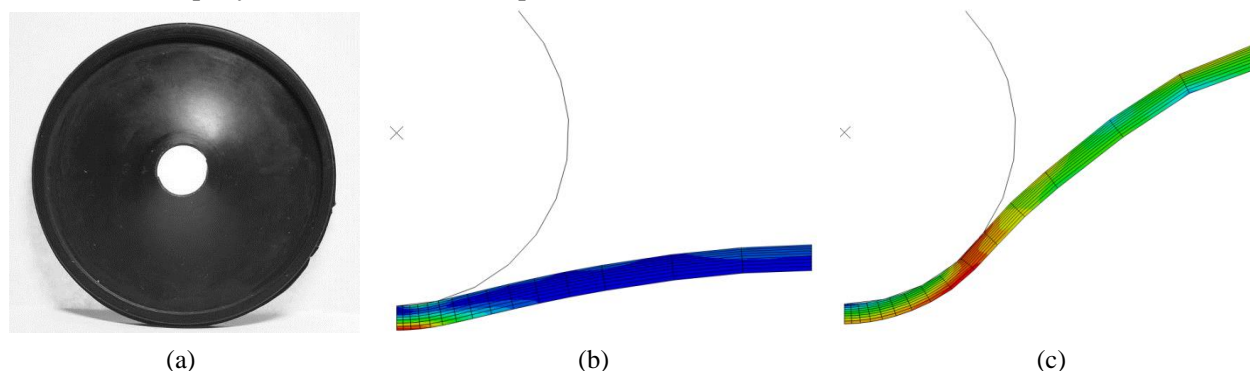


Рисунок 3. Характер разрушения мембран (а) и распределение эквивалентных напряжений Мизеса (б), (с) на различных стадиях внедрения индентора

Figure 3. The nature of membranes destruction (a) and the distribution of equivalent von Mises stresses (b), (c) at different stages of the indenter penetration

Таблица 1.
Влияние выдержки в индустриальном масле на прочностные свойства анализируемых резин

Table 1.

An influence of aging in industrial oil on the strength properties of the analyzed rubbers

Коэффициент "С" при перемещении (мм), МПа Coefficient "C" at moving (mm), МПа	Тип каучука Type of rubber								
	БНКС-18АМН NBR-18			БНКС-28АМН NBR-28			БНКС-40АМН NBR-40		
	Дозировка технического углерода N339, мас. ч. Dosage of carbon black N339, parts by weight								
	30	40	50	30	40	50	30	40	50
До выдержки в масле И-40А Before aging in oil I-40A									
10	2.2	2.5	2.9	4.0	4.5	5.0	4.9	5.1	5.3
20	4.0	4.5	4.8	8.0	8.7	10.0	9.8	10.2	10.4
30	10.5	10.8	11.3	14.1	15.5	16.9	16.8	17.1	17.3
При разрыве At break	16.2	16.8	17.0	19.5	21.1	22.9	22.4	23.2	23.5
После выдержки в масле И-40А After aging in oil I-40A									
10	1.1	1.5	1.9	3.7	4.4	4.9	4.8	5.0	5.2
20	3.1	3.6	4.0	7.8	8.6	9.8	9.7	10.1	10.3
30	9.7	10.0	10.5	13.9	15.4	16.8	16.7	16.9	17.2
При разрыве At break	14.2	15.8	16.1	19.3	20.9	22.5	22.2	23.1	23.5

Зависимость сопротивления раздиру от типа каучука и содержания наполнителя качественно аналогична зависимости прочности (таблица 2). При этом стоит отметить, что у резины на основе БНКС-18АМН после выдержки

в масле наблюдается достаточно значимое ($10 \div 25\%$) снижение сопротивления раздиру. У резин на основе каучуков БНКС-28АМН и БНКС-40АМН снижение сопротивления раздиру незначительно.

Таблица 2.
Влияние выдержки в индустриальном масле И-40А на сопротивление резин раздиру

Table 2.

An influence of aging in industrial oil I-40A on the tear resistance of rubbers

Показатель Indicator	Тип каучука Type of rubber								
	БНКС-18АМН NBR-18			БНКС-28АМН NBR-28			БНКС-40АМН NBR-40		
	Дозировка технического углерода N339, мас. ч. Dosage of carbon black N339, parts by weight								
	30	40	50	30	40	50	30	40	50
Сопротивление раздиру T_s , кН/м Tear resistance, kN/m	До выдержки в масле И-40А Before aging in oil I-40A								
	210	302	311	256	383	392	268	391	401
	После выдержки в масле И-40А After aging in oil I-40A								
	192	267	274	251	380	391	267	390	401

На основании совокупности данных по оценке прочности и сопротивления раздиру, для производства гофрированных мембран могут быть рекомендованы резины как на основе каучука БНКС-28АМН, так и на основе БНКС-40АМН с содержанием техуглерода в количестве 40 и 50 мас. ч. на 100 мас. ч. каучука, поскольку они обладают сопоставимыми свойствами. Однако резины на основе каучука БНКС-40АМН с содержанием технического углерода 40 и 50 мас. ч., а также резины на основе БНКС-28АМН с содержанием технического углерода 50 мас. ч. имеют повышенные жесткостные характеристики, о чем свидетельствуют значения коэффициента «С» при небольших значениях перемещения индентора (таблица 1). Это негативно сказывается на работе данной гофрированной мембраны. Таким образом, можно считать, что оптимальный комплекс характеристик будут обеспечивать резины на основе каучука БНКС-28АМН при наполнении техуглеродом N339 в количестве 40 мас. ч. на 100 мас. ч. каучука.

Использование комплексного расчетно-экспериментального подхода позволило повысить долговечность изделий, испытанных в лабораторных условиях, на 35% по сравнению с эталоном

и сократить сроки их создания. При этом в рецептуре использован доступный бутадиен-нитрильный каучук, что особенно важно в современной экономической ситуации.

Заключение

Таким образом, испытания резин методом продавливания, моделирующим неоднородное сложнапряженное состояние, имеющее место в реальных условиях эксплуатации изделий, позволяет получить широкий спектр достоверных характеристик резин для мембран. Применение метода конечных элементов упрощает идентификацию НДС резиновых мембран и при этом является необходимым ресурсом создания РТИ, который может быть эффективно использован в сочетании с широким спектром методов лабораторных испытаний. Сочетание экспериментального и теоретического подходов позволяет адекватно воспроизводить НДС мембран, добиться существенного сокращения времени, материальных и финансовых затрат на создание резиновых мембран с заданными техническими характеристиками.

Литература

- 1 Резниченко С.В., Морозов Ю.Л. Большой справочник резинщика. Том 2. Резины и резинотехнические изделия. М.: ООО «Издательский центр «Техинформ» МАИ», 2012. 648 с.
- 2 Квасникова В.В., Жучкевич О.Н. Конкурентоспособность товаров и организаций. М.: Инфра-М. Новое знание, 2015. 192 с.
- 3 Shpak N., Seliuchenko N., Kharchuk V., Kosar N., Sroka W. Evaluation of Product Competitiveness: A Case Study Analysis // Organizacija. 2019. № 52(2). P. 107–125. doi: 10.2478/orga-2019-0008
- 4 Liu L., Jiang Z. Influence of technological innovation capabilities on product competitiveness // Industrial Management and Data Systems. 2016. № 116(5). P. 883–892. doi: 10.1108/IMDS-05-2015-0189
- 5 Щетинина И.В. Применение цифровых технологий продвижения для повышения конкурентоспособности продукции // ЭКОНОМИНФО. 2018. № 4. С. 49–53.
- 6 Lev Y., Faye A., Volokh K.Y. Thermoelastic deformation and failure of rubberlike materials // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2019. № 122. P. 538–554. doi: 10.1016/j.jmps.2018.09.033

- 7 Barghi B., Shadrokh sikari, S. Qualitative and quantitative project risk assessment using a hybrid PMBOK model developed under uncertainty conditions // Heliyon. 2020. № 6(1). doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e03097
- 8 Jamali G., Oveisi M. A study on project management based on PMBOK and PRINCE2 // Modern Applied Science. 2016. № 10(6). P. 142. doi: 10.5539/mas.v10n6p142
- 9 Несиоловская Т.Н., Куделин Д.В. Комплексный подход к проектированию тонкостенных резиновых изделий // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 2. С. 229–233.
- 10 Хромов М.К. О связи показателей разрушения при прорыве с упруго-прочностными свойствами резин // Каучук и резина. 1981. № 8. С. 6–9.
- 11 Гамлицкий Ю.А., Кольцов Е.М., Веселов И.В. Применение метода конечных элементов для расчета напряженно-деформированного состояния массивных и безопасных шин с использованием линейных и нелинейных определяющих уравнений // Каучук и резина. 2020. № 2. С. 82–85.
- 12 Cali M., Savio F.L. Accurate 3D reconstruction of a rubber membrane inflated during a Bulge Test to evaluate anisotropy // Advances on Mechanics. Design Engineering and Manufacturing. 2017. P. 1221–1231. doi: 10.1007/978-3-319-45781-9_122
- 13 Li B., Bahadursha V.R.L.P., Fatt M.S.H. Predicting failure in rubber membranes: An experimental-numerical approach // Engineering Failure Analysis. 2018. V. 90 P. 404–424. doi: 10.1016/j.engfailanal.2018.04.003
- 14 Gupta A., Pradhan K.S., Bajpai L., Jain V. Numerical analysis of rubber tire/rail contact behavior in road cum rail vehicle under different inflation pressure values using finite element method // Materials Today: Proceedings. 2021. doi: 10.1016/j.matpr.2021.05.100
- 15 Резниченко С.В., Морозов Ю.Л. Большой справочник резинщика. Том 1. Каучуки и ингредиенты. М.: ООО «Издательский центр «Техинформ» МАИ», 2012. 744 с.
- 16 Goswami M., Mandloi B.S., Kumar A., Sharma S. et al. Optimization of graphene in carbon black-filled nitrile butadiene rubber: Constitutive modeling and verification using finite element analysis // Polymer Composites. 2020. №. 41(5). P. 1853–1866. doi: 10.1002/pc.25503
- 17 Huri D., Mankovits T. Comparison of the material models in rubber finite element analysis // In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Institute of Physics Publishing. 2018. V. 393. doi: 10.1088/1757-899X/393/1/012018
- 18 Zhou C., Chen G., Liu P. Finite element analysis of sealing performance of rubber D-ring seal in high-pressure hydrogen storage vessel // Journal of failure analysis and prevention. 2018. № 18(4). P. 846–855. doi: 10.1007/s11668-018-0472-y
- 19 Robertson C.G. et al. Finite element modeling and critical plane analysis of a cut-and-chip experiment for rubber // Tire Science And Technology. 2021. №. 2. P. 128–145.
- 20 Keerthiwanasa R., Javorik J., Kledrowetz J. Hyperelastic-material characterization: A comparison of material constants // Materiali in Tehnologije. 2020. № 54(1). P. 121–123. doi:10.17222/mit.2019.161
- 21 Keerthiwanasa R., Javorik J., Kledrowetz J., Nekoksa P. Elastomer testing: The risk of using only uniaxial data for fitting the Mooney-Rivlin hyperelastic-material model // Materiali in Tehnologije. 2018. № 52(1). P. 3–8. doi: 10.17222/mit.2017.085
- 22 Huri D. Finite Element Software for Rubber Products Design // International Journal of Engineering and Management Sciences. 2018. № 3(1). P. 13–20. doi: 10.21791/ijems.2018.1.2
- 23 Behera D., Roy P., Madenci E. Peridynamic correspondence model for finite elastic deformation and rupture in Neo-Hookean materials // International Journal of Non-Linear Mechanics. 2020. №. 126. doi: 10.1016/j.ijnonlinmec.2020.103564

References

- 1 Reznichenko S.V., Morozov U.L. Great handbook of an engineer. Vol. 2. Rubbers and rubber products. Moscow, Techninform MAI. 2012. 648 p. (in Russian).
- 2 Kvasnikova V.V., Zhuchkevich O.N. Competitiveness of goods and organizations. Moscow, Infra-M, New knowledge. 2015. 192 p. (in Russian).
- 3 Shpak N., Seliuchenko N., Kharchuk V., Kosar N., Sroka W. Evaluation of Product Competitiveness: A Case Study Analysis. Organizacija. 2019. no. 52(2). pp. 107–125. doi: 10.2478/orga-2019-0008
- 4 Liu L., Jiang Z. Influence of technological innovation capabilities on product competitiveness. Industrial Management and Data Systems. 2016. no. 116(5). pp. 883–892. doi: 10.1108/IMDS-05-2015-0189
- 5 Shchetinina I.V. The using of digital promotion technologies to increasing the competitiveness of products. ECONOMINFO. 2018. no. 4. pp. 49–53. (in Russian)
- 6 Lev Y., Faye A., Volokh K.Y. Thermoelastic deformation and failure of rubberlike materials. Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2019. no. 122. pp. 538–554. doi: 10.1016/j.jmps.2018.09.033
- 7 Barghi B., Shadrokh sikari, S. Qualitative and quantitative project risk assessment using a hybrid PMBOK model developed under uncertainty conditions. Heliyon. 2020. no. 6(1). doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e03097
- 8 Jamali G., Oveisi M. A study on project management based on PMBOK and PRINCE2. Modern Applied Science. 2016. no. 10(6). pp. 142. doi: 10.5539/mas.v10n6p142
- 9 Nesiolovskaya T.N., Kudelin D.V. An integrated approach to the design of thin-walled rubber products. Scientific and technical bulletin of the Volga region. 2012. no. 2. pp. 229–233. (in Russian).
- 10 Khromov M.K. On the relationship between breakthrough fracture indicators and elastic-strength properties of rubbers. Rubber and rubber. 1981. no. 8. pp. 6–9. (in Russian).
- 11 Gamlitskii Y.A., Koltsov E.M., Veselov I.V. Application of the finite element method for calculating the stress-strain state of massive and safe tires using linear and nonlinear constitutive equations. Rubber. 2020. no. 2. pp. 82–85. (in Russian).
- 12 Cali M., Savio F.L. Accurate 3D reconstruction of a rubber membrane inflated during a Bulge Test to evaluate anisotropy. Advances on Mechanics. Design Engineering and Manufacturing. 2017. pp. 1221–1231. doi: 10.1007/978-3-319-45781-9.
- 13 Li B., Bahadursha V.R.L.P., Fatt M.S.H. Predicting failure in rubber membranes: An experimental-numerical approach. Engineering Failure Analysis. 2018. vol. 90. pp. 404–424. doi: 10.1016/j.engfailanal.2018.04.003


- 14 Gupta A., Pradhan K.S., Bajpai L., Jain V. Numerical analysis of rubber tire/rail contact behavior in road cum rail vehicle under different inflation pressure values using finite element method. *Materials Today: Proceedings*. 2021. doi: 10.1016/j.matpr.2021.05.100
- 15 Reznichenko S.V., Morozov U.L. Great handbook of an engineer. Vol. 1. Rubbers and ingredients. Moscow, Techninform MAI. 2012. 744 p. (in Russian).
- 16 Goswami M., Mandloi B.S., Kumar A., Sharma S. et al. Optimization of graphene in carbon black-filled nitrile butadiene rubber: Constitutive modeling and verification using finite element analysis. *Polymer Composites*. 2020. no. 41(5). pp. 1853–1866. doi: 10.1002/pc.25503
- 17 Huri D., Mankovits T. Comparison of the material models in rubber finite element analysis. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Institute of Physics Publishing. 2018. vol. 393. doi: 10.1088/1757-899X/393/1/012018
- 18 Zhou C., Chen G., Liu P. Finite element analysis of sealing performance of rubber D-ring seal in high-pressure hydrogen storage vessel. *Journal of failure analysis and prevention*. 2018. no. 18(4). pp. 846–855. doi: 10.1007/s11668-018-0472-y
- 19 Robertson C.G. et al. Finite element modeling and critical plane analysis of a cut-and-chip experiment for rubber. *Tire Science And Technology*. 2021. no. 2. pp. 128–145.
- 20 Keerthiwanasa R., Javorik J., Kledrowetz J. Hyperelastic-material characterization: A comparison of material constants. *Materiali in Tehnologije*. 2020. no. 54(1). pp. 121–123. doi:10.17222/mit.2019.161
- 21 Keerthiwanasa R., Javorik J., Kledrowetz J., Nekoxa P. Elastomer testing: The risk of using only uniaxial data for fitting the Mooney-Rivlin hyperelastic-material model. *Materiali in Tehnologije*. 2018. no. 52(1). pp. 3–8. doi: 10.17222/mit.2017.085
- 22 Huri D. Finite Element Software for Rubber Products Design. *International Journal of Engineering and Management Sciences*. 2018. no. 3(1). pp. 13–20. doi: 10.21791/ijems.2018.1.2
- 23 Behera D., Roy P., Madenci E. Peridynamic correspondence model for finite elastic deformation and rupture in Neo-Hookean materials. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2020. no. 126. doi: 10.1016/j.ijnonlinmec.2020.103564

Сведения об авторах

Дмитрий В. Куделин ведущий специалист, отдел перспективных разработок, ООО «Научно-технический центр «Интайр», ул. Советская, 81, г. Ярославль, 150003, Россия, kvmbaikal@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-5124-1168>

Татьяна Н. Несиоловская д.т.н., профессор, кафедра управления предприятием, Ярославский государственный технический университет, Московский пр-т, 88, г. Ярославль, 150023, Россия, nesiolovskayatn@ystu.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2024-6625>

Вклад авторов

Дмитрий В. Куделин написал рукопись, корректировал её до подачи в редакцию и несет ответственность за плагиат


Татьяна Н. Несиоловская консультация в ходе исследования

Конфликт интересов


Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Dmitry V. Kudelin leading specialist, advanced development department, research and development center “Intire” LLC, Sovetskaya str., 81, Yaroslavl, 150003, Russia, kvmbaikal@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-5124-1168>

Tatyana N. Nesiolovskaya Dr. Sci. (Engin.), professor, Enterprise Management Department, Yaroslavl State Technical University, Moskovsky Av., 88, Yaroslavl, 150023, Russia, nesiolovskayatn@ystu.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2024-6625>

Contribution

Dmitry V. Kudelin wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism

Tatyana N. Nesiolovskaya consultation during the study

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 19/04/2021	После редакции 17/05/2021	Принята в печать 02/06/2021
Received 19/04/2021	Accepted in revised 17/05/2021	Accepted 02/06/2021