

УДК 69.059.7
EDN: RDBAUU

[https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-3-\(634\)-66-76](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-3-(634)-66-76)

**В.М. ЮРОВ¹, К.Н. ЖАНГОЗИН¹, Д.Б. КАРГИН^{2*},
А.К. НУРКАСИМОВ², Ж.С. КАСЫМХАНОВ²**

¹ ТОО «ТСК-Восток», пр. Республики, д. 3/2–40, г. Астана, 010000, Республика Казахстан

² Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Сатпаева, д. 2, г. Астана, 010008, Республика Казахстан

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ГРАФЕНОВЫХ БЕТОНОВ

Аннотация

Введение. На сегодняшний день количество публикаций по бетону с примесью графена и оксида графена перевалило за 3000. Однако существует недостаток этих работ (в большом количестве), который состоит в том, что при получении бетона нет контроля числа монослоев графена, а для природного графита число монослоев равно трем. Когда число монослоев выше трех, то он переходит в графит, свойства которого отличны от уникального одноатомного графена. Поэтому в опубликованных работах наблюдается большая разница по свойствам бетона.

Цель. Разработать технологию получения графенового бетона с контролируемым числом монослоев графена и исследовать влияние графена и оксида графена на износостойкость бетона.

Материалы и методы. Стандартный бетон приготавливался следующим образом: водный раствор с оксидом графена (GO) и с восстановленным оксидом графена (rGO) помещался в ванну, где ультразвуковым излучателем создавалось ультразвуковое поле и проводилось расслоение графита и оксида графита на монослои графена и оксида графена; при этом частота ультразвукового поля подбиралась из «скрытой» энергии деформации образцов; контроль за расслоением графита проводился по спектрам УФ-излучения и спектрам Рамана; цемент М400; щебень с размерами зерен 5–20 мм; песок марки М2,5–2,9; мешалка VORONEZHFortis; вибростол; объем бетона – 10 л. Полученные образцы бетона испытывались на прессе ПГМ-2000МГ4.

Результаты. В период от 1 до 7 суток прочность образцов на сжатие относительно контрольных образцов увеличилась от 13 до 63 %, а до 14 суток – от 16 до 62 %. Относительно влияния графеновой суспензии можно сделать вывод: происходит расслоение графита и оксида графита на монослои графена и оксида графена в ультразвуковом поле определенной частоты; большая удельная поверхность графена и оксида графена служит источником кристаллизации и затвердевания бетона.

Перечисленные эффекты особенно сильно проявляются при концентрациях графена или оксида графена в области 0,05–0,07 мас. % от массы бетонной

смеси. При превышении этой концентрации идет коагуляция монослоев графена и превращение их в графит.

Для получения графеновых бетонов высокой износостойкости на производстве нужно выдерживать регламент по получению суспензии в ультразвуковом поле, как описано выше.

Выводы. В статье предложена модель трещин в графеновом бетоне на основе теории катастроф, из которой следует, что и графен и оксид графена входят в межслоевую область, разрушая структуру геля C–S–H за счет резкого уменьшения молярной массы соединения. Это является тормозом движения нанотрещин, которые возникают в любом твердом теле при образовании его поверхности. Показано, что модификация бетона оксидами графена повышает его износостойкость в 4–5 раз по отношению к стандартному бетону.

Ключевые слова: бетон, поверхностный слой, монослой, графит, графен, оксид графена, износостойкость, суспензия, модификация

Для цитирования: Юров В.М., Жангозин К.Н., Каргин Д.Б., Нуркасимов А.К., Касымханов Ж.С. Износостойкость графеновых бетонов // *Бетон и железобетон*. 2026. № 3(634). С. 66–76. [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-3\(634\)-66-76](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-3(634)-66-76) EDN: RDBAUU

Вклад авторов

Юров В.М. – модель нанотрещин, обсуждение результатов.

Жангозин К.Н. – написание статьи.

Каргин Д.Б. – обсуждение результатов, редакция рукописи.

Нуркасимов А.К. – получение экспериментальных результатов.

Касымханов Ж.С. – подготовка образцов.

Финансирование

Научная статья опубликована в рамках выполнения грантового финансирования на 2024–2026 годы ИРН № AP23488258. Исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан.

Благодарность

Авторы статьи выражают огромную благодарность компании RI Instruments and Innovation (Индия) за активное сотрудничество и предоставление образцов восстановленного и малослойного оксидов графена собственного производства, а также руководству и сотрудникам завода модульных конструкций MODEX компании BI Group (Казахстан) за предоставленную возможность

проведения испытаний на базе производственной лаборатории.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 25.08.2025

Поступила после рецензирования 19.01.2026

Принята к публикации 22.01.2026

**V.M. YUROV¹, K.N. ZHANGOZIN¹, J.B. KARGIN^{2*},
A.K. NURKASIMOV², ZH.S. KASYMKHANOV²**

¹ TOO "TSK Vostok", Respublika av., 3/2–40, Astana c., 010000, Republic of Kazakhstan

² Eurasian National University named after L.N. Gumilyov,
Astana city, Satbaev str., 2, 010008, Republic of Kazakhstan

WEAR RESISTANCE OF GRAPHENE CONCRETE

Abstract

Introduction. Today, the number of publications on concrete with an admixture of graphene and graphene oxide has exceeded 3000. However, there is a drawback to these works (in large quantities), which is that when producing concrete, there is no control over the number of graphene monolayers, and for natural graphite the number of monolayers is three. When the number of monolayers exceeds three, it turns into graphite, the properties of which are different from the unique monatomic graphene. Therefore, there is a large difference in the properties of concrete in published works.

Aim. To develop a technology for producing graphene concrete with a controlled number of graphene monolayers and to investigate the effect of graphene and graphene oxide on concrete wear resistance.

Materials and methods. Standard concrete was prepared as follows: an aqueous solution with graphene oxide (GO) and reduced graphene oxide (rGO) was placed in a bath, where an ultrasonic emitter created an ultrasonic field and the graphite and graphite oxide were separated into monolayers of graphene and graphene oxide; the frequency of the ultrasonic field was selected from the "latent" energy of deformation of the samples; graphite delamination was monitored using UV and Raman spectra; M400 cement; crushed stone with grain sizes of 5–20 mm; sand grade M2.5–2.9; VORONEZHFortis mixer; vibrating table; concrete volume – 10 L. The resulting concrete samples were tested on a PGM-2000MG4 press.

Results.

In the period from 1 to 7 days, the compressive strength of the samples relative to the control samples increased from 13 to 63 %, and up to 14 days – from 16 to 62 %. Regarding the effect of the graphene suspension, the following conclusion can be made: stratification of graphite and graphite oxide into monolayers of graphene and graphene oxide occurs in an ultrasonic field of a certain frequency; the large specific surface area of graphene

and graphene oxide serve as a source of crystallization and hardening of concrete.

The above effects are especially pronounced at concentrations of graphene or graphene oxide in the range of 0.05 – 0.07 % of the concrete mixture. At higher concentrations, coagulation of graphene monolayers and their transformation into graphite occurs.

To obtain highly wear-resistant graphene concretes in production, it is necessary to adhere to the regulations for obtaining a suspension in an ultrasonic field, as described above.

Conclusions. The article proposes a model of cracks in graphene concrete based on the theory of catastrophes, from which it follows that both graphene and graphene oxide enter the interlayer region, destroying the structure of the C–S–H gel due to a sharp decrease in the molar mass of the compound. This is a brake on the movement of nanocracks that occur in any solid when its surface is formed. It has been shown that modifying concrete with graphene oxides increases its wear resistance by 4–5 times compared to standard concrete.

Keywords: concrete, surface layer, monolayer, graphite, graphene, graphene oxide, wear resistance, suspension, modification

For citation: Yurov V.M., Zhangozin K.N., Kargin D.B., Nurkasimov A.K., Kasymkhanov Zh.S. Wear resistance of graphene concrete. *Concrete and reinforced concrete*, 2026, no. 3(634), pp. 66–76. (In Russian) DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-3\(634\)-66-76](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-3(634)-66-76) EDN: RDBAUJ

Authors contribution statement

Yurov V.M. – nanocracks model, discussion of results.

Zhangozin K.N. – writing of the article.

Kargin J.B. – discussion of results, editing of the manuscript.

Nurkasimov A.K. – obtaining experimental results.

Kasymkhanov Zh.S. – preparation of samples.

Funding

This scientific article was published within the framework of the grant funding for 2024–2026 IRN No. AP32488258. The research is funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan.

Acknowledgements

The authors express their sincere gratitude to RI Instruments and Innovation (India) for their active collaboration and for providing proprietary samples of reduced graphene oxide (rGO) and few-layer graphene oxide (FLGO). The authors also extend their

appreciation to the management and staff of the MODEX Modular Construction Plant, a subsidiary of BI Group (Kazakhstan), for providing access to their production laboratory facilities for conducting the experimental testing.

Conflict of interest

The authors declares no conflict of interest.

Received 25.08.2025

Revised 19.01.2026

Accepted 22.01.2026

Введение

Прошло более 20 лет с момента открытия графена, который представляет монослой (одноатомный слой) кристаллического графита [1]. После этого открытия появилось большое количество исследований по применению графена в различных областях человеческой деятельности: в микро- и нанoeлектронике, в медицине, в машиностроении, в производстве авиа- и космической техники. Бетон, как строительный материал, также не стал исключением [2]. На сегодня количество публикаций по бетону с примесью графена и оксида графена перевалило за 3000. Однако существует недостаток этих работ (в большом количестве), который состоит в том, что при получении бетона нет контроля числа монослоев графена, а для природного графита число монослоев равно трем [3–5]. Когда число монослоев свыше трех, то он переходит в графит, свойства которого отличны от уникального одноатомного графена. Поэтому наблюдается большая разница по свойствам бетона в опубликованных работах. Обзор по моделям вхождения графена (G) или оксида графена (GO) в бетон проведен в работах [6–10].

Существует несколько методов вхождения графена в бетонную смесь:

- Происходит дисперсия графена в воде с помощью ультразвука (УЗ) или с применением поверхностно-активных веществ (ПАВ), а затем смесь смешивается с компонентами бетона.
- Графен в виде сухого порошка вводится в бетонную смесь, тщательно перемешивается и заливается водой.
- Нанесение графена на поверхность щебня или частиц песка адгезионными добавками, а полученная смесь вводится в бетонную основу.

В настоящей статье приводятся экспериментальные результаты по модификации бетона добавками графита и оксида графита и предлагается новая модель износостойкости графенового бетона.

Образцы и методы исследования

Стандартный бетон приготавливался следующим образом: водный раствор с оксидом малослойного графена (GO) и с восстановленным оксидом графена (rGO) помещался в ванну, где излучателем создавалось ультразвуковое поле (УЗ-поле) и по методике работы [11] проводилось расслоение графита на монослой графена и оксида графена; контроль за расслоением графита проводился по спектрам УФ-излучения и спектрам Рамана.

Для изготовления бетонных образцов использовался портландцемент и два типа графеновых модификаторов: малослойный оксид графена (FLGO) и восстановленный оксид графена (rGO).

Для замеса бетона использовали:

- цемент марки портландцемент со шлаком ЦЕМ II/A-Ш 32,5Н от 6 % до 20 % класса 32,5 нормально-твердеющий, ГОСТ 31108–2003;
- песок марки М2,5–2,9, модуль крупности 3,2 мм, содержание пылевидных и глинистых до 1 %, насыпная плотность 1500 кг/м³;
- щебень: фракция 5–10 мм, содержание зерен пластинчатой и игольчатой формы 4 %, марка по прочности D1200, насыпная плотность 1350 кг/м³;
- мешалка VORONEZHFortis; вибростол; объем бетона – 10 л.

Испытания на определение механической прочности бетона на сжатие проводились на гидравлическом прессе ПГМ-2000МГ4 (рис. 1). через 1, 7 и 14 суток [5]. Данная установка позволяет измерять абсолютную прочность бетонных кубиков, выражаемую в мегапаскалях. Для унифицирования и сравнения полученных результатов прочности образцов они выражались в виде отношения P_i/P_c , где P_i есть абсолютное значение прочности испытуемого образца, P_c – прочность контрольного образца.

Спектры Рамана бетонной суспензии показаны на рис. 2.



а (a)



б (b)

Рис. 1. Образцы бетона (а); пресс ПГМ-2000МГ4 (б)
Fig. 1. Concrete samples (a); PGM-2000MG4 press (b)

Результаты исследования

Графики полученных образцов приведены на рис. 3–5.

По результатам исследования получено:

1. В период от 1 до 7 суток прочность образцов на сжатие относительно контрольных образцов увеличилась от 13 до 63 %, а до 14 суток – от 16 до 62 %. Относительно влияния графеновой суспензии можно сделать вывод, что происходит расслоение графита и оксида графита на монослои графена и оксида графена в УЗ-поле определенной частоты; большая удельная поверхность графена и оксида графена служит источником кристаллизации и затвердевания бетона.

2. Перечисленные выше эффекты особенно сильно проявляются при концентрациях графена или оксида графена в области 0,05–0,07 мас. % от массы бетонной смеси. При превышении этой концентрации

происходит коагуляция монослоев графена и превращение их в графит.

3. Для получения графеновых бетонов высокой износостойкости на производстве нужно выдерживать регламент по получению суспензии в УЗ-поле, как описано выше.

4. Предложена модель образования трещин в графеновом бетоне, которая определяет его износостойкость.

Модель трещин в графеновом бетоне и его износостойкость

Износостойкость бетонных изделий, как правило, определяется количеством трещин. Теория трещин начала развиваться с работ Гриффитса в 20-х годах XX века и продолжается до сих пор [12, 13]. Бетон представляет собой цементное тесто из

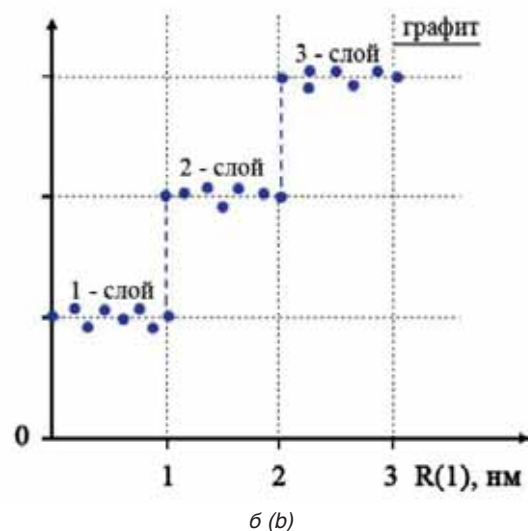
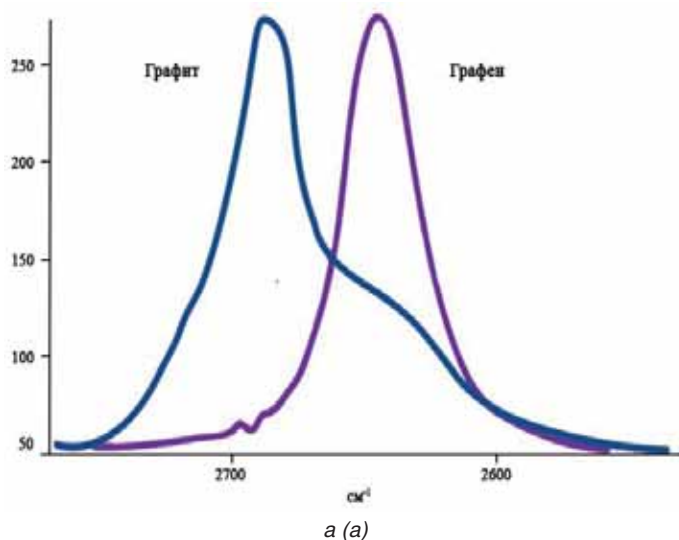


Рис. 2. 2D-полоса Рамана графита и графена (а); число монослоев (б)
Fig. 2. 2D Raman band of graphite and graphene (a); number monolayers (b)

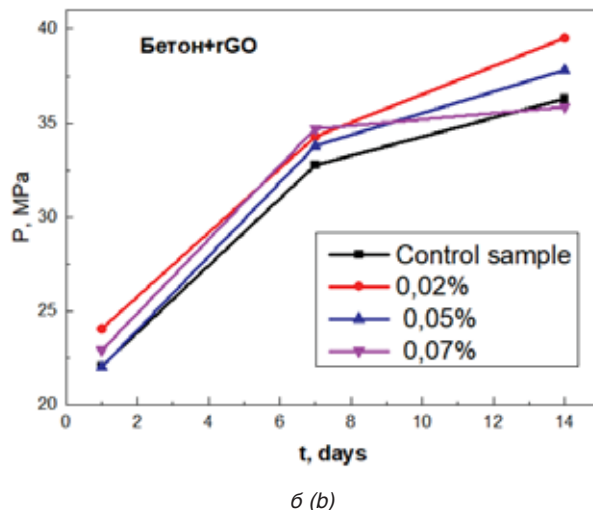
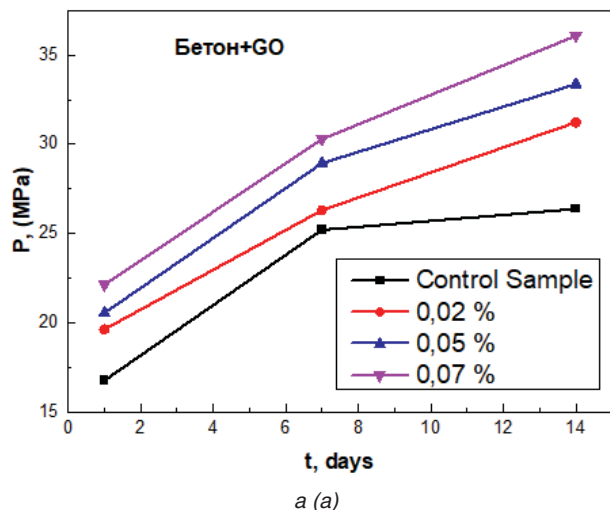
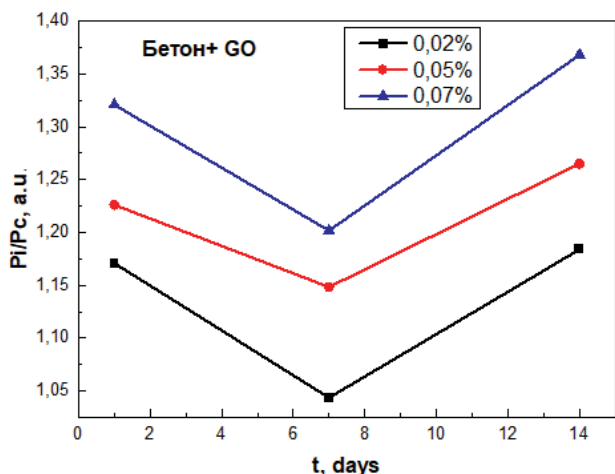
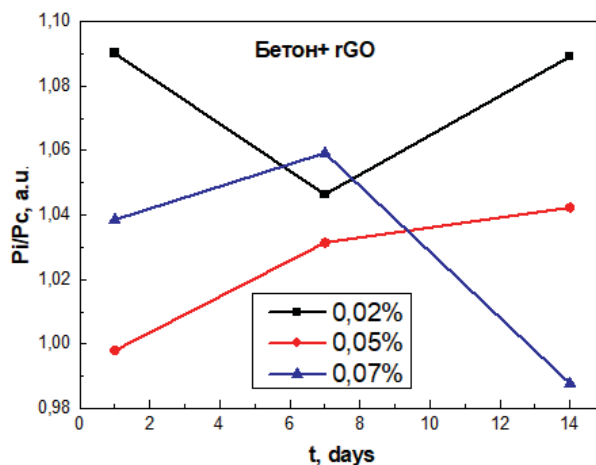


Рис. 3. Зависимости механической прочности бетона, модифицированного малослойным оксидом графена GO (а) и восстановленным оксидом графена rGO (б)
Fig. 3. Dependencies of the mechanical strength of concrete modified with low-layer graphene oxide GO (a) and reduced graphene oxide rGO (b)



а (a)

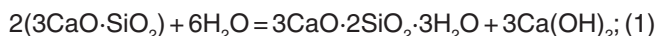


б (b)

Рис. 4. Зависимости относительной механической прочности P_i/P_c от изменения концентрации малослойного оксида графена GO (a) и восстановленного оксида графена rGO (б)

Fig. 4. Dependence of relative mechanical strength P_i/P_c on changes in the concentration of thin-layer graphene oxide GO (a) and reduced graphene oxide rGO (b)

пористого материала. Когда он смешивается с водной суспензией, то происходит его гидратация с образованием продуктов реакции, а именно: гидратов силиката кальция (C–S–H), гидроксидов кальция (CH), этtringитов и моносulьфоалюминатов. Гель C–S–H в бетоне занимает около 70 % продуктов гидратации и играет существенную роль в износостойкости бетона [14]. Фазы силиката, реагируя с водной суспензией, образуют гель C–S–H по следующей схеме [15]:

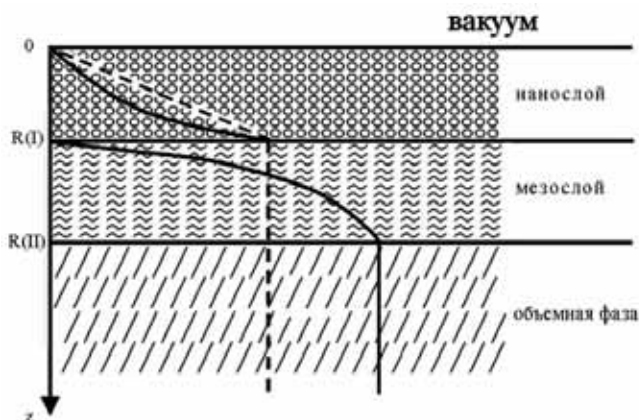


Гель C–S–H имеет толщину поверхностного слоя $R(l)$, равную длине нанотрещины L_{nm} , которая описывается формулой [16]:

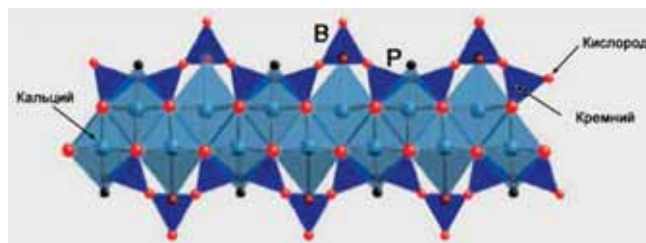
$$R(l) = L_{nm} = 0,17 \times 10^{-9} \times \alpha \times v \text{ [м]}. \quad (3)$$

Формула (3) содержит одну величину, а именно молярный объем соединения, равный $v = M/\rho$ (M – молярная масса соединения, ρ – его плотность), $\alpha = 1 \text{ моль м}^{-2} = \text{const}$. Полагая гель C–S–H твердым раствором можно сделать оценку молярной массы по уравнениям (1) и (2). Имеем: $M_1 = 1070 \text{ г/моль}$; $M_2 = 922 \text{ г/моль}$. Уравнение (2) с M_2 дает структуру кристалла, близкую к минералу тобермориту [17], представляющему слоистую структуру кристалла силиката кальция. Гель C–S–H имеет плотность (вместе с порами воды), оцененную методом нейтронного и рентгеновского рассеяния и равную $2,604 \text{ г/см}^3$ [18]. Гель C–S–H имеет толщину поверхностного слоя, равную по формуле (3) величине $L_{nm} = R(l) = 60,3 \text{ нм}$ ($< 100 \text{ нм}$), то есть он представляет собой наноструктуру по Глейтеру [19]. Число монослоев в такой структуре равно [16]: $n = R(l)/a = 43$ (a – величина межслойного расстояния, равная $a = 1,4 \text{ нм}$ [15]). Схема бетона, содержащая гель C–S–H, будет представлять собой структуру, изображенную на рис. 5а, а силикатная цепь изображена

на рис. 5б. В качестве примера: слой $R(l)$ для чистых металлов – от 1 до 8 нм; для минералов – 10–40 нм; для фуллеренов, угля, полимеров – от 40 до 150 нм и выше. Бетон занимает положение в ряду полимеров. Он обладает значительной длиной нанотрещины $L_{nm} = R(l) = 60,3 \text{ нм}$, а значит обладает малой износостойкостью по сравнению с тугоплавкими металлами, у которых $L_{nm} = R(l) = 3–8 \text{ нм}$.



(a)(a)



(б)(b)

Рис. 5. Кристаллическая структура бетона (a); силикатная цепь [15] (б)

Fig. 5. Crystalline structure of concrete (a); silicate chain [15] (b)

Из работы [20] следует кинетика развития нанотрещин с течением времени или под действием внешней нагрузки:

$$L_C = 10^2 L_{\mu m} = 10^4 L_{nm} = 0,17 \times 10^{-5} \times M/\rho \text{ [м]}, \quad (4)$$

где L_{nm} , $L_{\mu m}$, L_C – длина нанотрещин, мезотрещин и критическая длина трещин перед разрушением бетона.

Из уравнения (4) для стандартного бетона следует: $L_{nm} = 60 \text{ нм}$; $L_{\mu m} = 6 \text{ микрон}$; $L_C = 0,6 \text{ мм}$. Такой диапазон нанотрещин характерен для стандартного бетона после его затвердевания без изменения внешних условий (температура, нагрузка).

На рис. 6 представлена кинетика разрушения стволов артиллерии [21] – разрушение стандартного бетона.



Рис. 6. Кинетическая диаграмма разрушения стандартного бетона [21]

Fig. 6. Kinetic diagram of destruction of standard concrete [21]

Кинетическая диаграмма, представленная на рис. 6, подобна S-кривой, характерной для теории катастроф [22]. В этом случае в качестве координаты процесса разрушения бетона выберем координату $L(N)$, где N – количество трещин. Управляющим параметром, согласно теории катастроф, выберем величину плотности бетона ρ и величину $G/F(I)$, где G – модуль сдвига ($G = 65 \text{ ГПа}$ для стандартного бетона), $F(I)$ – барьер Пайерлса – Набарро ($F(I) = 76 \cdot 10^{-9} \text{ Па}$ для стандартного бетона), то получаем выражение:

$$L(N) = 0,25N^4 - 0,5\rho N^2 - G/F(I) \times N. \quad (5)$$

В уравнении (5) число трещин $L(N)$ будем считать функцией градиента, тогда вместо (5) получаем динамическую задачу:

$$\frac{dL(N)}{dt} = \frac{\partial L(N)}{\partial N} = N^3 - \rho N - G/F(I) = 0. \quad (6)$$

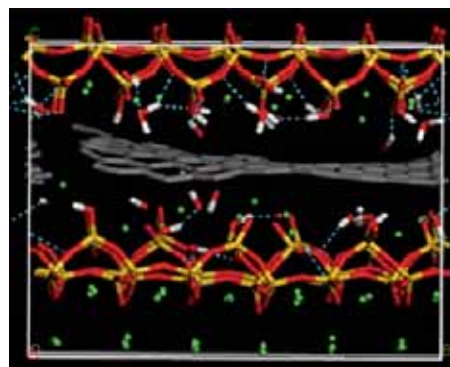
Вид выражения (6) подобен формуле классической механики, когда тело движется в среде вязкого трения. В этом случае при переходе из одного состояния в другое получается S-кривая, которую можно вычислить по формуле Кардана. В результате получаем $N \approx 10^7$, что соответствует количеству трещин для мезослоя.

Часть II S-кривой на рис. 7 впервые описана Перисом [23]:

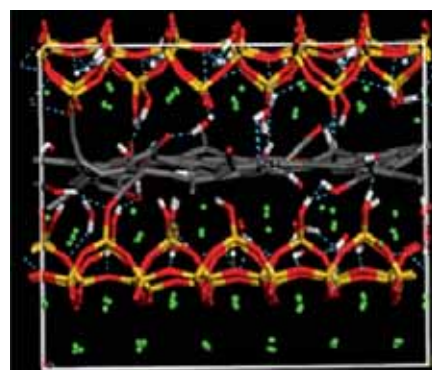
$$\frac{dL(N)}{dt} = C(\Delta K)^4, \quad (7)$$

где K – коэффициент интенсивности напряжений за цикл; C – постоянная материала. Оба эти значения нужно определять экспериментально, что довольно проблематично.

Если обратиться к уравнению (4), то имеем: в наноструктурной области I – $N = 10^5$, в мезослое II – $N = 10^7$, в области предразрушения III – примерно $N = 10^9$. Поскольку нанотрещины образуются всегда при образовании поверхностного слоя любого твердого тела [20] и даже жидкости [24], то имеет смысл рассмотреть вопрос о торможении этих нанотрещин в бетоне, чтобы повысить его износостойкость. Тормозом движения нанотрещин в стандартном бетоне, имеющем структуру с $R(I) = 60,3 \text{ нм}$, может быть модификация цемента различными добавками, снижающими величину $L_{nm} = R(I)$ геля C–S–H. Сегодня к таким добавкам относят и графен [25]. В работе [26] был исследован бетон с примесью нанопорошков графена, полученного из природного графита методом жидкофазной эксфолиации [27]. Отличие настоящего исследования от работ [26, 27] заключается в приготовлении суспензии в УЗ-поле определенной и заданной частоты ультразвука. На рис. 7а показана структура геля C–S–H с примесью графена и оксида графена, из которой следует, что и графен и оксид графена входят в межслоевую область, разрушая структуру геля C–S–H за счет резкого уменьшения молярной массы соединения. Этот эффект особенно виден для оксида графена за счет выступающих гидроксильных групп с обеих сторон GO (рис. 7б).



(а)(а)



(б)(б)

Рис. 7. Структура G/C–S–H и GO/C–S–H [15]
Fig. 7. Structure of G/C–S–H and GO/C–S–H [15]

Износостойкость бетона можно оценить по критерию разрушения твердых тел, которые подразделяются на силовые, деформационные и энергетические [28]:

$$\frac{K_{1c}^2(1-\mu^2)}{E} = 2\delta_{1c}\sigma_B = G_{1c} = J_{1c} = 2\gamma = W_a, \quad (8)$$

где K_{1c} – критический коэффициент интенсивности напряжений, силовой критерий разрушения;

E – модуль упругости;

μ – коэффициент Пуассона;

δ_{1c} – критическое раскрытие в вершине трещины, деформационный критерий разрушения;

σ_B – предел прочности;

G_{1c} – критическая интенсивность освобождающейся энергии, энергетический критерий разрушения;

J_{1c} – критический джей-интеграл, энергетический критерий разрушения;

γ – поверхностная энергия,

W_a – энергия адгезии.

Из уравнения (8) следует, что лучше измерить поверхностную энергию γ для стандартного бетона – $\gamma(B)$; для бетона с графеном – $\gamma(rGO)$ и для бетона с оксидом графена $\gamma(GO)$ прибором, изображенным на рис. 8 [29, 30].

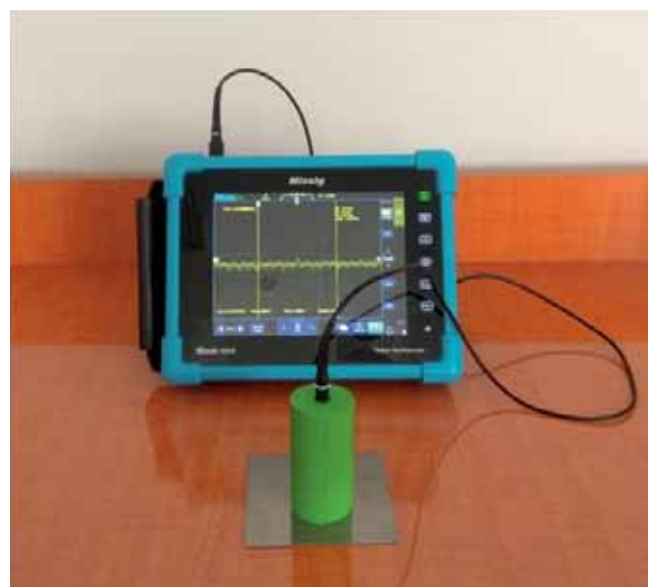
В результате получено: $\gamma(B) \approx 673$ мДж/м²; $\gamma(rGO) \approx 2782$ мДж/м²; $\gamma(GO) \approx 3362$ мДж/м². Износостойкость бетонов с графеном и оксидом графена увеличена в 4–5 раз по отношению к стандартному бетону.

Многочисленные исследования (см. обзор [2]) показали, что добавка графена (в концентрации 0,05–0,1 % от массы бетона) приводит к улучшению основных характеристик бетонной смеси, а именно: к увеличению прочности бетона на сжатие и растяжение при изгибе; к уменьшению количества трещин в бетоне.

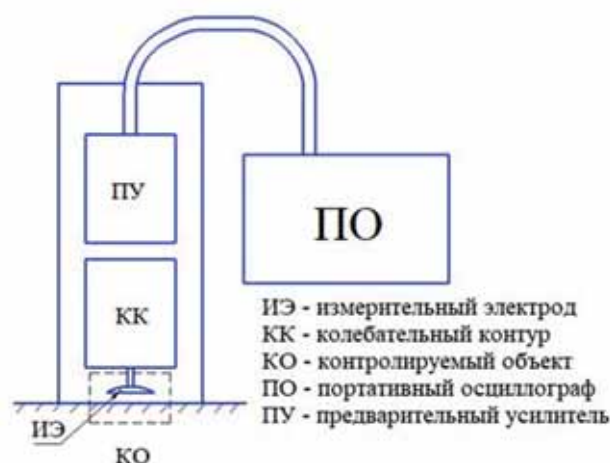
Заключение

В настоящей статье показано, что износостойкость бетонов существенно зависит от поверхностной энергии γ , которая пропорциональна температуре плавления T_m соединения. Так, например, для графита $T_m \approx 3670$ К; для графена – $T_m \approx 4510$ К; для оксида графена – $T_m \approx 5150$ К. Можно сделать вывод о том, что для повышения износостойкости бетонов нужно добавлять в цемент примеси с большой температурой плавления.

Экспериментально подтверждено, что контролируемое введение малослойного оксида графена (GO) и восстановленного оксида графена (rGO) в цементную матрицу является высокоэффективным методом повышения ее физико-механических характеристик. Продemonстрирован немонотонный характер зависимости «свойство–концентрация» с ярко выраженным оптимумом в диапазоне 0,05–0,07 мас.%, что критически важно для разработки технологических регламентов производства. Превышение пороговой концентрации ведет к агломерации наночастиц и нивелированию положительного эффекта.



(a)(a)



(б)(b)

Рис. 8. Комплекс измерения контактной разности потенциалов (а); принципиальная схема датчика (б) [29, 30]

Fig. 8. Complex for measuring contact potential difference (a); schematic diagram of the sensor (b) [29, 30]

Предложенная и апробированная методика ультразвукового диспергирования с контролем числа слоев по спектрам комбинационного рассеяния света позволяет получать стабильные суспензии именно графена, а не графита. Это снимает неопределенность, характерную для многих ранних работ, и обеспечивает воспроизводимость результатов, что является ключевым фактором для масштабирования технологии от лабораторных образцов до промышленного производства.

Предложена модель трещин в строительном бетоне, модифицированном оксидами графена на основе теории катастроф, из которой следует, что и графен и оксид графена входят в межслоевую область, разрушая структуру геля C–S–H за счет резкого уменьшения молярной массы соединения. Механизм повышения износостойкости бетона заключается в создании

графеном дополнительных центров кристаллизации гидратных фаз (геля C-S-H), что интенсифицирует твердение и уплотняет структуру цементного камня. На наноуровне, согласно данным молекулярного моделирования [15], функционализированные листы оксида графена способны к химическому и адсорбционному взаимодействию с матрицей C-S-H. Это приводит не к «разрушению» геля, а к формированию более прочного и связного композита на границе раздела фаз. Ключевым макроскопическим проявлением этих процессов является значительное (в 4–5 раз) увеличение поверхностной энергии материала (γ), экспериментально зафиксированное в работе. Поскольку работа разрушения материала (и, как следствие, износостойкость) прямо пропорциональна его поверхностной энергии, модификация графеном переводит бетон в категорию материалов с повышенной устойчивостью к образованию и росту трещин.

Список литературы

- Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S.V., Grigorieva I.V., Firsov A.A. Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 2004, vol. 306, no. 5696, pp. 666–669. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1102896>.
- Li H., Zhao G., Zhang H. Recent Progress of Cement-Based Materials Modified by Graphene and Its Derivatives. *Materials*, 2023, vol. 16, no. 10, p. 3783. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16103783>.
- Юров В.М., Жангозин К.Н., Жанабергенов Т.К., Каргин Д.Б. Поверхностные явления в графите и получение из него графена // *Новости науки Казахстана*. 2024. Т. 160. № 1. С. 19–42. DOI: https://doi.org/10.53939/1560-5655_2024_1_19. EDN: ZYWSXX.
- Yurov V.M., Zhangozin K.N., Goncharenko V.I., Oleshko V.S. Tribological properties of graphite, graphene and fluorographite, fluorographene. *Modern high technologies*, 2024, no. 7, pp. 81–87. DOI: <https://doi.org/10.17513/snt.40089>.
- Yurov V.M., Zhangozin K.N., Kargin D.B. Number of graphene layers in natural graphite. *The Scientific Heritage*, 2024, no. 143, pp. 75–80. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.13378607>.
- Lv Sh., Ma Yu., Qiu Ch., Sun T., Liu J., Zhou Q. Effect of graphene oxide nanosheets of microstructure and mechanical properties of cement composites. *Construction and Building Materials*, 2013, vol. 49, pp. 121–127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.022>.
- Sedaghat Ah., Ram M., Zayed A., Kamal R., Shanahan N. Investigation of Physical Properties of Graphene-Cement Composite for Structural Applications. *Journal of Composite Materials*, 2014, vol. 4 (01), pp. 12–21. DOI: <https://doi.org/10.4236/ojcm.2014.41002>.
- Lv S., Zhang J., Zhu L., Jia Ch. Preparation of Cement Composites with Ordered Microstructures via Doping with Graphene Oxide Nanosheets and an Investigation of Their Strength and Durability. *Materials*, 2016, vol. 9, no. 11, p. 924. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma9110924>.
- Jing G., Ye Z., Wu J., Wang S., Cheng X., Strokova V., Nelyubova V. Introducing Reduced Graphene Oxide to Enhance the Thermal Properties of Cement Composites. *Cement and Concrete Composites*, 2020, vol. 109, article 103559. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103559>.
- Long W.J., Zhang X., Feng G.L., Xie J., Xing F., Dong B., Zhang J., Khayat K.H. Investigation on Chloride Binding Capacity and Stability of Friedel's Salt in Graphene Oxide Reinforced Cement Paste. *Cement and Concrete Composites*, 2022, vol. 132, article 104603. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104603>.
- Юров В.М., Гончаренко В.И., Олешко В.С., Жангозин К.Н. Открытая квантовая система поверхностного слоя атомно-гладких металлов // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2025. № 4. С. 54–60. DOI: <https://doi.org/10.17513/mjpf.13720>.
- Леденёв В.В. Деформирование и разрушение оснований, фундаментов, строительных материалов и конструкций (теория, эксперимент). Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2021.
- Кузнецов В.С. Железобетонные и каменные конструкции: учебное пособие. Москва: Изд-во АСВ, 2012. 303 с.
- Richardson I.G. The Calcium Silicate Hydrates. *Cement and Concrete Research*, 2008, vol. 38, no. 2, pp. 137–158. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.11.005>.
- Hou D. Molecular Simulation on Cement-Based Materials. From Theory to Application. Springer Singapore, 2020.
- Юров В.М. Толщина поверхностного слоя атомно-гладких кристаллов // *Межвузовский сборник научных трудов*. Тверь: Тверской государственный университет. 2019. Вып. 11. С. 389–397. DOI: <https://doi.org/10.26456/pcascnn/2019.11.389>.
- Hamid S. The crystal structure of the 11 A natural tobermorite $\text{Ca}_{2.25}\text{Si}_3\text{O}_{7.5}(\text{OH})_{1.5}\cdot\text{H}_2\text{O}$. *Zeitschrift fur Kristallographie*, 1981, vol. 154, pp. 189–198.
- Allen A.J., Thomas J.J., Jennings H.M. Composition and density of nanoscale calcium silicate-hydrate in cement. *Nature Material*, 2007, vol. 6, pp. 311–316. DOI: <https://doi.org/10.1038/nmat1871>.
- Gleiter H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure. *Acta Materialia*, 2000, vol. 48, no. 1, pp. 1–29. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(99\)00285-2](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(99)00285-2).
- Юров В.М., Гончаренко В.И., Олешко В.С. Первичные нанотрещины в нитридах, бориде и карбидах тугоплавких металлов // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. 2023. № 15. С. 328–337. DOI: <https://doi.org/10.26456/pcascnn/2023.15.328>. EDN: RFQULG.
- Бердибеков А.Т., Юров В.М., Грузин В.В., Шугаев М.А., Доля А.В., Балкишев К.Т. Защитные покры-

- тия в вооружении и военной технике. Монография. Астана: Издательство ТОО «Research & Development» центр «Казахстан инжиниринг». 2023. 318 с. ISBN 978–601–7781–05–7.
22. Poston T., Stewart I. Catastrophe Theory and Its Applications. Dover Publications: Incorporated, 2013.
 23. Paris P.C., Erdogan F. A critical analysis of crack propagation laws. *ASME Journal of Basic Engineering*, 1963, vol. 85, pp. 528–533.
 24. Юров В.М., Жангозин К.Н. Толщина поверхностного слоя воды и этанола // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. 2023. № 15. С. 338–349. DOI: <https://doi.org/10.26456/pcascnn/2023.15.338>.
 25. Fayyad T.M., Abdalqader A.F., Sonebi M. An insight into graphene as an additive for the use in concrete. *Conference: CERI/ITRN*, 2022, pp. 67–72. URL: https://www.researchgate.net/publication/363281202_An_insight_into_Graphene_as_an_additive_for_the_use_in_concrete
 26. Zhangozin K.N. New method for producing graphene by intercalation of graphite with microcluster water. Almaty: Darkhan, 2023. (In Russian).
 27. Каргин Д. Б., Жангозин К., Жанабергенов Т. К. Новый метод получения порошкообразного графена // *Вестник Евразийского Национального университета имени Л.Н. Гумилёва. Физика. Серия «Астрономия»*. 2022. Т. 136. № 3. С. 8–16. DOI: <https://doi.org/10.32523/2616-6836-2021-136-3-8-16>. EDN: ZXYJGU.
 28. Ерасов В.С., Орешко Е.И. Коэффициент Пуассона и Пуассонова сила // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. Т. 52. № 3. С. 56–64. DOI: <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2018-0-3-56-64>. EDN: XVANQD.
 29. Makeeva O.V., Oleshko V.S., Fedorov A.V., Yurov V.M. Development of a device for determining work electron output. *Eurasian Physical Technical Journal*, 2020, vol. 17, no. 1, pp. 127–131. DOI: <https://doi.org/10.31489/2020No1/127-131>.
 30. Гончаренко В.И., Олешко В.С., Юров В.М. Определение величины поверхностной энергии металлов с использованием метода машинного обучения // *Проблемы машиностроения и автоматизации*. 2025. № 2. С. 103–111. DOI: https://doi.org/10.52261/02346206_2025_2_103. EDN: RBJNRZ.
- ### References
1. Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S.V., Grigorieva I.V., Firsov A.A. Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 2004, vol. 306, no. 5696, pp. 666–669. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1102896>.
 2. Li H., Zhao G., Zhang H. Recent Progress of Cement-Based Materials Modified by Graphene and Its Derivatives. *Materials*, 2023, vol. 16, no. 10, p. 3783. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16103783>.
 3. Yurov V.M., Zhangozin K.N., Zhanabergenov T.K., Kargin D.B. Surface phenomena in graphite and obtaining graphene from it. *Science News of Kazakhstan*, 2024, no. 1, pp. 19–43. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.53939/1560-5655_2024_1_19.
 4. Yurov V.M., Zhangozin K.N., Goncharenko V.I., Oleshko V.S. Tribological properties of graphite, graphene and fluorographite, fluorographene. *Modern high technologies*, 2024, no. 7, pp. 81–87. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.17513/snt.40089>.
 5. Yurov V.M., Zhangozin K.N., Kargin D.B. Number of graphene layers in natural graphite. *The Scientific Heritage*, 2024, no. 143, pp. 75–80. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.13378607>.
 6. Lv Sh., Ma Yu., Qiu Ch., Sun T., Liu J., Zhou Q. Effect of graphene oxide nanosheets of microstructure and mechanical properties of cement composites. *Construction and Building Materials*, 2013, vol. 49, pp. 121–127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.022>.
 7. Sedaghat Ah., Ram M., Zayed A., Kamal R., Shanahan N. Investigation of Physical Properties of Graphene-Cement Composite for Structural Applications. *Journal of Composite Materials*, 2014, vol. 4 (01), pp. 12–21. DOI: <https://doi.org/10.4236/ojcm.2014.41002>.
 8. Lv S., Zhang J., Zhu L., Jia Ch. Preparation of Cement Composites with Ordered Microstructures via Doping with Graphene Oxide Nanosheets and an Investigation of Their Strength and Durability. *Materials*, 2016, vol. 9, no. 11, p. 924. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma9110924>.
 9. Jing G., Ye Z., Wu J., Wang S., Cheng X., Strokova V., Nelyubova V. Introducing Reduced Graphene Oxide to Enhance the Thermal Properties of Cement Composites. *Cement and Concrete Composites*, 2020, vol. 109, article 103559. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103559>.
 10. Long W.J., Zhang X., Feng G.L., Xie J., Xing F., Dong B., Zhang J., Khayat K.H. Investigation on Chloride Binding Capacity and Stability of Friedel's Salt in Graphene Oxide Reinforced Cement Paste. *Cement and Concrete Composites*, 2022, vol. 132, article 104603. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104603>.
 11. Yurov V.M., Goncharenko V.I., Oleshko V.S., Zhangozin K.N. Open quantum system of the surface layer of atomically smooth metals. *International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2025, no. 4, pp. 54–60. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.17513/mjpf.13720>.
 12. Ledenev V.V. Deformation and destruction of foundations, foundations, building materials and structures (theory, experiment). Tambov: Publishing center of FGBOU VO «TSTU», 2021. (In Russian).
 13. Kuznetsov V.S. Reinforced concrete and stone structures. Moscow: ASV Publ., 2022. (In Russian).
 14. Richardson I.G. The Calcium Silicate Hydrates. *Cement and Concrete Research*, 2008, vol. 38, no. 2, pp. 137–158. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.11.005>.
 15. Hou D. Molecular Simulation on Cement-Based Materials. From Theory to Application. Springer Singapore, 2020.

16. Yurov V.M. Surface layer thickness of atomically smooth crystals. Physicochemical aspects of studying clusters, nanostructures and nanomaterials. *Interuniversity Collection of Scientific Papers*. Tver: Tver State University, 2019, issue 11, pp. 389–397. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.26456/pcascnn/2019.11.389>.
17. Hamid S. The crystal structure of the 11 A natural tobermorite $\text{Ca}_2.25\text{Si}_3\text{O}_7.5(\text{OH})1.5\cdot\text{H}_2\text{O}$. *Zeitschrift fur Kristallographie*, 1981, vol. 154, pp. 189–198.
18. Allen A.J., Thomas J.J., Jennings H.M. Composition and density of nanoscale calcium silicate-hydrate in cement. *Nature Material*, 2007, vol. 6, pp. 311–316. DOI: <https://doi.org/10.1038/nmat1871>.
19. Gleiter H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure. *Acta Materialia*, 2000, vol. 48 (1), pp. 1–29. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(99\)00285-2](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(99)00285-2).
20. Yurov V.M., Goncharenko V.I., Oleshko V.S. Primary nanocracks in nitrides, borides and carbides of refractory metals. *Physicochemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials*, 2023, no. 15, pp. 328–337. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.26456/pcascnn/2023.15.328>. EDN: RFQULG.
21. Berdibekov A.T., Yurov V.M., Gruzin V.V., Shugaev M.A., Dolya A.V., Balkishev K.T. Protective coatings in weapons and military equipment. The monograph. Astana: Publishing House of Research & Development Center «Kazakhstan Engineering» LLP, 2023, 318 p. ISBN 978–601–7781–05–7.
22. Poston T., Stewart I. Catastrophe Theory and Its Applications. Dover Publications, Incorporated, 2013.
23. Paris P.C., Erdogan F. A critical analysis of crack propagation laws. *ASME Journal of Basic Engineering*, 1963, vol. 85, pp. 528–533.
24. Yurov V.M., Zhangozin K.N. Surface thickness water and ethanol. *Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials*, 2023, issue 15, pp. 338–349. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.26456/pcascnn/2023.15.338>.
25. Fayyad T.M., Abdalqader A.F., Sonebi M. An insight into graphene as an additive for the use in concrete. *Conference: CERI/ITRN*, 2022, pp. 67–72.
26. Zhangozin K.N. New method for producing graphene by intercalation of graphite with microcluster water. Almaty: Darkhan, 2023. (In Russian).
27. Zhangozin K.N., Zhanabergenov T.K., Kargin Zh.B. A new method for producing powdered graphene. *Bulletin of L.N. Gumilyov ENU. Physics, Astronomy Series*, 2021, vol. 136, no. 3, pp. 8–16. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.32523/2616-6836-2021-136-3-8-16>. EDN: ZXYJGU.
28. Erasov V.S., Oreshko E.I. Reasons for dependence of mechanical characteristics of material fracture resistance on sample sizes. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2018, vol. 52, no. 3, pp. 56–64. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2018-0-3-56-64>. EDN: XVANQD.
29. Makeeva O.V., Oleshko V.S., Fedorov A.V., Yurov V.M. Development of a device for determining work electron output. *Eurasian Physical Technical Journal*, 2020, vol. 17, no. 1, pp. 127–131. DOI: <https://doi.org/10.31489/2020No1/127-131>.
30. Goncharenko V.I., Oleshko V.S., Yurov V.M. Determining the surface energy of metals using machine learning. *Problems of Mechanical Engineering and Automation*, 2025, no. 2, pp. 103–111. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.52261/02346206_2025_2_103. EDN: RBJNRZ.

Информация об авторах / Information about the authors

Юров Виктор Михайлович, канд. ф.-м. наук, доцент, ТОО «ТСК-восток», Караганда, Республика Казахстан
e-mail: exciton@list.ru
Viktor M. Yurov, Cand. Sci. (Physical and Mathematical), Associate Professor, TOO “TSK Vostok”, Karaganda, Republic of Kazakhstan
e-mail: exciton@list.ru

Канат Накошевич Жангозин, канд. ф.-м. наук, доцент, директор, ТОО «ТСК-Восток», Астана, Республика Казахстан
e-mail: 4kzh@mail.ru
Kanat N. Zhangozin, Cand. Sci. (Physical and Mathematical), Associate Professor, Director, TSK-Vostok LLP, Astana, Republic of Kazakhstan
e-mail: 4kzh@mail.ru

Джумат Бейсембекович Каргин*, канд. ф.-м. наук, профессор кафедры Технической физики, директор департамента коммерциализации технологий, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Республика Казахстан
e-mail: kargin_db@enu.kz
Jumat B. Kargin*, Cand. Sci. (Physical and Mathematical), Professor, Director of the Department of Technology Commercialization, Eurasian National University named after L.N. Gumilyov, Astana, Republic of Kazakhstan
e-mail: kargin_db@enu.kz

Азат Канатович Нуркасимов, докторант Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева, Астана, Республика Казахстан
e-mail: nurkasimov_ak@enu.kz
Azat K. Nurkasimov, doctoral student at L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Republic of Kazakhstan
e-mail: nurkasimov_ak@enu.kz

Жаннур Сайлаубекович Касымханов, докторант Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева, Астана, Республика Казахстан
e-mail: kassymkhanov_ZhS@enu.kz
Zhannur S. Kasymkhanov, Doctoral student at L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Republic of Kazakhstan
e-mail: kassymkhanov_ZhS@enu.kz

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author