

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ МОДУЛЯ СДВИГА СЕЙСМОИЗОЛИРУЮЩИХ РЕЗИНОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОПОР ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ЗДАНИЙ ПО ДАННЫМ УСКОРЕННОГО СТАРЕНИЯ

И.Р. ГИЗЯТУЛЛИН¹

¹Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций (ЦНИИСК) им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, г. Москва, 109428, Россия

Аннотация

Введение. Изменение физико-механических характеристик резинометаллических опор в процессе эксплуатации является одним из определяющих факторов, влияющих на эффективность и долговременную работоспособность систем сейсмоизоляции зданий.

Цель. В этой связи актуальной научной задачей является разработка аналитически обоснованных зависимостей на основе экспериментальных данных старения, обеспечивающих количественную оценку изменения модуля сдвига резинометаллических опор в течение расчетного срока их эксплуатации.

Материалы и методы. На основе экспериментальных данных ускоренного термического старения резинометаллических опор и принципа температурно-временной суперпозиции по модели Аррениуса, для каждого эквивалентного срока эксплуатации опор определен модуль сдвига. После чего проведена аналитическая обработка экспериментальных данных с построением аппроксимирующей зависимости изменения относительного модуля сдвига во времени. Параметры зависимости идентифицированы методами нелинейной регрессии с последующей статистической оценкой качества аппроксимации.

Результаты. Установлено, что изменение модуля сдвига резинометаллических опор в процессе старения представляет собой нелинейный процесс, который может быть описан монотонной экспоненциальной зависимостью асимптотического типа, отражающей кинетику изменения механических свойств эластомерного материала, характеризующуюся интенсивным ростом модуля сдвига на начальной стадии старения и последующим переходом к режиму замедленного изменения по мере исчерпания активных термоокислительных процессов. Показано, что к эквивалентному сроку эксплуатации 50 лет модуль сдвига увеличивается более чем на 28 % по сравнению с исходным состоянием. Полученная аналитическая аппроксимирующая зависимость характеризуется высокими значениями коэффициента детерминации и малыми значениями статистических ошибок, что подтверждает корректность выбранного аналитического представления экспериментальных данных.

Выводы. Предложен подход к построению аналитических аппроксимирующих зависимостей изменения модуля сдвига резинометаллических опор на основе ограниченного набора экспериментальных данных, полученных при ускоренном старении опор. Реализация данного подхода обеспечивает возможность количественной оценки изменения модуля сдвига в процессе эксплуатации резинометаллических опор и может быть использована при анализе долговременной эффективности систем сейсмоизоляции, а также при оценке технического состояния и прогнозировании остаточного ресурса резинометаллических опор.

Ключевые слова: резинометаллические опоры, сейсмоизоляция, ускоренное старение, экспоненциальная аппроксимация, деградация физико-механических свойств, долговечность, техническое состояние, модуль сдвига

Для цитирования: Гизятуллин И.Р. Аналитическое представление изменения модуля сдвига сейсмоизолирующих резинометаллических опор эксплуатируемых зданий по данным ускоренного старения // Вестник НИЦ «Строительство». 2026. 1(48). С. 39–55. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-1\(48\)-39-55](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-1(48)-39-55)

Благодарности

Автор выражает искреннюю признательность и благодарность коллегам и сотрудникам Отдела исследований сейсмостойкости сооружений ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», принимавшим участие в проведении экспериментальных исследований и обсуждении полученных результатов, в частности А.А. Бубису, Э.М. Абрекову, Б.И. Щербачеву и М.П. Дойникову.

Вклад автора

Автор берет на себя ответственность за все аспекты работы над статьей.

Финансирование

Экспериментальные исследования выполнены в рамках научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы по теме: «Исследование и разработка методов оценки технического состояния зданий и сооружений с системами сейсмоизоляции в виде резинометаллических опор на основе результатов динамического мониторинга» по заказу ФАУ «ФЦС» (Пер. № НИОКТР: 122050400049-9).

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 12.01.2026

Поступила после рецензирования 30.01.2026

Принята к публикации: 10.02.2026

ANALYTICAL MODELING OF SHEAR MODULUS EVOLUTION IN SEISMIC ISOLATION ELASTOMERIC BEARINGS OF IN-SERVICE BUILDINGS BASED ON ACCELERATED AGING TESTS

I.R. GIZIATULLIN¹

¹*Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, 2nd Institut'skaya str., 6, Moscow, 109428, Russia*

Abstract

Introduction. Changes in the physical and mechanical properties of rubber bearings during service life represent one of the key factors affecting the efficiency and long-term performance of building seismic isolation systems.

Aim. In this context, the development of analytically justified relationships based on experimental aging data, enabling quantitative assessment of shear modulus variation over the design service life of rubber bearings, constitutes an important scientific task.

Materials and Methods. Based on experimental data obtained from accelerated thermal aging tests of rubber bearings and the time-temperature superposition principle according to the Arrhenius model, the shear modulus was determined for each equivalent service life. The experimental results were subsequently subjected to analytical processing, and an approximating function describing the evolution of the relative shear modulus over time was derived. The parameters of the proposed function were identified using nonlinear regression techniques, followed by statistical evaluation of the goodness-of-fit.

Results. It was established that the variation of the shear modulus of rubber bearings during aging represents a nonlinear process that can be described by a monotonic exponential function of asymptotic type. This function reflects the kinetics of elastomer degradation, characterized by an intensive increase in shear modulus at the initial stage of aging, followed by a transition to a regime of gradual change as thermo-oxidative processes become depleted. The analysis shows that, for an equivalent service life of

50 years, the shear modulus increases by more than 28 % compared to its initial value. The obtained analytical approximation demonstrates a high coefficient of determination and low statistical error values, confirming the adequacy of the selected analytical representation of the experimental data.

Conclusions. An approach to constructing analytical approximating functions describing the evolution of the shear modulus of rubber bearings based on a limited set of accelerated aging test data is proposed. The implementation of this approach enables quantitative assessment of shear modulus variation during service life and may be applied in the evaluation of the long-term performance of seismic isolation systems, as well as in technical condition assessment and residual service life prediction of rubber bearings.

Keywords: rubber bearings; seismic isolation; accelerated aging; exponential approximation; degradation of physical and mechanical properties; durability; technical condition; shear modulus

For citation:

Giziatullin I.R. Analytical modeling of shear modulus evolution in seismic isolation elastomeric bearings of in-service buildings based on accelerated aging tests. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*, 2026, 1{48}, pp. 39–55. <https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-1{48}-39-55>

Acknowledgments

The author expresses sincere appreciation and gratitude to colleagues and staff of the Seismic Resistance Research Department of TsNIISK named after V.A. Koucherenko (JSC "Research Center of Construction") for their participation in the experimental studies and in the discussion of the obtained results, in particular A.A. Bubis, Z.M. Abrekov, B.I. Shcherbachev, and M.P. Doynikov.

Author contribution statement

The author takes responsibility for all aspects of the paper.

Financing

The experimental studies were carried out within the framework of a research and development project entitled "Research and development of methods for assessing the technical condition of buildings and structures equipped with base isolation systems using rubber bearings based on dynamic monitoring results," commissioned by the Federal Autonomous Institution "FCS" (Reg. No. NIOKTR: 122050400049-9).

Conflict of interest

The author declares that he has no conflict of interest.

Received 12.01.2026

Revised 30.01.2026

Accepted 10.02.2026

Введение

Системы сейсмоизоляции получили широкое распространение в мировой практике строительства зданий и сооружений, расположенных в сейсмоопасных районах [1, 2]. За последние десятилетия объемы строительства зданий с системами сейсмоизоляции существенно возросли, что обусловлено возрастающими требованиями к обеспечению надежности, механической безопасности и сохранности объектов при воздействии землетрясений расчетной интенсивности. Требования по сохранности и функциональной пригодности зданий после землетрясений расчетной интенсивности, как правило, не могут быть обеспечены исключительно традиционными методами сейсмостойкого проектирования без применения специальных систем сейсмозащиты [3, 4]. Среди различных типов сейсмоизолирующих устройств активное внедрение получили резинометаллические опоры (РМО), используемые как в новом строительстве, так и при реконструкции и усилении существующих объектов.

В процессе длительной эксплуатации физико-механические характеристики резинометаллических опор могут быть подвержены изменениям, обусловленным совокупным

воздействием факторов окружающей среды и эксплуатационных нагрузок. К числу таких факторов относятся температурные колебания, воздействие кислорода и озона, ультрафиолетовое излучение, влияние агрессивных химических сред, радиационные воздействия, а также усталостные и релаксационные процессы в эластомерном материале. Подробный анализ факторов, определяющих деградацию физико-механических свойств резинометаллических опор, приведен в работе [5]. Значимость отдельных факторов и характер их влияния существенно зависят от условий эксплуатации и режимов нагружения изделия.

Старение резинометаллических опор представляет собой сложный физико-химический процесс, приводящий к изменению их жесткостных и демпфирующих характеристик. Увеличение жесткости опор сопровождается ростом инерционных нагрузок, передаваемых на сейсмоизолированную часть здания, тогда как снижение демпфирующих свойств ухудшает способность системы к рассеиванию сейсмической энергии. В совокупности эти изменения оказывают влияние на динамическую реакцию здания в целом и могут приводить к снижению эффективности системы сейсмоизоляции в процессе длительной эксплуатации.

В этой связи ключевое значение приобретает не только экспериментальное исследование процессов старения резинометаллических опор, но и разработка аналитических зависимостей, позволяющих количественно описывать и прогнозировать изменение их механических характеристик во времени в условиях ограниченного набора экспериментальных данных. Наличие таких зависимостей необходимо для корректного учета деградации свойств опор при оценке динамического отклика зданий, анализе их технического состояния и прогнозировании остаточного ресурса систем сейсмоизоляции.

Анализ отечественных и зарубежных исследований показывает, что значительная часть работ посвящена изучению свойств материалов резинометаллических опор в лабораторных условиях, в том числе оценке влияния температуры на механические характеристики изделий [6–9], исследованию термического старения эластомеров [10–12], а также деградации свойств свинцовых сердечников в опорах со свинцовыми вставками при различных режимах нагружения [13]. Существенно меньшее количество публикаций направлено на анализ влияния изменения физико-механических характеристик резинометаллических опор в процессе эксплуатации на динамическую реакцию зданий в целом [14–16]. Дополнительную актуальность данной проблеме придает тот факт, что значительная часть зданий с резинометаллическими опорами эксплуатируется более четырех десятилетий, при этом многие из них подвергались неоднократным сейсмическим воздействиям различной интенсивности.

Несмотря на значительный прогресс в изучении поведения резинометаллических опор при различных режимах нагружения, вопросы их долговечности и изменения эксплуатационных характеристик со временем остаются по-прежнему актуальными. В настоящей статье представлено аналитическое описание изменения модуля сдвига исследуемых резинометаллических опор на основе экспериментальных данных ускоренного старения, ориентированное на применение в широком круге задач, связанных с обеспечением долговременной эффективности систем сейсмоизоляции зданий, оценкой технического состояния резинометаллических опор и прогнозированием их остаточного ресурса.

Материалы и методы

Объект исследования

Объектом исследования являлись масштабные модели резинометаллических опор, выполненные по типовой конструктивной схеме, применяемой в системах сейсмоизоляция-

ции зданий. Эластомерная часть опор изготовлена из резинового компаунда на основе натурального каучука с добавлением стабилизирующих компонентов. Исследуемые образцы имели цилиндрическую форму с внешним диаметром 80 мм и высотой 62 мм. Конструкция опор включала 11 резиновых слоев толщиной 2 мм, армированных стальными пластинами толщиной 2 мм, при толщине наружного резинового слоя 10 мм. В центральной части опор было предусмотрено технологическое отверстие диаметром 12 мм, обеспечивающее равномерное распределение температуры при вулканизации.

В табл. 1 приведены проектные характеристики исследуемых РМО, а на рис. 1 их поперечное сечение и геометрические параметры соответственно.

Таблица 1

Проектные характеристики исследуемых РМО по данным завода-изготовителя

Table 1

Design characteristics of the investigated rubber bearings according to the manufacturer's data

Параметр	Значение параметра
Расчетная несущая способность, P_d , кН	25
Расчетные перемещения, D_d , мм	20
Максимальные перемещения, D_{max} , мм	40
Усредненная полная первоначальная толщина резинового слоя резинометаллической опоры, включая верхнее и нижнее покрытия, если у них нет ограничений для сдвига, T_d , мм	22
Условный модуль сдвига (Gg) опоры при номинальной температуре (23 ± 2) °С, МПа	$0,3 \pm 0,05$

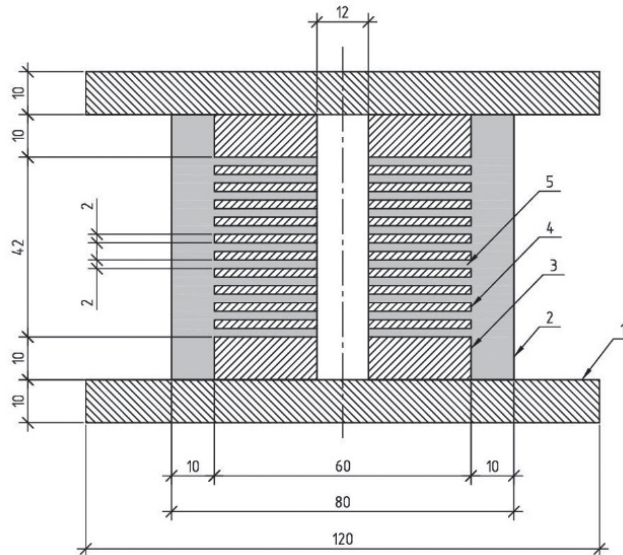


Рис. 1. Геометрические параметры исследуемых РМО по данным завода изготовителя: 1 – опорные пластины, закрепляемые к несейсмоизолированной и сейсмоизолированной частям здания; 2 – резиновая оболочка, защищающая внутренние слои резины и металла; 3 – стальные пластины опоры, закрепляемые к опорным пластинам; 4 – стальные пластины, расположенные между листами резины; 5 – листы резины

Fig. 1. Geometric parameters of the investigated rubber bearings according to the manufacturer's data: 1 – end plates fixed to the non-isolated and base-isolated parts of the building; 2 – rubber cover protecting the internal rubber and steel layers; 3 – steel plates of the bearing connected to the end plates; 4 – steel plates located between rubber layers; 5 – rubber layers

Наименование производителя и марка исследуемых резинометаллических опор намеренно не приводится в статье, поскольку исследование ориентировано на разработку аналитических зависимостей изменения модуля сдвига, подход к построению которой применим и для других РМО, и не ставит целью оценку эксплуатационных характеристик конкретных изделий или сравнительный анализ продукции отдельных производителей.

Цель и задачи исследования

Целью работы является построение аналитической зависимости изменения модуля сдвига резинометаллических опор систем сейсмоизоляции зданий в процессе эксплуатации на основе экспериментальных данных ускоренного старения, которая может быть использована при формировании прогнозных моделей старения резинометаллических опор, оценке изменения их механических свойств и технического состояния в течение расчетного срока эксплуатации зданий.

Для достижения поставленной цели в рамках проводимого исследования решались следующие задачи:

– ускоренное контролируемое термическое старение РМО в климатической камере, моделирующей различные варианты условных сроков эксплуатации опор (10, 20, 50 лет);

– определение модуля сдвига РМО до и после термического старения в соответствии с ГОСТ Р 57354-2016/EN 1337-3:2005 [17];

– анализ характера изменения модуля сдвига после ускоренного контролируемого термического старения РМО в климатической камере, моделирующей различные варианты условных сроков эксплуатации опор (10, 20, 50 лет);

– обоснование выбора функциональной формы аналитической зависимости, адекватно отражающей изменение механических свойств РМО в процессе эксплуатации при ограниченном объеме экспериментальных данных;

– оценка качества построенной аналитической зависимости на основе статистических показателей точности аппроксимации и устойчивости идентификации параметров при ограниченном объеме экспериментальных данных.

Методы исследования

Метод ускоренного старения РМО

Для формирования экспериментальных данных, отражающих долговременные изменения механических свойств резинометаллических опор систем сейсмоизоляции в процессе их эксплуатации, использован метод ускоренного термического старения в контролируемых условиях. Методология основана на модели Аррениуса, широко применяемой для экстраполяции температурно-зависимых процессов деградации эластомерных материалов на условия длительной эксплуатации. В качестве интегрального параметра, характеризующего изменение физико-механических свойств РМО, принят модуль сдвига.

Связь между скоростью деградационных процессов старения резины и температурой описывается уравнением Аррениуса [18]:

$$k = A \times e^{-\frac{E_a}{R \times T}}, \quad (1)$$

где k – скорость реакции, единицы измерения зависят от порядка реакции (для реакции 1-го порядка – с^{-1});

A – предэкспоненциальный множитель (фактор частоты), характеризует частоту столкновений реагирующих молекул, размерность совпадает с размерностью (для реакции 1-го порядка – с^{-1});

e – экспонента, $e \approx 2,71828$;

E_a – энергия активации, Дж/моль;

R – универсальная газовая постоянная, $R \approx 8,31446$ Дж/(моль·К);

T – абсолютная температура, К.

Для практических задач оценки старения резинотехнических изделий уравнение (1) используется в преобразованной форме, позволяющей установить эквивалентность времени старения при различных температурных режимах [19, 20]:

$$\ln \left(\frac{t_{\text{испыт.}}}{t_{\text{экспл.}}} \right) = \frac{E_a}{R} (T_{\text{испыт.}}^{-1} - T_{\text{экспл.}}^{-1}), \quad (2)$$

где $t_{\text{экспл}}$ – эквивалентное время старения при температуре эксплуатации изделия $T_{\text{экспл}}$ в реальных условиях, с;

$t_{\text{испыт}}$ – время выдержки при температуре ускоренного старения $T_{\text{испыт}}$, с;

$T_{\text{экспл}}, T_{\text{испыт}}$ – температуры эксплуатации и ускоренного старения соответственно, К.

Выражение (2) отражает принцип температурно-временной суперпозиции и показывает, что сравнительно короткие интервалы термического воздействия при повышенной температуре могут соответствовать многолетнему старению изделия в условиях эксплуатации. Энергия активации процессов термического старения эластомеров зависит от типа и состава каучука и, как правило, находится в диапазоне 80–200 кДж/моль. Для исследуемых в настоящей работе резинометаллических опор значение энергии активации резины при термическом старении, по данным завода-изготовителя, составляет в районе 120 кДж/моль.

В соответствии с принципом температурно-временной суперпозиции по модели Аррениуса, ускоренные испытания резинометаллических опор проводились при температуре 70 °С в течение расчетных временных интервалов, эквивалентных различным срокам эксплуатации в реальных условиях. При принятой осредненной температуре эксплуатации 15 °С и энергии активации процессов термического старения резины, равной 120 кДж/моль, выдержка образцов в камере термического старения составляла ~28, 57 и 142 ч, что соответствовало эквивалентным срокам эксплуатации 10, 20 и 50 лет соответственно. Указанные интервалы обеспечивали моделирование долговременных изменений механических свойств резинометаллических опор в сжатые сроки.

Испытания на ускоренное старение проводились в программируемой климатической камере с естественной конвекцией воздуха, обеспечивающей поддержание заданного температурного режима. Образцы резинометаллических опор размещались в камере с соблюдением условий, исключающих взаимное тепловое влияние и влияние стенок камеры: суммарный объем образцов не превышал 10 % объема камеры, расстояние между образцами составляло не менее 10 мм, а расстояние до стенок – не менее 50 мм. Общий вид образцов в процессе испытаний приведен на рис. 2.

После искусственного старения выполнялась выдержка образцов РМО не менее 48 часов до тех пор, пока образцы не стабилизировались.



Рис. 2. Резинометаллические опоры, расположенные в рабочей зоне климатической камеры, в процессе испытаний на ускоренное старение
Fig. 2. Rubber bearings, located in the working area of the climatic chamber, during accelerated aging tests

Метод определения модуля сдвига

Определение модуля сдвига резинометаллических опор до и после термического старения выполнялось в соответствии с [17]. Испытания проводились в условиях совместного действия вертикальной сжимающей и горизонтальной сдвиговой нагрузок, прикладываемых с использованием испытательного пресса и гидравлического домкрата соответственно, обеспечивающих контролируемое нагружение образцов.

Испытуемые образцы размещались симметрично относительно подвижной пластины, что обеспечивало реализацию расчетной схемы нагружения, соответствующей нормативным требованиям [17]. Схема нагружения резинометаллических опор приведена на рис. 3.

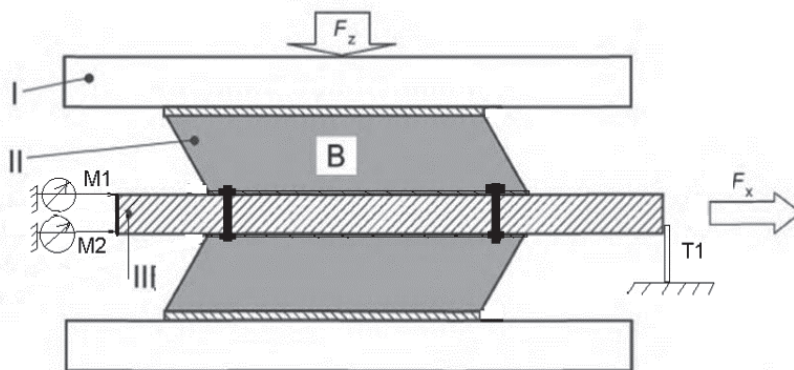


Рис. 3. Схема нагружения образцов резинометаллических опор для определения модуля сдвига:
I – пластины пресса; II – образец РМО для испытаний; III – подвижная пластина; M1, M2 – прогибомеры;
T1 – тензорезистивный датчик перемещений

Fig. 3. Loading scheme of rubber bearings samples to determine the shear modulus: I – press plates;
II – test sample; III – movable plate; M1, M2 – deflection gauges; T1 – strain gauge displacement sensor

Процесс испытаний предусматривал пошаговое нагружение пары идентичных резинометаллических опор при контролируемой скорости горизонтального сдвига 150 мм/мин и среднем вертикальном сжимающем давлении в 6 МПа в соответствии с [17]. Нагружение осуществлялось до достижения максимальной горизонтальной деформации, соответствующей диапазону:

$$0,7 T_q \leq v_{xm} \leq 0,9 T_q, \quad (3)$$

после чего выполнялся возврат образцов в исходное нулевое положение.

Здесь T_q – усредненная полная первоначальная толщина резинового слоя РМО, включая верхнее и нижнее покрытия, если у них нет ограничений для сдвига. Для рассматриваемых в настоящем исследовании РМО значение $T_q = 22$ мм. После первого цикла нагружения напряжение сжатия было снято, испытуемые образцы оставались без нагрузки в течение 5 мин, а затем нагружение образцов повторялось снова до достижения горизонтального перемещения, равного v_{xm} . Для исключения проскальзывания опор использовались пластины со специальными упорами. Общий вид образцов резинометаллических опор во время испытаний на определение модуля сдвига представлен на рис. 4.

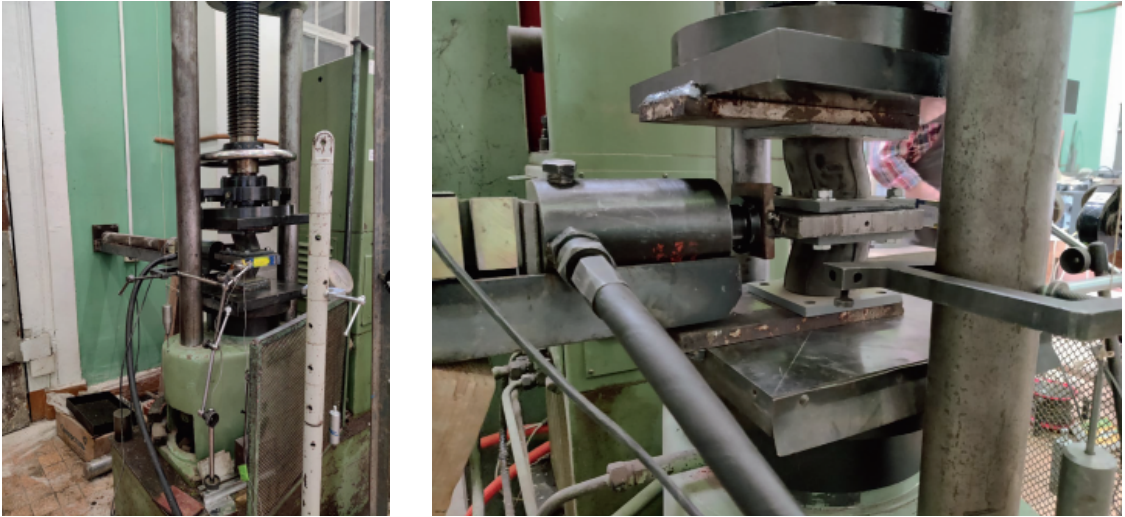


Рис. 4. Общий вид образцов резинометаллических опор во время испытаний на определение модуля сдвига
Fig. 4. General view of rubber bearings samples during tests to determine the shear modulus

В ходе испытаний регистрировались горизонтальные перемещения контрольных точек образцов и соответствующие значения горизонтальной нагрузки, по результатам которых определялись параметры сдвиговой деформации ϵ_q и касательного напряжения τ_s . Касательное напряжение вычислялось по выражению:

$$\tau_s = \frac{F_x}{A}, \quad (4)$$

где F_x – горизонтальная сила, воспринимаемая одной резинометаллической опорой, Н;
 A – площадь поперечного сечения опоры, мм².

Относительная деформация сдвига ϵ_q определялась как:

$$\epsilon_q = \frac{v_x}{T_q}. \quad (5)$$

Полученные значения касательного напряжения и относительной деформации сдвига использовались для построения диаграмм «касательное напряжение – деформация сдвига» и последующего определения модуля сдвига резинометаллических опор в соответствии с нормативной методикой.

Результаты исследования

Сопоставление зависимостей касательных напряжений от относительных деформаций сдвига, полученных по результатам испытаний серии образцов резинометаллических опор, включая образцы, подвергнутые контролируемому ускоренному старению, приведено на рис. 5.

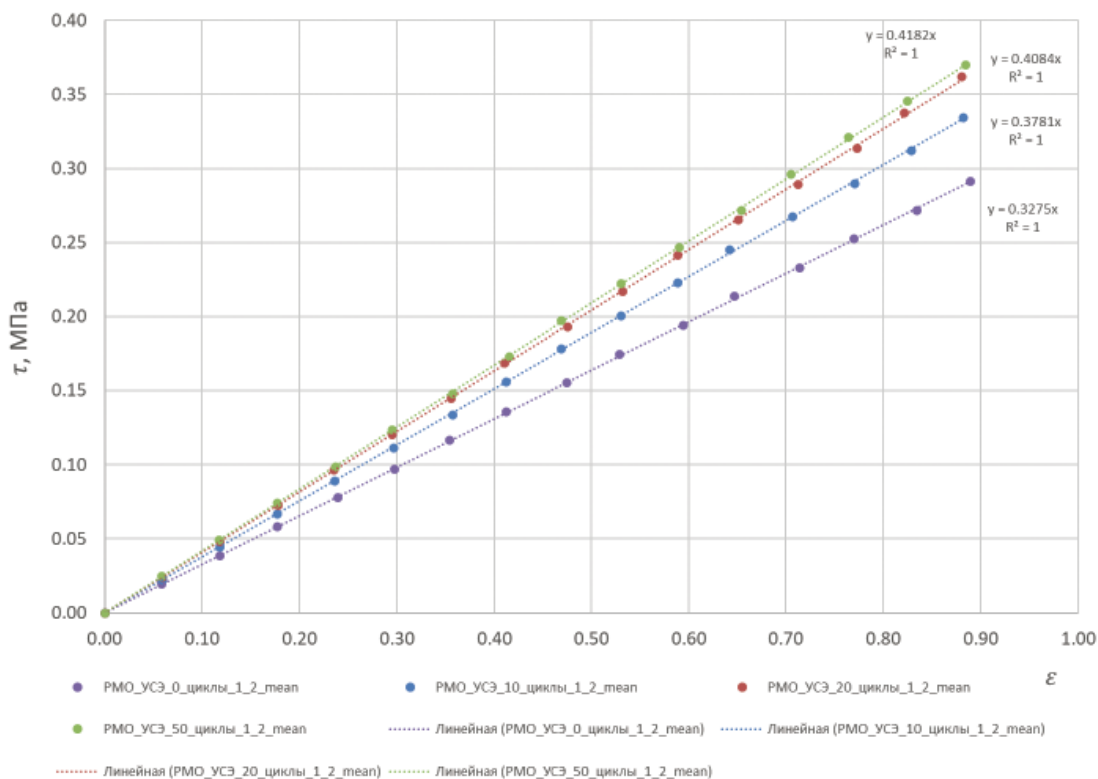


Рис. 5. График зависимости касательных напряжений от относительных деформаций сдвига образцов резинометаллических опор

Fig. 5. Shear stress versus relative shear strain curve for specimens of rubber bearings

По экспериментальным данным были построены линейные аппроксимирующие зависимости, наилучшим образом описывающие соотношение между касательными напряжениями и относительными деформациями сдвига в рассматриваемом диапазоне нагружения. На основании указанных зависимостей модуль сдвига резинометаллических опор определялся как отношение приращения касательного напряжения к соответствующему приращению деформации сдвига по выражению:

$$G_g = \frac{\tau_{s2} - \tau_{s1}}{\varepsilon_{qx2} - \varepsilon_{qx1}}, \quad (6)$$

где τ_{s1} , τ_{s2} – значения касательных напряжений, соответствующие относительным деформациям сдвига ε_{qx1} и ε_{qx2} .

Значения деформаций сдвига определялись при относительных горизонтальных перемещениях резинометаллических опор, заданных соотношениями:

$$v_{x1} = 0,27T_q, \quad (7)$$

$$v_{x2} = 0,58T_q. \quad (8)$$

По результатам проведенных испытаний установлено, что модуль сдвига резинометаллических опор в исходном состоянии составляет 0,33 МПа. После эквивалентного срока эксплуатации в 10 лет значение модуля сдвига увеличивается до 0,38 МПа, а к 20 годам достигает 0,41 МПа. При дальнейшем увеличении эквивалентного срока эксплуатации до 50 лет модуль сдвига возрастает незначительно и составляет 0,42 МПа.

Анализ полученных данных показывает, что изменение модуля сдвига резинометаллических опор в процессе ускоренного термического старения носит выраженный нелинейный характер. Наиболее интенсивный рост модуля сдвига наблюдается на ранних этапах старения: при эквивалентном сроке эксплуатации 10 лет модуль сдвига увеличивается приблизительно на 15 % (с 0,33 до 0,38 МПа), а к 20 годам достигает 0,41 МПа, что соответствует приросту порядка 24 % по сравнению с исходным состоянием. Этот рост обусловлен прогрессирующими термоокислительными процессами, в том числе укрупнением сшитой сетки полимерной матрицы и потерей подвижных фракций (пластификаторов, масел, влаги). В дальнейшем темп изменения модуля сдвига существенно снижается. При эквивалентном сроке эксплуатации в 50 лет значение модуля сдвига составляет 0,42 МПа, что отличается от 20-летнего уровня менее чем на 3 %. Данное поведение указывает на переход материала в стадию стабилизованного состояния, характеризующуюся замедлением процессов термоокислительной деградации и структурной перестройки эластомерной матрицы.

Такая форма поведения типична для процессов термоокислительного старения эластомерных материалов и указывает на наличие некоторого условного предельного уровня изменения механических свойств при длительной эксплуатации. В этой связи в качестве аналитической аппроксимирующей функции была выбрана экспоненциальная зависимость асимптотического типа, позволяющая корректно описать как начальную стадию ускоренного изменения модуля сдвига, так и последующий переход к режиму стабилизации.

В общем виде аналитическая зависимость записывается в виде:

$$\frac{G}{G_0} = k_a + (1 - k_a) \times e^{-\lambda \times t}, \quad (9)$$

где G – текущий модуль сдвига резинометаллической опоры в момент времени t , МПа;

G_0 – исходное (начальное) значение модуля сдвига, МПа;

k_a – коэффициент, характеризующий предельную относительную степень изменения модуля сдвига;

λ – коэффициент скорости изменения свойств;

t – время эксплуатации, годы.

Подобный экспоненциальный характер зависимости отмечен в работах ряда исследователей [21–24], что подтверждает корректность выбранной функции аппроксимации для описания долговременного поведения резинометаллических опор систем сейсмоизоляции.

Идентификация параметров модели k_a и λ выполнялась методами нелинейной регрессии на основе критерия наименьших квадратов путем минимизации функции невязок:

$$\min_{k_a, \lambda} S(k_a, \lambda) = \sum_{i=1}^n [y_i - (k_a + (1 - k_a)e^{-\lambda t_i})]^2 \quad (10)$$

где $S(k_a, \lambda)$ – функция невязок (сумма квадратов ошибок);

$y_i \left(\frac{G}{G_0}\right)$ – экспериментальные значения относительного изменения модуля сдвига РМО;

t_i – соответствующие значения времени, годы;

k_a, λ – параметры модели, подбираемые регрессией;

$e^{-\lambda t_i}$ – экспоненциальный член, задающий затухающую зависимость.

Асимптотический параметр функции k_a и коэффициент скорости изменения свойств λ определялись автоматически в ходе регрессионного анализа на основе численной идентификации формы экспериментальной зависимости. Оптимизация параметров модели выполнялась с использованием алгоритма Левенберга – Марквардта, обеспечивающего устойчивую сходимость и корректное нахождение минимума функции ошибок даже при ограниченном объеме экспериментальных данных [25–27]. Качество аппроксимации оценивалось с использованием коэффициента детерминации R^2 , среднеквадратичного отклонения (Root Mean Square Error, *RMSE*) и средней абсолютной ошибки (Mean Absolute Error, *MAE*).

Численная реализация алгоритмов нелинейной регрессии и идентификации параметров аналитической зависимости выполнена с использованием разработанной автором программы для ЭВМ (свидетельство о государственной регистрации № 2026610362 от 21.01.2026 г.) [28], обеспечивающей автоматизированную обработку экспериментальных данных и устойчивую оценку параметров экспоненциальной модели при ограниченном объеме наблюдений.

В результате аппроксимации экспериментальных данных с использованием экспоненциальной функции и численной идентификации параметров по описанному алгоритму получена аналитическая зависимость, описывающая изменение модуля сдвига резинометаллических опор во времени (рис. 6).

Полученная аналитическая зависимость адекватно описывает экспериментальные данные и демонстрирует характерное экспоненциальное поведение изменения модуля сдвига во времени. Высокое значение коэффициента детерминации ($R^2 = 0,9945$) и низкие значения статистических ошибок ($RMSE = 0,0064$; $MAE = 0,0079$) подтверждают корректность выбранного аналитического представления.

По результатам аппроксимации установлено, что при эквивалентном сроке эксплуатации в 50 лет модуль сдвига резинометаллических опор увеличивается приблизительно на 28 % по сравнению с исходным значением. Полученный результат свидетельствует об умеренном увеличении модуля сдвига РМО и соответствует диапазону значений, наблюдаемых в экспериментальных исследованиях долговременного старения РМО [21, 22].

Несмотря на умеренную величину изменения, рост модуля сдвига способен существенно повлиять на динамические характеристики сейсмоизолированных зданий, поскольку собственные периоды колебаний таких систем в значительной степени опреде-

ляются жесткостью сейсмоизолирующих опор. В этой связи корректный учет процессов старения РМО является необходимым для достоверной оценки долговременной эффективности систем сейсмоизоляции и их эксплуатационного ресурса.

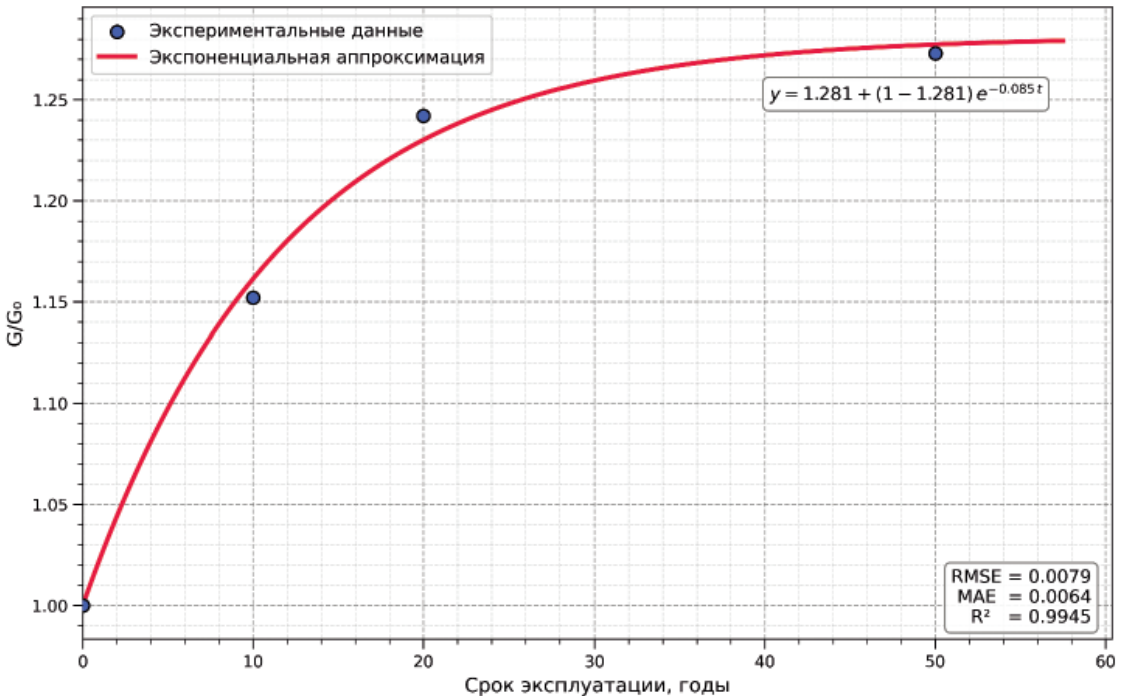


Рис. 6. Зависимость изменения модуля сдвига испытанных экспериментальных образцов резинометаллических опор от условного срока эксплуатации

Fig. 6. Variation of the shear modulus of the tested rubber bearing specimens as a function of the equivalent service life

Заключение и обсуждение

По результатам проведенных исследований, направленных на изучение изменения модуля сдвига резинометаллических опор систем сейсмоизоляции в процессе старения и разработку методов его аналитического описания, сформулированы следующие основные выводы.

1. В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что модуль сдвига резинометаллических опор систем сейсмоизоляции в процессе эксплуатации изменяется во времени и демонстрирует устойчивую тенденцию к увеличению по мере протекания процессов старения резины.

2. Показано, что изменение модуля сдвига РМО носит выраженный нелинейный характер и характеризуется интенсивным ростом на начальных этапах старения с последующим замедлением темпа изменения и переходом к квазистационарному режиму, что согласуется с физическими представлениями о кинетике термоокислительных процессов в эластомерных материалах.

3. Установлено, что при эквивалентном сроке эксплуатации порядка 50 лет модуль сдвига исследованных резинометаллических опор увеличивается приблизительно на 28 % по сравнению с исходным состоянием. Даже такие умеренные изменения спо-

собны оказывать заметное влияние на динамические характеристики сейсмоизолированных зданий, что подчеркивает необходимость учета процессов старения при оценке долговременной эффективности систем сейсмоизоляции и прогнозировании их эксплуатационного ресурса.

4. На основе экспериментальных данных и методов нелинейной регрессии получено аналитическое представление изменения относительного модуля сдвига резинометаллических опор во времени в виде экспоненциальной зависимости асимптотического типа. Предложенный подход к ее построению обеспечивает устойчивую идентификацию параметров модели даже при ограниченном объеме экспериментальных данных и позволяет формализовать изменение модуля сдвига резинометаллических опор в процессе эксплуатации.

5. Проведенная статистическая оценка качества аппроксимации показала высокую степень согласованности аналитической модели с экспериментальными данными, что подтверждается значениями коэффициента детерминации и малыми значениями ошибок аппроксимации. Это свидетельствует о корректности выбранной функциональной формы и надежности полученных параметров.

6. Установление закономерностей деградации физико-механических свойств резинометаллических опор в процессе эксплуатации является ключевым фактором обеспечения надежности и механической безопасности зданий с системами сейсмоизоляции на протяжении всего жизненного цикла и создает основу для разработки методов оценки и контроля их технического состояния, что позволит снизить эксплуатационные затраты из-за необходимости их преждевременной замены по истечении гарантированного срока службы или после воздействия землетрясений различной интенсивности.

Список литературы

1. Айзенберг Я.М., Смирнов В.И. Инновационные системы обеспечения сейсмической безопасности сооружений и населения. Инженерные и экономические аспекты // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2014. № 3. С.18–21.
2. Смирнов В.И. Сейсмоизоляция – современная антисейсмическая защита зданий в России // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2013. № 4. С. 41–54.
3. Бубис А.А., Афанасьева Я.В. Обзор основных исторических методов, применяемых для снижения эффекта сейсмического воздействия в мировой практике // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2024. № 6. С. 11–25. <https://doi.org/10.37153/2618-9283-2024-6-11-25>.
4. Белаш Т.А., Бубис А.А., Смирнова Л.Н., Звездов А.И. О реализации систем сейсмоизоляции в сейсмостойком строительстве зданий и сооружений в Российской Федерации // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2024. № 2. С. 8–19. <https://doi.org/10.37153/2618-9283-2024-2-8-19>.
5. Гизятуллин И.Р., Смирнова Л.Н. Деградация физико-механических свойств резинометаллических опор сейсмоизолированных зданий при эксплуатации // *Промышленное и гражданское строительство*. 2024. № 12. С. 17–25. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2024.12.17-25>.
6. Shirazi A. Thermal degradation of the performance of elastomeric bearings for seismic isolation. UC San Diego. 2010:ID: 0033D_10837. Available at: <https://escholarship.org/uc/item/6j3486gj>.
7. Billah A., Todorov B. Effects of subfreezing temperature on the seismic response of lead rubber bearing isolated bridge. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019;126:105814. <https://doi.org/10.1016/J.SOILDYN.2019.105814>.
8. Sciascetti A. The effect of temperature on unbonded fiber-reinforced elastomeric isolators. [M.A.Sc. Thesis]. 2017.

9. Zhang Rj., Li Aq. Experimental study on temperature dependence of mechanical properties of scaled high-performance rubber bearings. *Composites Part B: Engineering*, 2020;190(1):107932. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107932>.
10. Gheryani M.H., Razak H.A. Jameel M. Dynamic Response Changes of Seismic Isolated Building Due to Material Degradation of HDRB. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2015;40:3429–3442. <https://doi.org/10.1007/s13369-015-1794-7>.
11. McVitty W.J., Constantinou M.C. Property Modification Factors for Seismic Isolators: Design Guidance for Buildings. Technical Report MCEER-15-0005. 2015. Available at: <http://hdl.handle.net/10477/42187>.
12. Park J., Choun Y.S., Kim M.K., Hahm D. Reevaluation of the aging property modification factor of lead rubber bearings based on accelerated aging tests and finite element analysis. *Nuclear Engineering and Design*, 2019;347:59–66. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2019.03.021>.
13. Kustov S., Golyandin S., Sapozhnikov K., Robinson W.H. Amplitude-dependent internal friction, microplastic strain and recovery of lead at ambient temperature. *Materials Science and Engineering*, 1997;237:191–199. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(97\)00102-0](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(97)00102-0).
14. Choun Y.S., Park J., Choi I.K. Effects of Mechanical Property Variability in Lead Rubber Bearings on the Response of Seismic Isolation System for Different Ground Motions. *Nuclear Engineering and Technology*, 2014;46(5):605–618. <https://doi.org/10.5516/NET.09.2014.718>.
15. Astorga A.L., Gueguen P., Riviere J., Kashima T., Johnson P.A. Recovery of the resonance frequency of buildings following strong seismic deformation as a proxy for structural health. *Structural Health Monitoring*, 2019;18:(5–6):1966–1981. <https://doi.org/10.1177/1475921718820770>.
16. Van Engelen N.C., Kelly J.M. Retest of Neoprene Seismic Isolation Bearings after 30 Years. *Structural Control and Health Monitoring*, 2015;22(1):139–151. <https://doi.org/10.1002/stc.1665>.
17. ГОСТ Р 57354–2016/EN 1337–3:2005. Опоры строительных конструкций. Часть 3. Опоры эластомерные. Технические условия. Москва: Стандартинформ; 2017.
18. Arrhenius S. Über die Reaktionsgeschwindigkeit bei der Inversion von Rohrzucker durch Säuren. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*. 1889;4:226–248. <https://doi.org/10.1515/zpch-1889-0416>.
19. Nelson W. Accelerated Testing. New York: J. Wiley & Sons; 1990. Available at: <https://archive.org/details/acceleratedtesti0000nels>.
20. Le Huy M., Evrard G. Methodologies for lifetime predictions of rubber using Arrhenius and WLF models. *Die Angewandte Makromolekulare Chemie*. 1998;261–262(1):135–142. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1522-9505\(19981201\)261-262:1%3C135::AID-APMC135%3E3.0.CO;2-W](https://doi.org/10.1002/(SICI)1522-9505(19981201)261-262:1%3C135::AID-APMC135%3E3.0.CO;2-W)
21. Hiroki H., Yusuke S., Nagahide K. A Study of Aging Effect of Rubber Bearings After About Twenty Years in Use. *AJ Journal of Technology and Design*, 2009;15(30):393–398. <https://doi.org/10.3130/ajjt.15.393>.
22. Itoh Y., Gu H., Satoh K., Kutsuna Y. Experimental Investigation on Ageing Behaviors of Rubbers Used for Bridge Bearings. *Structural Engineering / Earthquake Engineering*, 2006;23(1):17s–31s. <https://doi.org/10.2208/jsceseee.23.17s>.
23. Nelson W. Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans, and Data Analyses. New York: John Wiley & Sons, 1990. Available at: <https://archive.org/details/acceleratedtesti0000nels>.
24. Le Huy M., Evrard G. Methodologies for Lifetime Predictions of Rubber Using Arrhenius and WLF Models. *Angewandte Makromolekulare Chemie*. 1998;261–262(1):135–142. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1522-9505\(19981201\)261-262:1%3C135::AID-APMC135%3E3.0.CO;2-W](https://doi.org/10.1002/(SICI)1522-9505(19981201)261-262:1%3C135::AID-APMC135%3E3.0.CO;2-W).
25. Levenberg K. A Method for the Solution of Certain Problems in Least Squares. *Quarterly of Applied Mathematics*, 1944;2(2):164–168. <https://doi.org/10.1090/qam/10666>.
26. Marquardt D.W. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 1963;11(2):431–441. <https://doi.org/10.1137/0111030>.
27. More J.J. The Levenberg–Marquardt Algorithm: Implementation and Theory. In: Watson G.A. (eds.). Numerical Analysis. Lecture Notes in Mathematics. Berlin: Springer; 1978;630:105–116. <https://doi.org/10.1007/BFb0067700>.
28. Гизятуллин И.Р. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026611573 Российская Федерация. Программа регрессионного моделирования и прогнозирования изменения модуля сдвига резинометаллических опор систем сейсмоизоляции зданий по данным ускоренного старения «RMO-AGE-FIT»: заявл. 14.01.2026; опублик. 21.01.2026. Режим доступа: <https://www1.fips.ru/iiss/document.xhtml?faces-redirect=true&id=bc2048ad528502b0a0279f52774e1e19>

References

1. Eisenberg J.M., Smirnov V.I. Innovative systems providing earthquake safety of structures and population, engineering and economic aspects. *Earthquake engineering. Constructions safety*, 2014, no. 3, pp.18–21. (In Russian).
2. Smirnov V.I. Seismic isolation as a current seismic building protection method in Russia. *Earthquake engineering. Constructions safety*, 2013, no. 4, pp. 41–54. (In Russian).
3. Bubis A.A., Afanasieva Ya.V. Review of the main historical methods used to reduce the effect of seismic impact in world practice. *Earthquake engineering. Construction safety*, 2024, no. 6, pp. 11–25. (In Russian). <https://doi.org/10.37153/2618-9283-2024-6-11-25>.
4. Belash T.A., Bubis A.A., Smirnova L.N., Zvezdov A.I. On the implementation of seismic isolation systems in earthquake engineering in the Russian Federation. *Earthquake engineering. Constructions safety*, 2024, no. 2, pp. 8–19. (In Russian). <https://doi.org/10.37153/2618-9283-2024-2-8-19>.
5. Giziatullin I.R., Smirnova L.N. Degradation of Physical and Mechanical Properties of Rubber-Metal Supports of Seismically Insulated Buildings During Operation. *Industrial and Civil Engineering*, 2024;(12):17–25. (In Russian). <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2024.12.17-25>.
6. Shirazi A. Thermal degradation of the performance of elastomeric bearings for seismic isolation. UC San Diego. 2010.ID: 0033D_10837. Available at: <https://escholarship.org/uc/item/6j3486gj>.
7. Billah A., Todorov B. Effects of subfreezing temperature on the seismic response of lead rubber bearing isolated bridge. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019;126:105814. <https://doi.org/10.1016/j.SOILDYN.2019.105814>.
8. Sciascetti A. The effect of temperature on unbonded fiber-reinforced elastomeric isolators. [M.A.Sc. Thesis]. 2017.
9. Zhang Rj., Li Aq. Experimental study on temperature dependence of mechanical properties of scaled high-performance rubber bearings. *Composites Part B: Engineering*, 2020;190(1):107932. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107932>.
10. Gheryani M.H., Razak H.A. Jameel M. Dynamic Response Changes of Seismic Isolated Building Due to Material Degradation of HDRB. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2015;40:3429–3442. <https://doi.org/10.1007/s13369-015-1794-7>.
11. McVitty W.J., Constantinou M.C. Property Modification Factors for Seismic Isolators: Design Guidance for Buildings. Technical Report MCEER-15-0005. 2015. Available at: <http://hdl.handle.net/10477/42187>.
12. Park J., Choun Y.S., Kim M.K., Hahm D. Reevaluation of the aging property modification factor of lead rubber bearings based on accelerated aging tests and finite element analysis. *Nuclear Engineering and Design*, 2019;347:59–66. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2019.03.021>.
13. Kustov S., Golyandin S., Sapozhnikov K., Robinson W.H. Amplitude-dependent internal friction, microplastic strain and recovery of lead at ambient temperature. *Materials Science and Engineering*, 1997;237:191–199. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(97\)00102-0](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(97)00102-0).
14. Choun Y.S., Park J., Choi I.K. Effects of Mechanical Property Variability in Lead Rubber Bearings on the Response of Seismic Isolation System for Different Ground Motions. *Nuclear Engineering and Technology*, 2014;46(5):605–618. <https://doi.org/10.5516/NET.09.2014.718>.
15. Astorga A.L., Gueguen P., Riviere J., Kashima T., Johnson P.A. Recovery of the resonance frequency of buildings following strong seismic deformation as a proxy for structural health. *Structural Health Monitoring*, 2019;18(5-6):1966–1981. <https://doi.org/10.1177/1475921718820770>.
16. Van Engelen N.C., Kelly J.M. Retest of Neoprene Seismic Isolation Bearings after 30 Years. *Structural Control and Health Monitoring*, 2015;22(1):139–151. <https://doi.org/10.1002/stc.1665>.
17. State Standard R 57354-2016/EN 1337-3:2005. Structural bearings. Part 3 Elastomeric bearings. Specifications. Moscow: Standartinform Publ.; 2017.
18. Arrhenius S. Über die Reaktionsgeschwindigkeit bei der Inversion von Rohrzucker durch Säuren. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 1889;4:226–248. <https://doi.org/10.1515/zpch-1889-0416>.
19. Nelson W. Accelerated Testing. New York: J. Wiley & Sons; 1990. Available at: <https://archive.org/details/acceleratedtesti0000nels>.
20. Le Huy M., Evrad G. Methodologies for lifetime predictions of rubber using Arrhenius and WLF models. *Die Angewandte Makromolekulare Chemie*, 1998;261–262(1):135–142. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1522-9505\(19981201\)261:1%3C135::AID-APMC135%3E3.0.CO;2-W](https://doi.org/10.1002/(SICI)1522-9505(19981201)261:1%3C135::AID-APMC135%3E3.0.CO;2-W)
21. Hiroki H., Yusuke S., Nagahide K. A Study of Aging Effect of Rubber Bearings After About Twenty Years in Use. *AIJ Journal of Technology and Design*, 2009;15(30):393–398. <https://doi.org/10.3130/aijt.15.393>.

22. Itoh Y., Gu H., Satoh K., Kutsuna Y. Experimental Investigation on Ageing Behaviors of Rubbers Used for Bridge Bearings. *Structural Engineering / Earthquake Engineering*, 2006;23(1):17s–31s. <https://doi.org/10.2208/jscesee.23.17s>.
23. Nelson W. Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans, and Data Analyses. New York: John Wiley & Sons, 1990. Available at: <https://archive.org/details/acceleratedtesti0000nels>.
24. Le Huy M., Evrard G. Methodologies for Lifetime Predictions of Rubber Using Arrhenius and WLF Models. *Angewandte Makromolekulare Chemie*, 1998;261–262(1):135–142. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1522-9505\(19981201\)261-262:1%3C135::AID-APMC135%3E3.0.CO;2-W](https://doi.org/10.1002/(SICI)1522-9505(19981201)261-262:1%3C135::AID-APMC135%3E3.0.CO;2-W).
25. Levenberg K.A Method for the Solution of Certain Problems in Least Squares. *Quarterly of Applied Mathematics*, 1944;2(2):164–168. <https://doi.org/10.1090/qam/10666>.
26. Marquardt D.W. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 1963;11(2):431–441. <https://doi.org/10.1137/0111030>.
27. More J.J. The Levenberg–Marquardt Algorithm: Implementation and Theory. In: Watson G.A. (eds.). Numerical Analysis. Lecture Notes in Mathematics. Berlin: Springer; 1978;630:105–116. <https://doi.org/10.1007/BFb0067700>.
28. Giziattullin I.R. Certificate of State Registration of a Computer Program No. 2026611573, Russian Federation. *"RMO-AGE-FIT": A program for regression modeling and forecasting changes in the shear modulus of rubber bearings in building base isolation systems based on accelerated aging data. Filed on 14 January 2026; published on 21 January 2026. Available at: <https://www1.fips.ru/iiss/document.xhtml?faces-redirect=true&id=bc2048ad528502b0a0279f52774e1e19>. [In Russian].

Информация об авторе / Information about the author

Ильнур Раэлевич Гизятуллин, заместитель руководителя отдела исследований сейсмостойкости сооружений, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», академический советник Российской Инженерной Академии, Москва
e-mail: ilnur@seismic-research.ru

Ilnur R. Giziattullin, Deputy Head of the Department for Seismic Resistance Research of Structures, Research Institute of Building Constructions named after V. A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Academic Advisor of the Russian Engineering Academy, Moscow
e-mail: ilnur@seismic-research.ru