

Научная статья

УДК 620.173.2; 519.25

doi: 10.17223/19988621/91/8

Новый метод поиска прямолинейного участка на экспериментальной диаграмме напряжение–деформация

Алексей Валерьевич Лихачев¹, Марина Владимировна Табанюхова²

¹ *Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения РАН,
Новосибирск, Россия,*

² *Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет,
Новосибирск, Россия*

¹ *ipm1@iae.nsk.su*

² *m.tabanyukhova@sibstrin.ru*

Аннотация. Предложен новый метод поиска прямолинейного участка на начальной части диаграммы напряжение–деформация, основанный на проверке статистической гипотезы по критерию Пирсона. С использованием этого метода по пяти диаграммам сжатия образцов из полиэтилентерефталат-гликоля (PETG) был найден модуль Юнга данного пластика. Он оказался равным 2.044×10^9 Па, что согласуется с результатами, полученными в работе J.M. Mercado-Colmenero и соавт., где механические свойства PETG исследовались при аналогичных условиях.

Ключевые слова: проверка статистических гипотез, критерий Пирсона, диаграмма напряжение–деформация, модуль Юнга

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 121022000116-0).

Для цитирования: Лихачев А.В., Табанюхова М.В. Новый метод поиска прямолинейного участка на экспериментальной диаграмме напряжение–деформация // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2024. № 91. С. 85–98. doi: 10.17223/19988621/91/8

Original article

A new method for searching rectilinear section in an experimental stress–strain diagram

Aleksey V. Likhachev¹, Marina V. Tabanyukhova²

¹ *Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation*

² *Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin),
Novosibirsk, Russian Federation*

¹ *ipm1@iae.nsk.su*² *m.tabanyukhova@sibstrin.ru*

Abstract. Polyethylene terephthalate glycol (PETG) is characterized by a double refraction effect which is used when modeling the stress states of building structures. This paper aims to study the mechanical properties of PETG due to the need for practical approval of the modeling results.

Experiments show that, for most plastics, the initial region of the stress–strain diagram significantly deviates from a straight line. However, an extended interval can be distinguished in this region, where the diagram is well approximated by a linear function. If the deviations of the diagram from the straight line are random, it is possible to test the statistical hypothesis of their correspondence. Only diagrams with valid hypothesis are applied in this study.

Twelve PETG samples have been tested using the fused deposition modeling (FDM) method. For the five diagrams, the hypothesis of the presence of the linear region in interval $\varepsilon \in [0.0075; 0.0275]$ is confirmed at a deviation significance level of 1%. The Young's modulus determined using the diagrams is $2.044 \pm_{0.027}^{0.047} \times 10^9$ Pa. This value falls within interval $2.01 \times 10^9 \div 2.11 \times 10^9$ Pa presented on Wikipedia. The obtained yield strength is 49.71 ± 1.81 MPa, which is consistent with the results reported in the literature and reference data.

Keywords: statistical hypothesis testing, Pearson criterion, stress–strain diagram, Young modulus

Acknowledgments: This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 121022000116-0).

For citation: Likhachev, A.V., Tabanyukhova, M.V. (2024) A new method for searching rectilinear section in an experimental stress–strain diagram. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 91. pp. 85–98. doi: 10.17223/19988621/91/8

Введение

В настоящее время пластики являются перспективными материалами для многих приложений, что объясняется широким разнообразием их свойств. В предлагаемой работе рассматривается полиэтилентерефталат-гликоль (PETG). Его использование в качестве материала для изготовления предметов повседневного быта (контейнеры для пищевых продуктов, емкости для жидкостей и т.п.) хорошо известно. Он также применяется в медицине для производства одноразовых шприцев и других расходных средств [1, 2]. Развитие методов 3D-печати [3–5] открыло новые возможности для применения PETG. В частности, по этой технологии теперь производятся имплантаты, а также фантомы для рентгеновской и магниторезонансной томографии [6, 7]. Изготовление изделий из PETG для различных отраслей промышленности и науки описано в работах [8, 9].

Интерес к PETG вызван не только его использованием в качестве материала для разнообразных промышленных изделий. Наряду с некоторыми другими веществами он обладает эффектом изменения оптических свойств в зависимости от внутренних напряжений, на котором основан метод фотоупругости [10, 11], нашедший применение в научных исследованиях, технологических процессах, а также в медицине. В частности, в офтальмологии с его помощью исследуется роговица

глаза [12]. В стоматологии посредством фотоупругого анализа оценивается распределение напряжений в зубных протезах [13, 14], а в сосудистой хирургии – напряжения в моделях кровеносной сети сосудов [15, 16]. Метод фотоупругости является эффективным средством изучения напряженных состояний деталей и узлов машин и механизмов [17–19], а в работе [20] он использовался для оценивания напряжений в массивах горных пород. В строительстве также представлены подобные исследования – как для моделей из пьезооптических материалов [21–24], так и для участков натуральных конструкций, на которые наносился слой фотоупругого покрытия [25, 26].

Данные для метода фотоупругости получают посредством расшифровки снятых соответствующим образом интерференционных картин. Для этого используется специальное оборудование, описанное, например, в [27]. На нем проводились эксперименты с образцами, изготовленными из PETG, результаты математической обработки которых представлены в [27–29]. В частности, в работах [28, 29] рассматриваются методы определения координат точек, трассирующих серединную линию интерференционной полосы.

Настоящее исследование посвящено изучению механических свойств PETG. Оно обусловлено необходимостью переносить результаты, полученные для изготовленных из него моделей, на реальные конструкции. Ставится задача получить из экспериментальной диаграммы напряжение–деформация, регистрируемой при одномерном сжатии образца, оценку значения модуля Юнга (ниже обозначается как E), а также диапазон напряжений, в котором материал работает в линейном режиме, т.е. для него выполняется закон Гука $\sigma = \varepsilon E$, где σ – нормальное напряжение, ε – относительное изменение длины образца. Подобные работы уже проводились ранее зарубежными исследователями. Смеси PETG с другими полимерами изучались в [30, 31]. В [32, 33] рассматривалась деформация образцов, изготовленных из PETG, в частности в [33] оценивались механические параметры с учетом анизотропии, вызванной особенностями технологии 3D-печати.

Отличие предлагаемого здесь метода состоит в способе выбора начального участка диаграммы, соответствующего работе материала в линейно-упругом режиме. Метод основывается на проверке соответствующей статистической гипотезы по критерию Пирсона. Он позволяет более точно найти границы участка, а также количественно оценить его близость к графику линейной функции. Это, в свою очередь, позволяет уменьшить случайную ошибку, не прибегая к усреднению по большому количеству диаграмм, как это было сделано, например, в упомянутой работе [33]. Возможность избежать такого усреднения является важным преимуществом, поскольку оно может привести к потере важной информации.

Заметим, что разработанный метод можно применять также и для анализа нелинейных участков диаграммы напряжение–деформация. При этом диаграмму на соответствующем интервале следует аппроксимировать подходящей функцией и выполнить операции, описанные в следующем разделе. При этом будет получено согласованное с данными аналитическое выражение для зависимости $\sigma(\varepsilon)$. Его наличие очень важно при исследовании механических свойств материалов, работающих в нелинейном режиме. В частности, по нему можно вычислять касательный и секущий модули, являющиеся аналогом модуля Юнга в нелинейном случае.

Предлагаемый метод

Экспериментальные исследования показывают, что диаграммы напряжение–деформация для большинства пластиков имеют широкую площадку текучести, а участок от нуля до ее начала может существенно отклоняться от прямой. Однако на нем можно выделить достаточно протяженный интервал, где диаграмма хорошо аппроксимируется линейной функцией $\sigma = a\varepsilon + b$. Первым этапом разработанного метода является визуальное определение такого участка, единого для всех имеющихся диаграмм. Обозначим его левую и правую границы через ε_0 и ε_n соответственно. Будем считать, что отклонения диаграмм от прямой на отрезке $[\varepsilon_0, \varepsilon_n]$ являются случайными величинами, имеющими одинаковое распределение. Для каждой диаграммы в отдельности проведем процедуру, аналогичную известной в математической статистике процедуре проверки соответствия данных гипотетическому распределению по критерию Пирсона [34]. Разобьем интервал $[\varepsilon_0, \varepsilon_n]$ на n одинаковых отрезков длины $l = (\varepsilon_n - \varepsilon_0)/n$. Их концы будут находиться в точках $\varepsilon_k = \varepsilon_0 + kl$, $k = 0, 1, 2, \dots, n$. Обозначим отрезки $[\varepsilon_{k-1}, \varepsilon_k]$, $k = 1, 2, \dots, n$, через Δ_k соответственно. Диаграммы регистрировались в моменты времени, разделенные одинаковыми промежутками. При этом число отсчетов, приходящееся на разные отрезки Δ_k , было различным (см. описание эксперимента в следующем разделе). Обозначим через m_k число отсчетов, попавших в отрезок Δ_k , для рассматриваемой диаграммы. (В случае если отсчет совпадает с границей считается, что он принадлежит левому интервалу.) Будем полагать, что отсчеты производятся достаточно часто, так что в каждый отрезок Δ_k , их попадает не менее двух. Вычислим критерий близости между прямой $a\varepsilon + b$ и диаграммой на участке $[\varepsilon_0, \varepsilon_n]$ по следующей формуле:

$$Z = M \sum_{k=1}^n \frac{(I_k - S_k)^2}{I_k}. \quad (1)$$

Здесь M – полное число отсчетов, попавших в интервал $[\varepsilon_0, \varepsilon_n]$, т.е. сумма всех m_k ; I_k – интеграл от функции $a\varepsilon + b$ на отрезке Δ_k :

$$I_k = \int_{\varepsilon_k}^{\varepsilon_{k+1}} (a\varepsilon + b) d\varepsilon = \frac{a}{2} (\varepsilon_{k+1}^2 - \varepsilon_k^2) + b(\varepsilon_{k+1} - \varepsilon_k). \quad (2)$$

В работе параметры a и b , определяющие прямолинейный участок, вычислялись для каждой диаграммы по всем M точкам, попавшим в интервал $[\varepsilon_0, \varepsilon_n]$, методом наименьших квадратов. Через S_k в (1) обозначена аппроксимация интеграла от диаграммы на отрезке Δ_k конечной суммой:

$$S_k = \frac{1}{m_k - 1} \sum_{i=1}^{m_k} \sigma(\varepsilon_{k,i}). \quad (3)$$

где $\sigma(\varepsilon_{k,i})$ – значение диаграммы в точке $\varepsilon_{k,i}$, $i = 0, 1, 2, \dots, m_k$. Таким образом, в (3) перебираются все отсчеты, принадлежащие отрезку Δ_k .

В силу того что отклонения диаграммы от прямой на интервале $[\varepsilon_0, \varepsilon_n]$ носят случайный характер, критерий Z , вычисляемый по формуле (1), также является случайной величиной. Известны условия, при выполнении которых он будет иметь распределение χ^2 с $n - 3$ степенями свободы. Зададим малую вероятность p (на практике обычно берется $0.001 \leq p \leq 0.05$). Обозначим через x_p квантиль по-

рядка $1 - p$ распределения $\chi^2(n - 3)$. Тогда вероятность события $Z \geq x_p$ равна p . Таким образом, если вычисленный для данной диаграммы критерий (1) оказался не меньше, чем x_p , то произошло маловероятное событие. Это, в свою очередь, означает, что предположение о том, что прямая $\sigma = a\varepsilon + b$ хорошо аппроксимирует экспериментальную диаграмму на интервале $[\varepsilon_0, \varepsilon_n]$, оказалось неверным и его следует отбросить. Далее для оценки величины модуля Юнга отбираются только те диаграммы, для которых было выполнено условие $Z < x_p$.

Описание эксперимента

Образцы для испытаний, изготовленные из PETG, представляют собой круглые цилиндры высотой $h = 30$ и диаметром $d = 20$ мм. Для их получения использовалась технология 3D-печати (см.: [3–5]). Применялся метод послойного наплавления FDM [35]. Слои при печати располагались перпендикулярно продольной оси образца, соответственно, ортогонально по отношению к линии приложения нагрузки. Печать производилась на 3D-принтере FLSUN QQ при температуре 240°C . Заполнение материалом образца составляло 100%.

Всего было изготовлено 12 цилиндров. Фотография одного из них представлена на рис. 1 слева. Образцы сжимались на широко распространенной в российских высших учебных заведениях установке КСИМ-40 (Комплекс для статических испытаний материалов до 40 кН, английская аббревиатура CSTM-40). Оборудование работало в режиме постоянной скорости перемещения активного захвата, которая составляла 10 мм/мин при диапазоне возможных скоростей от 0.5 до 60 мм/мин. Размеры моделей и скорость нагружения соответствуют ГОСТу 4651–2014 [37]. Регистрировались приложенная сила и перемещение подвижной траверсы, которое равно абсолютной деформации образца. Запись проводилась через равные промежутки времени. Из-за неравномерности истинного движения траверсы расстояния между ее последовательно измеренными позициями оказываются неравными. В проведенном эксперименте их значения принадлежат интервалу от 48 до 91 мкм при средней величине 62 мкм. Деформированный образец показан на рис. 1 справа.

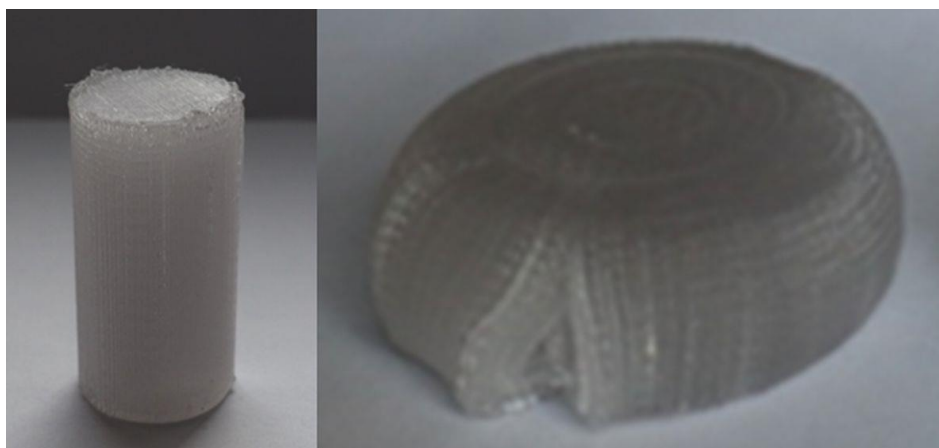


Рис. 1. Один из исследованных образцов до и после испытания
Fig. 1. One of the tested samples before and after testing

Обработка экспериментальных данных

Всего было снято 12 диаграмм, и только для пяти из них была подтверждена гипотеза о том, что они имеют линейный участок при $\varepsilon \in [0.0075, 0.0275]$ для 1%-ного уровня значимости отклонения (т.е. вероятность p равняется 0.01). Их начальные участки показаны на рис. 2: по горизонтальной оси отложена координата δx подвижной траверсы в микрометрах, по вертикальной – прилагаемая сила F в Ньютонах. На рис. 3 эти же диаграммы представлены в координатах относительных деформаций $\varepsilon = \delta x/h$ и расчетных напряжений $\sigma_c = 4F/\pi d^2$, которые выражены в МПа. Приведенные ниже результаты относятся именно к этим диаграммам.

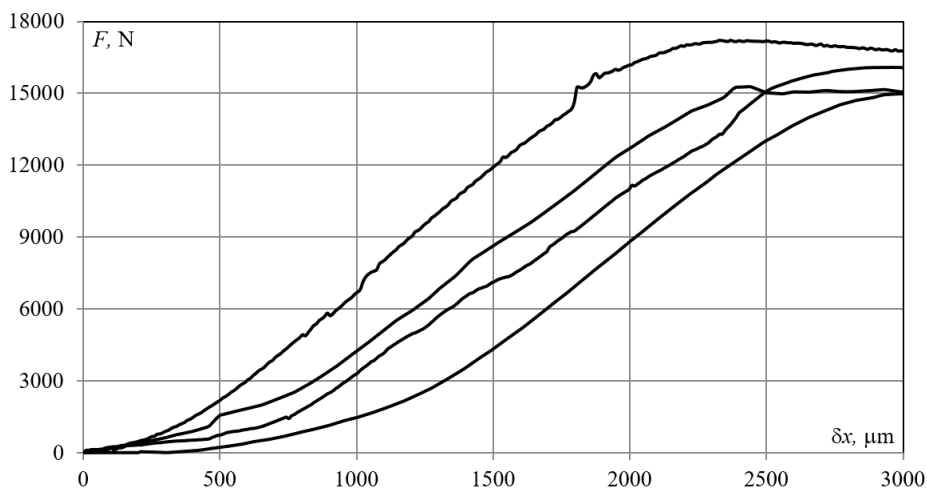


Рис. 2. Диаграммы усилие–абсолютное сжатие

Fig. 2. Force–absolute compression diagrams

На рис. 3 также приведена кривая, полученная путем арифметического усреднения пяти диаграмм:

$$\sigma_{avr}(\varepsilon_i) = \frac{1}{5} \sum_{j=1}^5 \sigma_{c,j}(\varepsilon_i). \quad (4)$$

Она выделена жирной линией. В (4) через $\sigma_{c,j}(\varepsilon_i)$ обозначено расчетное напряжение для j -й экспериментальной диаграммы при значении относительной деформации ε_i . На рис. 4 представлена часть кривой $\sigma_{avr}(\varepsilon)$ на интервале $[0.0075, 0.0275]$, сплошная линия. Найденная методом наименьших квадратов прямая $L_1(\varepsilon) = 2044\varepsilon - 12.29$, аппроксимирующая $\sigma_{avr}(\varepsilon)$ при $\varepsilon \in [0.0075, 0.0275]$, показана пунктиром. Если считать, что модуль Юнга материала E численно равен тангенсу угла наклона прямой $L_1(\varepsilon)$, то получается, что $E = 2.044 \times 10^9$ Па. Это значение попадает в интервал, приведенный в [36]: $2.01 \times 10^9 \div 2.11 \times 10^9$ Па. Также оно согласуется с результатами, опубликованными в работе [33]. Таким же образом были получены значения модуля Юнга для каждой из пяти диаграмм в отдельности. Максимальное из них оказалось равным 2.091×10^9 Па, а минимальное – 2.017×10^9 Па. Поэтому точность результата мы оценили как $E = 2.044 \pm_{0.027}^{0.047} \times 10^9$ Па.

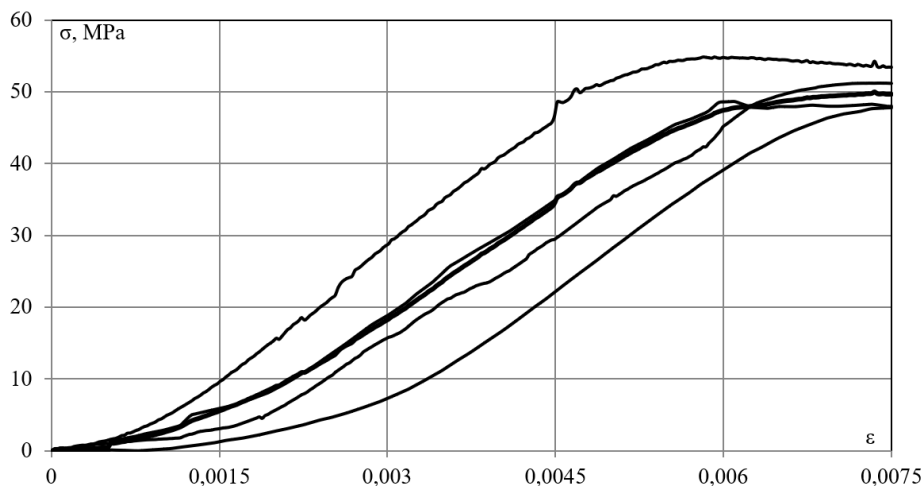
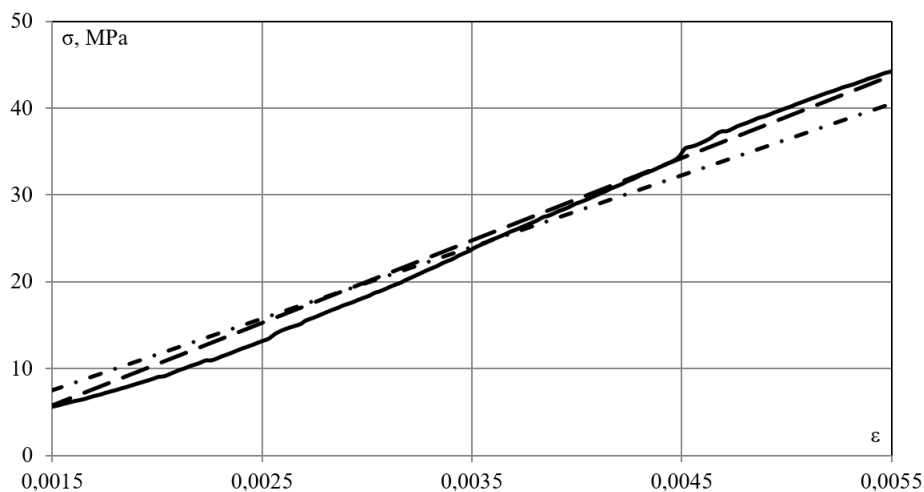


Рис. 3. Диаграммы напряжение–деформация

Fig. 3. Stress–strain diagrams

Рис. 4. Различные аппроксимации участка $\varepsilon \in [0.0075, 0.0275]$ усредненной диаграммыFig. 4. Various approximations of region $\varepsilon \in [0.0075, 0.0275]$ in the averaged diagram

Как видно из рис. 3, при $\varepsilon > 0.036$ кривая $\sigma_{avr}(\varepsilon)$ становится приблизительно параллельной оси абсцисс. За оценку предела текучести пластика PETG (ниже обозначается как σ_s) была принята величина $\sigma_{avr}(0.0375) = 49.71$ МПа. Это согласуется с данными, приведенными в [36]: от 47.9 до 52.9 МПа. Значения напряжения при $\varepsilon_s = 0.0375$ для других кривых на рис. 3 следующие: $\sigma_{c,1}(\varepsilon_s) = 53.42$ МПа, $\sigma_{c,2}(\varepsilon_s) = 51.17$ МПа, $\sigma_{c,3}(\varepsilon_s) = 49.85$ МПа, $\sigma_{c,4}(\varepsilon_s) = 47.98$ МПа, $\sigma_{c,5}(\varepsilon_s) = 47.72$ МПа. По этим данным вычислялось среднее абсолютное отклонение (MAD – mean absolute derivation) для оценки предела текучести:

$$MAD_{os} = \frac{1}{5} \sum_{j=1}^5 |\sigma_{avr}(\varepsilon_s) - \sigma_{c,j}(\varepsilon_s)| = 1.81. \quad (5)$$

Отметим, что значения $\sigma_s - MAD_{\sigma_s} = 47.9$ МПа и $\sigma_s + MAD_{\sigma_s} = 51.52$ МПа также укладываются в диапазон, указанный в [36].

Штрихпунктирной линией на рис. 4 показана прямая $L_2(\varepsilon) = 1981\varepsilon - 8.63$, аппроксимирующая усредненную диаграмму $\sigma_{avr}(\varepsilon)$ на участке $[0, \varepsilon_s]$, где она заметно нелинейна. Определенный по ней модуль Юнга равен 1.81×10^9 Па, что несколько меньше нижней границы приведенной в [36] оценки. Модуль Юнга, вычисленный по всем 12 зарегистрированным нами диаграммам на участках $[0.0075, 0.0275]$ и $[0; \varepsilon_s]$ оказался соответственно равным 2.36×10^9 и 1.82×10^9 Па. Обе эти величины отличаются от справочных значений и результатов работы [33]. Кроме того, модуль Юнга был вычислен по диаграммам, приведенным на рис. 2, по ГОСТу 4651–2014. Его величина оказалась равной 1.84×10^9 Па.

Рисунок 3 показывает, что на начальном участке $\varepsilon \in [0, 0.0375]$ диаграмма существенно отклоняется от линейной функции. Чтобы оценить степень близости между двумя кривыми, использовалось нормированное среднеквадратичное отклонение. Для оцифрованных кривых $C_1(\varepsilon_i)$ и $C_2(\varepsilon_i)$ оно вычисляется как

$$\Delta = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (C_1(\varepsilon_i) - C_2(\varepsilon_i))^2}, \quad (6)$$

где N – число узлов на интервале, в котором сравниваются кривые.

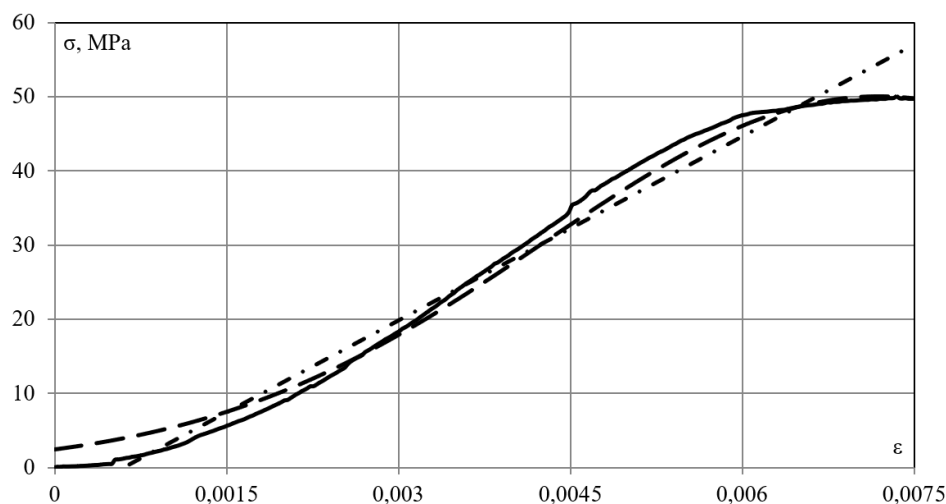


Рис. 5. Различные аппроксимации участка $\varepsilon \in [0, 0.0375]$ усредненной диаграммы

Fig. 5. Various approximations of region $\varepsilon \in [0, 0.0375]$ in the averaged diagram

По результатам численного моделирования оказалось, что гауссова функция значительно лучше, чем прямая, аппроксимирует экспериментальную диаграмму при малых деформациях. На рис. 5 сплошной линией проведена усредненная экспериментальная диаграмма $\sigma_{avr}(\varepsilon)$, штрихами изображен график функции $g(\varepsilon) = 50 \exp(-0.0000118(\varepsilon - 0.00719)^2)$. Ее параметры были найдены путем подбора. Отклонение (6) между $\sigma_{avr}(\varepsilon)$ и $g(\varepsilon)$ составляет 0.0514. Это почти в полтора раза меньше, чем отклонение между $\sigma_{avr}(\varepsilon)$ и $L_1(\varepsilon)$ (штрих-пунктирная линия), которое равно 0.0883.

Заключение

В работе предложен новый метод поиска участка на диаграмме напряжение–деформация, где материал работает в линейно-упругом режиме. В его основе лежит проверка гипотезы о соответствии участка диаграммы отрезку прямой по критерию Пирсона. Такой подход позволяет уменьшить статистическую ошибку по сравнению с обычно применяемой процедурой усреднения, не увеличивая при этом объем регистрируемых данных. На общедоступном оборудовании серийного производства, используемом в лабораториях высших учебных заведений России, были зарегистрированы диаграммы при сжатии 12 образцов, изготовленных из полиэтилентерефталат-гликоля (PETG). Для пяти из них была подтверждена гипотеза о том, что на отрезке $\varepsilon \in [0.0075, 0.0275]$ они соответствуют прямой. Полученное по ним значение модуля Юнга оказалось равным $E = 2.044 \pm_{0.027}^{0.047} \times 10^9$ Па. Это близко к величине 1.84×10^9 Па, которая была вычислена по ГОСТу 4651–2014 по тем же диаграммам. Оба этих значения согласуются со справочными данными, а также не противоречат результатам работ зарубежных авторов, использовавших высококлассное экспериментальное оборудование, на котором были сняты десятки диаграмм.

На всех зарегистрированных нами диаграммах имеется широкая площадка текучести, лежащая в диапазоне относительных деформаций от 0.0372 до 0.192. По ним была получена следующая оценка предела текучести: $\sigma_s = 49.71 \pm 1.81$ МПа, что согласуется со справочными данными [36]. Прилагаемое к образцам усилие изменялось в диапазоне от нуля до 40 000 Н, максимальное расчетное напряжение достигало 1.23×10^9 Па. Однако образцы не были разрушены окончательно, поэтому был сделан вывод, что предел прочности при сжатии PETG превосходит эту величину. Рассматриваемая полностью часть диаграммы до наступления текучести оказалась существенно нелинейной. Наилучшей аппроксимацией для нее оказалась гауссова функция.

Список источников

1. Mraz S.J. Taking advantage of medical plastics // *Machine Design*. 1994. V. 66 (17). P. 42–44.
2. King R.H. Plastics infiltrate medical-device redesign // *Design News*. 1996. V. 51 (1). P. 70–74.
3. Huang T.C., Lin C.Y. From 3D modeling to 3D printing: development of a differentiated spatial ability teaching model // *Telematics and Informatics*. 2017. V. 34 (2). P. 604–613. doi: 10.1016/j.tele.2016.10.005
4. Wang H., Zhang W., Yang J.K.W. Toward near-perfect diffractive optical elements via nanoscale 3D printing // *ACS Nano*. 2020. V. 14 (8). P. 10452–10461. doi: 10.1021/acsnano.0c04313
5. Lee A.Y., Zhou A., An J., Zhang Y., Chua C.K. Contactless reversible 4D-printing for 3D-to-3D shape morphing // *Virtual and Physical Prototyping*. 2020. V. 15 (4). P. 481–495. doi: 10.1080/17452759.2020.1822189
6. Laurikaitiene J., Puiso J., Jaselske E. Investigation of X-ray attenuation properties in 3D printing materials used for development of head and neck phantom // *Recent Advances in Technology Research and Education*. Springer, 2019. P. 137–143. doi: 10.1007/978-3-319-99834-3_18
7. Singh G., Saini A. Application of 3D printing technology in the development of biomedical implants: A review // *Trends in Biomaterials and Artificial Organs*. 2021. V. 35 (1). P. 95–103.
8. Alagoz A.S., Hasirci V. 3D printing of polymeric tissue engineering scaffolds using open-source fused deposition modeling // *Emergent Materials*. 2019. V. 3 (2). P. 429–439. doi: 10.1007/s42247-019-00048-2

9. Drees C., Höving S., Vautz W., Franzke J., Brandt S. 3D-printing of a complete modular ion mobility spectrometer // *Materials Today*. 2021. V. 44 (4). P. 58–68. doi: 10.1016/j.mattod.2020.10.033
10. Fukuda S., Karasaki T., Shiosaki T., Kawabata A. Photoelasticity and acousto-optic diffraction in piezoelectric semiconductors // *Physical Review B: Condensed Matter*. 1979. V. 20 (10). P. 4109–4119.
11. Ainola L., Aben H. Alternative equations of magnetophotoelasticity and approximate solution of the inverse problem // *Journal of the Optical Society of America A: Optics, Image Science, and Vision*. 2002. V. 19 (9). P. 1886–1893. doi: 10.1364/JOSAA.19.001886
12. Кочина М.Л., Демин Ю.А., Каплин И.В., Ковтун Н.М. Модель напряженно-деформированного состояния роговицы глаза // *Восточно-европейский научный журнал*. 2017. № 2-2. С. 62–67.
13. Демидова И.И. Фотоупругость и стоматология // *Российский журнал биомеханики*. 1999. № 2. С. 26–27.
14. Котенко М.В., Раздорский В.В., Лелявин А.Б. Поляризационно-оптический метод в исследовании напряженно-деформированного состояния моделей с дентальными имплантатами из нитинола // *Сибирский медицинский журнал*. 2018. № 8. С. 34–38.
15. Matsushima M., Tercero C., Ikeda S., Fukuda T., Negoro M. Three-dimensional visualization of photoelastic stress analysis for catheter insertion robot // *Proceedings of 23rd IEEE/RSJ 2010 International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2010. Taipei, 2010. P. 879–884. doi: 10.1109/IROS.2010.5650275
16. Matsushima M., Tercero C., Ikeda S., Fukuda T., Arai F., Negoro M., Takahashi I. Photoelastic stress analysis in blood vessel phantoms: three-dimensional visualization and saccular aneurysm with bleb // *International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*. 2011. V. 7 (1). P. 33–41. doi: 10.1002/rcs.365
17. Паулиш А.Г., Сидоров В.И., Федоринин В.Н., Шатов В.А. Пьезооптический датчик деформации и метод контроля параметров движения подъемных механизмов // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2018. № 6. С. 530–538. doi: 10.17586/0021-3454-2018-61-6-530-538.
18. Xi X., Wong G.K.L., Weiss T., Russell P.S.J. Measuring mechanical strain and twist using helical photonic crystal fiber // *Optics Letters*. 2013. V. 38 (24). P. 5401–5404. doi: 10.1364/OL.38.005401
19. Волков И.В. Внестендовая спекл-голография. Использование голографической и спекл-интерферометрии при измерении деформаций натурных конструкций // *Компьютерная оптика*. 2010. № 1. С. 82–89.
20. Feng W., Laishou L., Junhua Z., Chun Y., Yue W. Research on the effect of bedrock upon the stress of a gravity dam bulk by the photoelastic method // *Journal of Materials Processing Technology*. 2002. V. 123 (2). P. 236–240. doi: 10.1016/S0924-0136(01)01185-2
21. Морозова Д.В., Серова Е.А. Исследование влияния конструктивного решения узлов металлических конструкций при вариантном проектировании // *Экология и строительство*. 2015. № 2. С. 4–8.
22. Попова М.В., Шохин П.Б., Глебова Т.О., Шабардина Н.Д. Особенности инженерного расчета деревокомпозитных конструкций // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2018. № 8, С. 36–43. doi: 10.12737/article_5b6d5846d16d19.35588118
23. Zerkal S.M., Kharinova N.V., Tabanyukhova M.V. Investigation of stress state in plane truss nodes // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. XIII International Scientific Conference Architecture and Construction 2020. Bristol : IOP Publishing Ltd., 2020. Art. 012008. doi: 10.1088/1757-899X/953/1/012008
24. Албаут Г.Н., Матус Е.П., Табанюхова М.В. Исследование напряженного состояния дисперсно-армированных балок с привлечением метода фотоупругости // *Деформация и разрушение материалов*. 2009. № 4. С. 46–48.

25. Ахметзянов Ф.Х. Влияние поверхности бетонных и железобетонных элементов на повреждаемость (часть 2) // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2010. № 1. С. 96–101.
26. Маковецкая-Абрамова О.В., Хлопова А.В., Маковецкий В.А. Исследование концентрации напряжений при сварке трубопроводов // Техничко-технологические проблемы сервиса. 2014. № 2. С. 25–27.
27. Aseyev M.A., Tabanyukhov K.A., Tabanyukhova M.V. Search for plastics with piezo optic properties // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. The conference proceedings ICCATS-2020. IOP Publishing Ltd, 2020. Art. 022074. doi: 10.1088/1757-899X/962/2/022074
28. Лихачев А.В., Табанюхова М.В. Оценка расстояния от заданной точки до максимума интерференционной полосы // Автометрия. 2021. Т. 57, № 3. С. 30–38. doi: 10.15372/AUT20210304
29. Лихачев А.В., Табанюхова М.В. Новый алгоритм обработки данных метода фотоупругости // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2022. № 79. С. 100–110. doi: 10.17223/19988621/79/9
30. Subramaniam C.K., Kaiser A.B., Gilberd P.W., Liu C.J., Wessling B. Conductivity and thermopower of blends of polyaniline with insulation polymers (PETG and PMMA) // Solid State Communications 1996. V. 97 (3). P. 235–238.
31. Hwang S.H., Jeong K.S., Jung J.C. Thermal and mechanical properties of amorphous copolyester (PETG)/LCP blends // European Polymer Journal. 1999. V. 35 (8). P. 1439–1443.
32. Dupaix R.B., Boyce M.C. Finite strain behavior of poly(ethylene terephthalate) (PET) and poly(ethylene terephthalate)-glycol (PETG) // Polymer. 2005. V. 46 (13). P. 4827–4838. doi: 10.1016/j.polymer.2005.03.083
33. Mercado-Colmenero J.M., Mata-Garcia E., Rodriguez-Santiago M., Martin-Doñate C., Dolores La Rubia M. Experimental and numerical analysis for the mechanical characterization of PETG polymers manufactured with FDM technology under pure uniaxial compression stress states for architectural applications // Polymers. 2020. V. 12 (10). Art. 2202. doi: 10.3390/polym12102202
34. Лузачев В.С. Теория вероятностей и математическая статистика. М. : Наука, 1979.
35. Wickramasinghe S., Tran P., Do T. FDM-based 3D printing of polymer and associated composite: A review on mechanical properties, defects and treatments. // Polymers. 2020. V. 12 (7). Art. 1529. doi: 10.3390/polym12071529
36. Полиэтилентерефталат-гликоль (ПЭТГ) – пластик // Википедия : свободная энциклопедия. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Полиэтилентерефталат-гликоль \(ПЭТГ\) — пластик](https://ru.wikipedia.org/wiki/Полиэтилентерефталат-гликоль_(ПЭТГ)_—_пластик)
37. ГОСТ 4651–2014. Пластмассы. Метод испытания на сжатие. Изм. 1. Взамен ГОСТ 4651–82; введен 29.05.2014. М. : Стандартиформ, 2014.

References

1. Mraz S.J. (1994) Taking advantage of medical plastics. *Machine Design*. 66(17). pp. 42–44.
2. King R.H. (1996) Plastics infiltrate medical-device redesign. *Design News*. 51(1). pp. 70–74.
3. Huang T.C., Lin C.Y. (2017) From 3D modeling to 3D printing: development of a differentiated spatial ability teaching model. *Telematics and Informatics*. 34(2). pp. 604–613. doi: 10.1016/j.tele.2016.10.005
4. Wang H., Zhang W., Yang J.K.W (2020) Toward near-perfect diffractive optical elements via nanoscale 3D printing. *ACS Nano*. 14(8). pp. 10452–10461. doi: 10.1021/acsnano.0c04313
5. Lee A.Y., Zhou A., An J., Zhang Y., Chua C.K. (2020) Contactless reversible 4D-printing for 3D-to-3D shape morphing. *Virtual and Physical Prototyping*. 15(4). pp. 481–495. doi: 10.1080/17452759.2020.1822189
6. Laurikaitiene J., Puiso J., Jaselske E. (2019) Investigation of X-ray attenuation properties in 3D printing materials used for development of head and neck phantom. *Recent Advances in Technology Research and Education*. pp. 137–143. doi: 10.1007/978-3-319-99834-3_18

7. Singh G., Saini A. (2019) Application of 3D printing technology in the development of bio-medical implants: A review. *Trends in Biomaterials and Artificial Organs*. 35(1). pp. 95–103.
8. Alagoz A.S., Hasirci V. (2020) 3D printing of polymeric tissue engineering scaffolds using open-source fused deposition modeling. *Emergent Materials*. 3(2). pp. 429–439. doi: 10.1007/s42247-019-00048-2
9. Drees C., Höving S., Vautz W., Franzke J., Brandt S. (2021) 3D-printing of a complete modular ion mobility spectrometer. *Materials Today*. 44(4). pp. 58–68. doi: 10.1016/j.mattod.2020.10.033
10. Fukuda S., Karasaki T., Shiosaki T., Kawabata A. (1979) Photoelasticity and acousto-optic diffraction in piezoelectric semiconductors. *Physical Review B: Condensed Matter*. 20(10). pp. 4109–4119.
11. Ainola L., Aben H. (2002) Alternative equations of magnetophotoelasticity and approximate solution of the inverse problem. *Journal of the Optical Society of America A: Optics, Image Science, and Vision*. 19(9). pp. 1886–1893. doi: 10.1364/JOSAA.19.001886
12. Kochina M.L., Demin Yu.A., Kaplin I.V., Kovtun N.M. (2017) Model' napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya rogovitsy glaza [Model of stress-deformed status of the eye cornea]. *Vostochno-evropeyskiy nauchnyy zhurnal – Eastern European Scientific Journal*. 2(2). pp. 62–67.
13. Demidova I.I. (1999) Photoelasticity and dentistry. *Russian Journal of Biomechanics*. 3(2). pp. 9–10.
14. Kotenko M.V., Razdorskiy V.V., Lelyavin A.B. (2018) Polyarizatsionno-opticheskiy metod v issledovanii napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya modeley s dental'nymi implantatami iz nitinola [Polarization-optical method in the study of the stress-strain state of models with dental implants made of nitinol]. *Sibirskiy meditsinskiy zhurnal (Irkutsk) – Siberian Medical Journal (Irkutsk)*. 147(8). pp. 34–38.
15. Matsushima M., Tercero C., Ikeda S., Fukuda T., Negoro M. (2010) Three-dimensional visualization of photoelastic stress analysis for catheter insertion robot. *Proceedings of 23rd International Conference on Intelligent Robots and Systems. Taipei, 2010*. pp. 879–884. doi: 10.1109/IROS.2010.5650275
16. Matsushima M., Tercero C., Ikeda S., Fukuda T., Arai F., Negoro M., Takahashi I. (2011) Photoelastic stress analysis in blood vessel phantoms: three-dimensional visualization and saccular aneurysm with bleb. *International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*. 7(1). pp. 33–41. doi: 10.1002/rcs.365
17. Paulish A.G., Sidorov V.I., Fedorinin V.N., Shatov V.A. (2018) P'ezoopticheskiy datchik deformatsii i metod kontrolya parametrov dvizheniya pod'iomnykh mekhanizmov [Piezo-optical deformation sensor and method for monitoring movement parameters of lifting mechanisms]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie – Journal of Instrument Engineering*. 61(6). pp. 530–538. doi: 10.17586/0021-3454-2018-61-6-530-538
18. Xi X., Wong G.K.L., Weiss T., Russell P.S.J. (2013) Measuring mechanical strain and twist using helical photonic crystal fiber. *Optics Letters*. 38(24). pp. 5401–5404. doi: 10.1364/OL.38.005401
19. Volkov I.V. (2010) Vnestendovaya spekl-golografiya. Ispol'zovanie golograficheskoy i spekl-interferometrii pri izmerenii deformatsiy naturnykh konstruktсий [Off-brand speckle holography. The use of holographic and speckle interferometry in measuring deformations of full-scale structures]. *Komp'yuternaya optika – Computer Optics*. 34(1). pp. 82–89.
20. Feng W., Laishou L., Junhua Z., Chun Y., Yue W. (2002) Research on the effect of bedrock upon the stress of a gravity dam bulk by the photoelastic method. *Journal of Materials Processing Technology*. 123(2). pp. 236–240. doi: 10.1016/S0924-0136(01)01185-2
21. Morozova D.V., Serova E.A. (2015) Issledovanie vliyaniya konstruktivnogo resheniya uzlov metallicheskih konstruktсий pri variantnom proektirovanii [Research of influence of constructive solutions to the nodes of metal structures under random design]. *Ekologiya i stroitel'stvo*. 2. pp. 4–8.
22. Popova M.V., Shokhin P.B., Glebova T.O., Shabardina N.D. (2018) Osobennosti inzhenernogo raschiota derevokompozitnykh konstruktсий [Features of engineering calculation of

- wood composite structures]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova – Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 8. pp. 36–43. doi: 10.12737/article_5b6d5846d16d19.35588118
23. Zerkal S.M., Kharinova N.V., Tabanyukhova M.V. (2020) Investigation of stress state in plane truss nodes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. XIII International Scientific Conference Architecture and Construction. BRISTOL, 2020*. Article 012008. doi: 10.1088/1757-899X/953/1/012008
24. Albaut G.N., Matus E.P., Tabanyukhova M.V. (2009) Issledovanie napryazhennogo sostoyaniya dispersno-armirovannykh balok s privlecheniem metoda fotouprugosti [Investigation of the stress state of dispersed-reinforced beams using the photoelasticity method]. *Deformatsiya i razrushenie materialov – Russian Metallurgy (Metally)*. 4. pp. 46–48.
25. Akhmetzyanov F.Kh. (2010) Vliyanie poverkhnosti betonnykh i zhelezobetonnykh elementov na povrezhdaemost' (chast' 2) [Influence of surface the concretes and reinforced concretes elements on the damage (Part 2)]. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 1. pp. 96–101.
26. Makovetskaya-Abramova O.V., Khlopova A.V., Makovetskiy V.A. (2014) Issledovanie kontsentratsii napryazheniy pri svarke truboprovodov [Research of concentration of tensions at welding of pipelines]. *Tekhniko-tekhnologicheskie problemy servisa*. 2. pp. 25–27.
27. Aseyev M. A., Tabanyukhov K. A., Tabanyukhova M. V. (2020) Search for plastics with piezo optic properties. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. The conference proceedings ICCATS-2020*. Article 022074. doi: 10.1088/1757-899X/962/2/022074
28. Likhachev A.V., Tabanyukhova M.V. (2021) Assessing the distance from a given point to the maximum of interference band. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 57(3). pp. 250–256. doi: 10.3103/S8756699021030109
29. Likhachev A.V., Tabanyukhova M.V. (2022) Novyy algoritm obrabotki dannykh metoda fotouprugosti [A new algorithm for processing the data of the photoelasticity method]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 79. pp. 100–110. doi: 10.17223/19988621/79/9
30. Subramaniam C.K., Kaiser A.B., Gilberd P.W., Liu C.J., Wessling B. (1996) Conductivity and thermopower of blends of polyaniline with insulation polymers (PETG and PMMA). *Solid State Communications*. 97(3). pp. 235–238.
31. Hwang S.H., Jeong K.S., Jung J.C. (1999) Thermal and mechanical properties of amorphous copolyester (PETG)/LCP blends. *European Polymer Journal*. 35(8). pp. 1439–1443.
32. Dupaix R.B., Boyce M.C. (2005) Finite strain behavior of polyethylene terephthalate (PET) and polyethylene terephthalate-glycol (PETG). *Polymer*. 46(13). pp. 4827–4838. doi: 10.1016/j.polymer.2005.03.083
33. Mercado-Colmenero J.M., Mata-Garcia E., Rodriguez-Santiago M., Martin-Doñate C., Dolores La Rubia M. (2020) Experimental and numerical analysis for the mechanical characterization of PETG polymers manufactured with FDM technology under pure uniaxial compression stress states for architectural applications. *Polymers*. 12(10). A. Article 2202. doi: 10.3390/polym12102202
34. Pugachev V.S. (1979) *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [Probability theory and mathematical statistics]. Moscow: Nauka.
35. Wickramasinghe S., Tran P., Do T. (2020) FDM-based 3D printing of polymer and associated composite: A review on mechanical properties, defects and treatments. *Polymers*. 12(7). A. Article 1529. doi: 10.3390/polym12071529
36. Polyethylene Terephthalate glycol (PETG) – plastic. Internet resource "Wikipedia". URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki>
37. GOST 4651–2014. Plastmassy. Metod ispytaniy na szhatie [Plastics. Compression test method]. Moscow: Standartinform.

Сведения об авторах:

Лихачев Алексей Валерьевич – доктор технических наук, старший научный сотрудник Института автоматизации и электрометрии Сибирского отделения РАН (Новосибирск, Россия). E-mail: ipm1@iae.nsk.su

Табанюхова Марина Владимировна – кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой строительной механики Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин) (Новосибирск, Россия). E-mail: m.tabanyukhova@sibstrin.ru

Information about the authors:

Likhachev Aleksey V. (Doctor of Technical Sciences, Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: ipm1@iae.nsk.su

Tabanyukhova Marina V. (Candidate of Technical Sciences, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: m.tabanyukhova@sibstrin.ru

Статья поступила в редакцию 11.07.2023; принята к публикации 03.10.2024

The article was submitted 11.07.2023; accepted for publication 03.10.2024