

ния. Построение технологического комплекса интеграционного взаимодействия распределенных систем позволяет убрать из системы человеческий фактор, таким образом уменьшить количество ошибок, приблизить время выполнения поставленных задач к константе, другими словами, автоматизировать процесс взаимодействия систем.

Отличие разрабатываемого программно-технологического комплекса от других подобных систем в том, что система ориентируется на простое и интуитивно-понятное взаимодействие с пользователем, серьезным подходом к безопасности хранения личных данных пользователей, масштабируемостью, отказоустойчивостью, открытостью описания интерфейсов работы с ней и служб.

Особенностью разрабатываемого программно-технологического комплекса является то, что участниками данной распределенной системы может быть любой сервис глобальной сети, вне зависимости от его способности интегрироваться с другими сервисами, для дальнейшей автоматизации рутинных работ, развития связей и бизнеса.

Данный программно-технологический комплекс имеет большой круг применения – системы ведений отчетности, бухгалтерские системы, образовательные системы, различные торговые площадки, административные сервисы, различные контакт-центры, системы риэлтерских услуг, почтовые сервисы и другие системы с большим оборотом данных.

Преимущество данной системы в том, что она производит полную журнализацию действий пользователя, устойчива к сетевым ошибкам, масштабируема, прозрачна, имеет интуитивно-понятный интерфейс, оповещение пользователей о успешном выполнении действия.

**А. П. Сазанков**

(ГГУ имени Ф. Скорины, Гомель)

Науч. рук. **С. В. Шилько**, канд. техн. наук, доцент

## **РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЯЗКОУПРУГИХ СВОЙСТВ ШИННЫХ РЕЗИН**

**Введение.** Механико-математическое описание вязкоупругих свойств шинных резин на основе реологических моделей позволяет уже на стадии проектирования прогнозировать диссипативные параметры резинокордных композитов и эксплуатационные показатели автомобильных шин, в частности, сопротивление качению [1]. В рас-

четной практике используются линейные вязкоупругие модели наследственного типа [2–5], имеющиеся в программном обеспечении конечноэлементного анализа MSC.Marc и др.

**Цель исследования** – характеристика вязкоупругих свойств шинных резин в рамках линейной вязкоупругой модели Прони.

С этой целью были проведены механические испытания 20-ти составов шинных резин на малоцикловое растяжение с амплитудой деформации 50% с последующей релаксацией (машина Инстрон 5567) и на циклическое продольное растяжение в условиях одноосного напряженного состояния образца с амплитудой смещения 0,2 мм (прибор DMA Q800) в квазистатическом и динамическом режимах нагружения соответственно.

Вычисление реологических констант для испытанных материалов с использованием вышеуказанной модели предусматривает процедуру верификации по схеме, предложенной специалистами NAFEMS и ASME (рисунок 1).

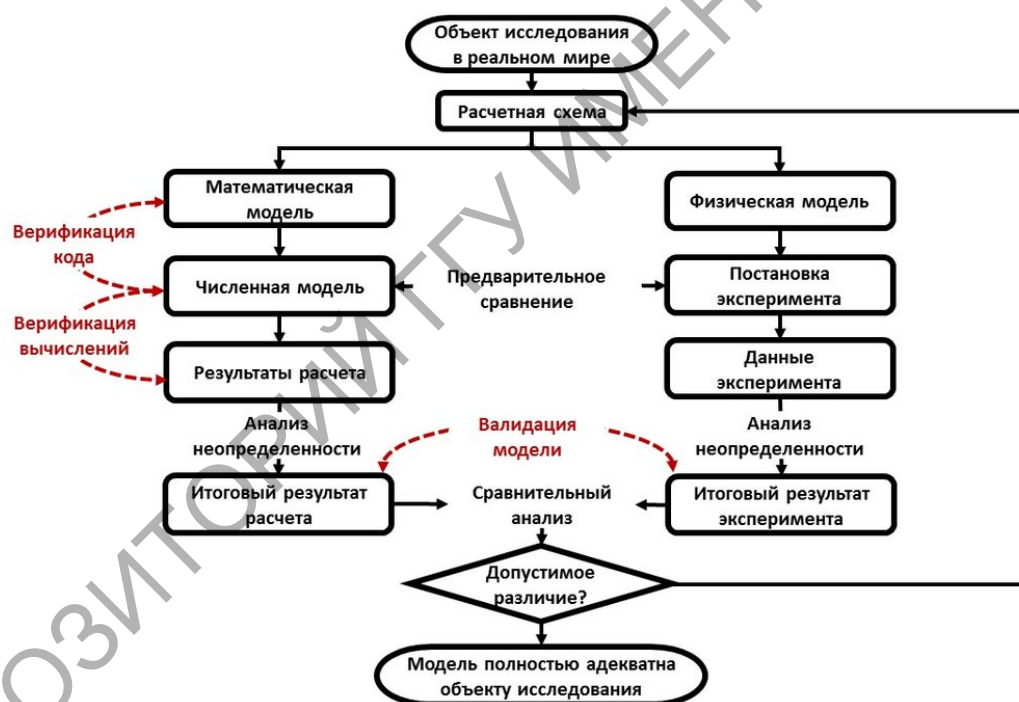


Рисунок 1 – Схема исследования адекватности моделирования

Подразумевается, что разработчик изделия (в данном исследовании, автомобильной шины) создает его расчетную схему и два вида моделей – математическую (аналитическое описание в виде формул) и численную, т.е. программный код, реализующий последователь-

ность вычислений по математическим формулам. Верификация призвана установить соответствие между математической и численной моделями. В нашем случае верификация необходима при оценке пригодности рассматриваемых моделей вязкоупругого деформирования шинных резин для последующей численной реализации. Верификация такого рода представляет собой исследование чувствительности модели, т.е. проверку на устойчивость расчетных значений при изменении входных данных в определенном диапазоне.

Для расчета реологических констант математическое выражение модели Прони записывалось в следующем виде:

$$\sigma_{ij}(t) = \int_0^t 2G(t-\tau) \frac{de_{ij}(\tau)}{d\tau} d\tau + \delta_{ij} \int_0^t K(t-\tau) \frac{d\theta}{d\tau} d\tau$$

Здесь  $G(\xi) = G_\infty + \sum_{i=1}^{n_G} G_i e^{-\frac{\xi}{\lambda_i^G}}$ ,  $K(\xi) = K_\infty + \sum_{i=1}^{n_K} K_i e^{-\frac{\xi}{\lambda_i^K}}$ ,  $G(0) = G_\infty + \sum_{i=1}^{n_G} G_i = \mu$ ,

$K(0) = K_\infty + \sum_{i=1}^{n_K} K_i = K$ ,  $\lambda_i^G = \lambda_i^K = \lambda_i^E$ ,  $\lambda_i^E(T) = a_T(T-T_0)\lambda_{i0}^E$ ,  $\lambda_{i0}^E$  – время релаксации, соответствующее температуре приведения  $T_0 = 293K$ ;  $\delta_i = \frac{E_i}{E}$  – отношение модулей упругости.

Анализировались приращения используемых в модели напряженно-деформированного состояния образцов шинных резин тех материальных функций и характеристик, которые связаны явным или неявным образом с параметрами, варьируемыми в ходе механических испытаний указанных материалов.

После верификации параметры модели Прони вычислялись с помощью программы, написанной в среде Mathcad 14.0. В качестве примера в таблице 1 приведены реологические константы модели Прони для 3-х видов шинных резин различного назначения.

Таблица 1 – Результаты расчета вязкоупругих характеристик

№	Деталь шины	Реологические параметры модели Прони					
		$\lambda_{i0}, c$			$\delta_i$		
		1	2	3	1	2	3
1	Брекер	0,027	2,166	410,85	0,308	0,126	0,124
2	Прослойка под протектор	0,238	281,53	9,32	0,131	0,074	0,062
3	Герметизирующий слой	0,006	0,716	183,33	0,535	0,083	0,177

## Заключение

С привлечением методов статических и динамических механических испытаний, а также реологической модели Прони исследованы вязкоупругие свойства 20-ти видов резин, используемых для изготовления различных деталей автомобильных шин. Верификация модели и проведенные расчеты показали ее применимость для характеристики шинных резин, как важного этапа проектирования указанных резинотехнических изделий.

## Литература

1. Хотько, А. В. Возможности оптимального проектирования автомобильной шины по критерию пространственной равнопрочности / А. В. Хотько, С. В. Шилько, С. Н. Бухаров // Мех. машин, механизмов и матер. – 2020. – № 4. – С. 11–18.
2. Кристенсен, Р. Введение в теорию вязкоупругости / Р. Кристенсен. – М.: Мир, 1974. – 340 с.
3. Кравчук, А. С. Механика полимерных и композиционных материалов: учебное пособие / А. С. Кравчук, В. П. Майборода, Ю. С. Уржумцев. – М.: Наука, 1985. – 303 с.
4. Ghoreishy, H. R. Determination of the Parameters of the Prony Series in Hyper-Viscoelastic Material Models Using the Finite Element Method / H. R. Ghoreishy // Journal of Materials and Design. – 2012. – Vol. 35. – P. 791–797.
5. Определение реологических параметров полимерных материалов на основе идентификации вязкоупругой модели Прони по результатам статических и динамических испытаний / С. В. Шилько [и др.] // Мех. машин, механизмов и матер. – 2017. – № 3. – С. 33–38.

**А. Д. Свечко**  
(БГУ, Минск)

Науч. рук. **Е. И. Коваленко**, канд. биол. наук, доцент

## **ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ В СИСТЕМАХ, СОДЕРЖАЩИХ ГРАФЕНОВЫЕ КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ С ЛЮМИНОЛОМ И ОКИСЛИТЕЛЯМИ**

Графеновые квантовые точки (ГКТ) представляют собой новый тип углеродных наночастиц, состоящих из малого числа слоев графе-