

# **Влияние структуры цементно-песчаной матрицы на прочность защитных сооружений при воздействии обычных средств поражения**

УДК 699.852.7

DOI: <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2025-13-4-C0012>

Номер статьи: C0012

## **Каменев Юрий Александрович**

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,  
преподаватель

Санкт-Петербург, Россия

**SPIN:** 3053-8640

[kamenev.vka@mail.ru](mailto:kamenev.vka@mail.ru)

## **Павлюк Александр Юрьевич**

Главный испытательный космический центр имени Г.С. Титова,  
Краснознаменск (Московская область), Россия

[sasha.pavlyuk.95@inbox.ru](mailto:sasha.pavlyuk.95@inbox.ru)

## **Нестеров Олег Сергеевич**

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,  
адъюнкт

Санкт-Петербург, Россия

**SPIN:** 4534-7993

[Nesterovoleg@gmail.ru](mailto:Nesterovoleg@gmail.ru)

## **Карасев Сергей Юрьевич**

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского

Санкт-Петербург, Россия

**SPIN:** 6879-6416

[vka@mil.ru](mailto:vka@mil.ru)

Статья получена: 04.11.2025. Одобрена: 26.11.2025. Опубликована онлайн: 25.12.2025. © РИОР

**Аннотация.** Цель статьи — определение зависимости напряжений на поверхности плиты покрытия специального сооружения при воздействии взрыва, параметров защитной конструкции, модифицированной цементно-песчаной матрицей. Важными аспектами этой работы являются геометрические характеристики ауксетической структуры, а также прочностные свойства бетонного композита, который представлен классами прочности В30, В45 и В60. В качестве методов использовались численное моделирование, статистический анализ и планирование эксперимента в программном комплексе ANSYS Explicit Dynamics, где цементно-песчаная матрица описывалась критерием прочности Друкера-Прагера. В ходе исследования установлено, что защитные конструкции с круглыми и квадратными пустотами не способны обеспечить защиту плиты покрытия специального сооружения при воздействии взрыва. Напротив, плиты с ауксетической конструкцией продемонстрировали свою эффективность, значительно поглощая энергию при взрывных воздействиях. При расчете для 27 разных комбинаций факторов в ANSYS Explicit Dynamics получены напряжения в плите покрытия, варьирующиеся от 22 до 81 МПа. На основе этих данных был выполнен регрессионный анализ, позволивший построить математическую модель в виде полиномиального уравнения второй степени. Эта модель объединяет уровень

напряжений ( $Y$ ) с тремя ключевыми факторами: отношением площади ячейки к системе ( $X_1$ ), отношением площади пустоты к материалу ( $X_2$ ) и прочностью бетона ( $X_3$ ). Адекватность полученной модели была подтверждена критерием Фишера, где расчетное значение  $F$  ( $F_{\text{расч}}=19,0811$ ) выше табличного значения ( $F_{\text{табл}}=1,9881$ ). Это свидетельствует о способности модели адекватно описывать исследуемый процесс. Созданная регрессионная модель позволяет более точно подбирать параметры энергопоглощающих конструкций на этапе их проектирования. Установление оптимальных геометрических параметров ауксетической конструкции предоставляет возможность для разработки защитной конструкции, которые основательно повышают стойкость специального сооружения к взрывным воздействиям, что способствует увеличению живучести значимых объектов и снижению ущерба от динамических нагрузок.

**Ключевые слова:** напряжения, плита покрытия специального сооружения, защитная конструкция, цементно-песчаная матрица, ауксетическая конструкция, математическое моделирование, регрессионный анализ, уравнение регрессии, критерий Фишера, динамическое воздействие, оптимизация параметров.

## **The effect of the cement-sand matrix structure on the strength of protective structures under the influence of conventional weapons**

### **Kamenev Yuri Alexandrovich**

Military Space academy named after A.F. Mozhaisky,  
lecturer  
Saint Petersburg, Russia  
[kamenev.vka@mail.ru](mailto:kamenev.vka@mail.ru)

### **Pavlyuk Alexander Yurievich**

G.S. Titov main test space center  
Moscow region, Krasnoznamensk  
[sasha.pavlyuk.95@inbox.ru](mailto:sasha.pavlyuk.95@inbox.ru)

### **Nesterov Oleg Sergeevich**

Military Space academy named after A.F. Mozhaisky,  
adjunct  
Saint Petersburg, Russia  
[nesterovoleg248@gmail.com](mailto:nesterovoleg248@gmail.com)

### **Karasev Sergey Yurievich**

Military Space academy named after A.F. Mozhaisky  
Saint Petersburg, Russia  
[vka@mil.ru](mailto:vka@mil.ru)

**Abstract.** Objective of the article is to determine the dependence of stresses on the surface of the coating plate of a special structure under the influence of an explosion, the parameters of the protective structure modified with a cement-sand matrix. Important aspects of this work are the geometric characteristics of the auxetic structure, as well as the strength properties of the concrete composite, which is represented by strength classes B30, B45 and B60. The study used the following methods: numerical modeling, statistical analysis and experimental planning in the ANSYS Explicit Dynamics software package, where the cement-sand matrix was described by the Drucker-Prager strength criterion. The study found that protective structures with round and square voids are not able to protect the coating plate of a special structure when

exposed to an explosion. On the contrary, plates with auxetic construction have demonstrated their effectiveness, significantly absorbing energy during explosive impacts. When calculating for 27 different combinations of factors, ANSYS Explicit Dynamics obtained stresses in the coating plate ranging from 22 to 81 MPa. Based on these data, regression analysis was performed, which made it possible to construct a mathematical model in the form of a polynomial equation of the second degree. This model combines the stress level ( $Y$ ) with three key factors: the ratio of the cell area to the system ( $X_1$ ), the ratio of the void area to the material ( $X_2$ ) and the strength of the concrete ( $X_3$ ). The adequacy of the obtained model was confirmed by the Fisher criterion, where the calculated value of  $F$  ( $F_c=19.0811$ ) is higher than the tabular value ( $F_t=1.9881$ ). This indicates the ability of the model to adequately describe the process under study. The created regression model makes it possible to more accurately select the parameters of energy-absorbing structures at the design stage. The establishment of optimal geometric parameters of an auxetic structure provides an opportunity to develop protective structures that significantly increase the resistance of a special structure to explosive impacts, which helps to increase the survivability of significant objects and reduce damage from dynamic loads.

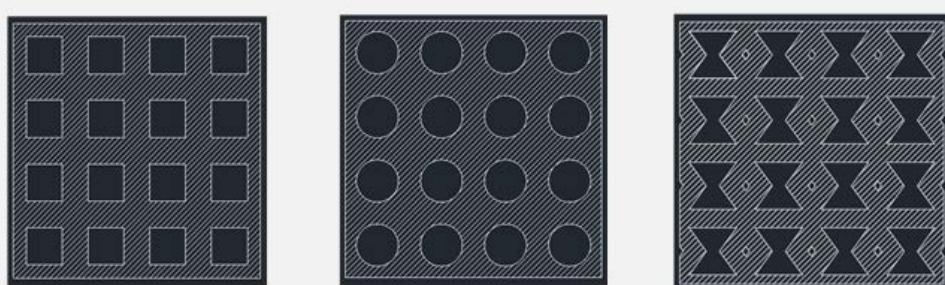
**Keywords:** stresses, coating plate of a special structure, protective structure, cement-sand matrix, auxetic structure, mathematical modeling, regression analysis, regression equation, Fisher criterion, dynamic impact, optimization of parameters.

## Введение

Данное научное исследование представляет собой сравнительный анализ эффективности различных типов защитных конструкций (ЗК) для специальных сооружений (СС) от взрыва. В рамках работы были смоделированы ЗК, основанные на цементно-песчаной матрице (ЦПМ) с классами прочности В30, В45, В60, где ЦПМ описывалась критерием прочности Друкера-Прагера [1], ауксетическая структура [2-9], а также структуры с квадратными и круглыми пустотами, что иллюстрируется на Рис 1.

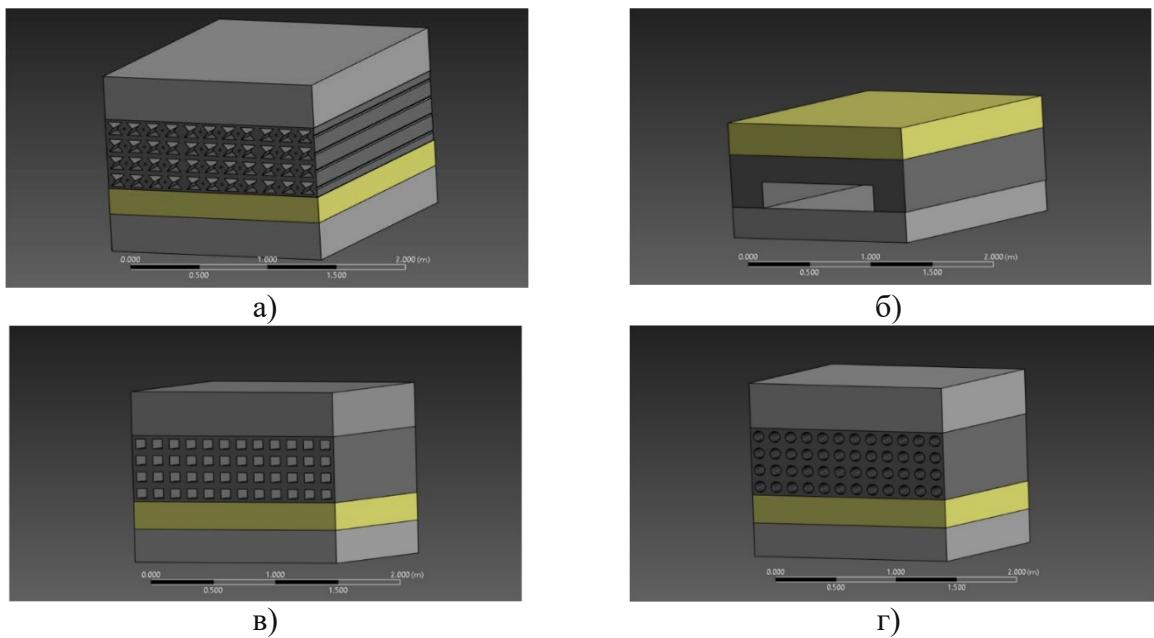
Основной целью анализа стала оценка способности ЗК к энергопоглощению [4,9], что является важным для обеспечения безопасности СС в условиях действия взрывов. В ходе проведенного анализа выяснилось, что, несмотря на то, что геометрические параметры ауксетических пустот [3] имеют относительно низкие показатели прочности по сравнению с пустотами круглой и квадратной формы, их деформативность оказывается ключевым фактором, способствующим повышению значения энергопоглощения.

Это открытие позволило с высокой степенью уверенности проводить математическое моделирование и анализ функциональных характеристик ЗК, выполненных из композитных материалов на основе измененной ЦПМ.



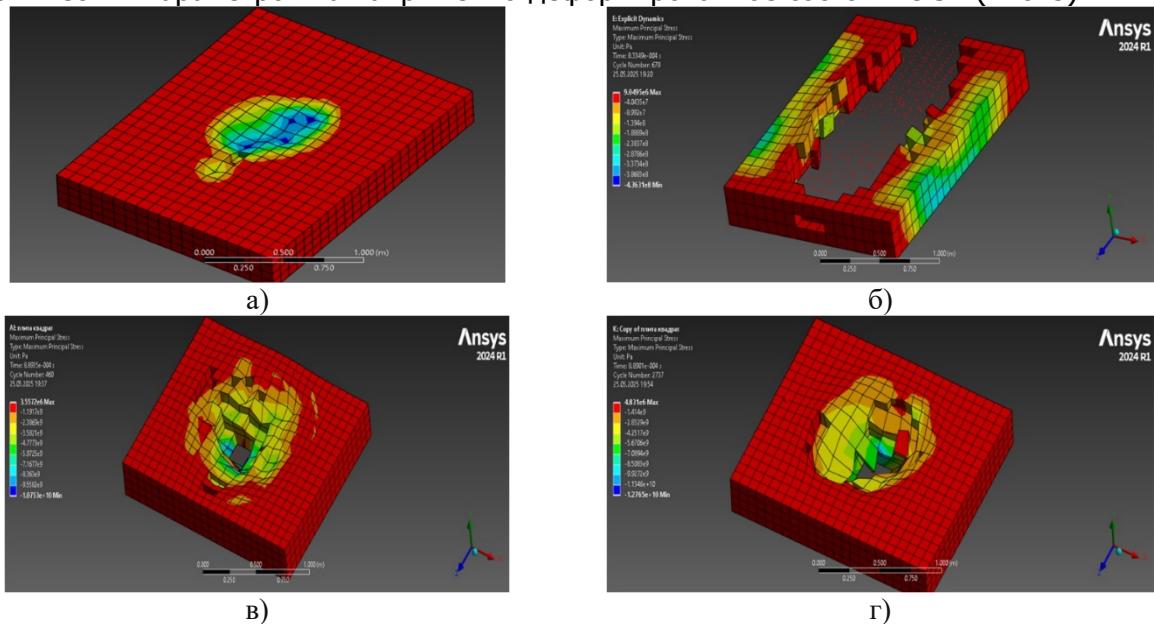
**Рис. 1.** Модифицированная ЦПМ: а) с квадратными пустотами, б) с круглыми пустотами, в) с ауксетической возвратно-вогнутой структурой

На данном этапе было установлено, что традиционные решения плит с круглыми (Рис. 2, г) и квадратными пустотами (Рис. 2, в), а также с воздушной прослойкой (Рис. 2, б), не гарантируют требуемого уровня защиты, приводя к полному пробитию плиты покрытия и уничтожению несущих конструкций.



**Рис. 2.** Вид защитной конструкции: а) с ауксетической структурой, б) с невесомой прослойкой, в) с квадратными пустотами, г) с круглыми пустотами

В то же время была испытательно подтверждена высокая эффективность защитных плит с ауксетической конструкцией (Рис. 2, а), которые за счет уникальной геометрии ячеек демонстрируют способность эффективно поглощать энергию взрыва, сохраняя целостность основной системы [9]. Преимущество ауксетических структур [3] определило необходимость более основательного изучения влияния их геометрических и физико-механических параметров на напряженно-деформированное состояние ЗК (Рис. 3).



**Рис. 3.** Результат воздействия взрыва на плиту СС:  
а) при ЗК с ауксетической структурой, б) при ЗК с воздушной прослойкой,  
в) при ЗК с квадратными пустотами, г) при ЗК с круглыми пустотами

С использованием численного моделирования в программном комплексе ANSYS Explicit Dynamics была совершена оценка напряженно-деформированного состояния защитной плиты и плиты покрытия. Это позволило получить результаты, которые показывают, что существующие ЗК не обеспечивают необходимую защиту. В частности, плита покрытия СС оказывается полностью пробитой ударной волной, образующейся в результате взрыва.

Для достижения цели исследования был применен методы математического моделирования, включающий экспериментальное планирование. Это позволяет оценить влияние различных факторов на эффективность ЗК. Были изучены такие параметры, как отношение площади ячеек к конструкции (обозначаемое как  $X_1 = S_y/S_k$ ), отношение площади пустот к площади материала ( $X_2 = S_p/S_m$ ) и прочность бетона ( $X_3$ ). На основе данных, полученных в ходе моделирования в ANSYS Explicit Dynamics, был проведен регрессионный анализ с целью создания математической модели. Значимость результатов была установлена с применением критерия Фишера. Это позволяет уверенно говорить о достоверности полученных значений. В результате анализа удалось не только установить аналитическую связь, но и определить оптимальные геометрические параметры ауксетической структуры, которые минимизируют нагрузку. Это доказывает целесообразность использования таких систем для повышения защитных свойств СС, предназначенных для защиты от техногенных нагрузок.

## **Математическое описание зависимости напряжений, образующихся на поверхности плиты покрытия СС**

В процессе математического прогнозирования с использованием ANSYS Explicit Dynamics была изучена зависимость напряжений в ауксетически модифицированной плите от влияния взрыва на геометрические параметры возвратно-вогнутой ауксетической текстуры [3] и прочностные свойства используемых конструкционных материалов. В результате были определены значения напряжений на поверхности плиты с покрытием для разных конфигураций защитной конструкции, как показано в Таблице 1.

*Таблица 1*  
**Данные математического прогнозирования динамического воздействия**

<i>№ испытания</i>	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$Y$
1	0,005	0,5	30	6,2
2	0,01	0,5	30	7,9
3	0,015	0,5	30	7,6
4	0,005	0,79	30	5,2
5	0,01	0,79	30	6,0
6	0,015	0,79	30	4,9
7	0,005	1,5	30	4,2
8	0,01	1,5	30	3,2
9	0,015	1,5	30	2,9
10	0,005	0,5	45	6,4
11	0,01	0,5	45	8,0
12	0,015	0,5	45	7,7
13	0,005	0,79	45	5,0
14	0,01	0,79	45	6,1
15	0,015	0,79	45	3,9
16	0,005	1,5	45	4,0
17	0,01	1,5	45	3,0
18	0,015	1,5	45	2,5
19	0,005	0,5	60	6,6
20	0,01	0,5	60	8,1
21	0,015	0,5	60	7,8
22	0,005	0,79	60	5,0
23	0,01	0,79	60	6,1
24	0,015	0,79	60	3,8
25	0,005	1,5	60	3,7
26	0,01	1,5	60	2,7
27	0,015	1,5	60	2,2

Произведена математическая обработка результатов (Рис. 4).

$$\delta x_i = 2 \cdot \frac{x_i - \frac{x_{i\max} + x_{i\min}}{2}}{x_{i\max} - x_{i\min}}, \quad (1)$$

где  $\delta x_i$  — нормированное значение  $i$ -го фактора;

$x_i$  — значительность  $i$ -го фактора, в натуральных единицах;

$x_{i\max}$  и  $x_{i\min}$  — максимальное и минимальное значения  $i$ -го фактора в соответствии с этим, в натуральных единицах.

Добавив стандартизованные коэффициенты в уравнение регрессии, оно будет иметь вид:

$$\delta Y_j^{\text{выч}} = a_0 + a_1 \cdot \delta x_1 + a_2 \cdot \delta x_2 + \dots + a_n \cdot \delta x_n, \quad (2)$$

где  $\delta Y_j^{\text{выч}}$  — нормированное значение  $j$ -го свойства ЦПМ;

$a_0, a_1$  — стандартизованные коэффициенты регрессии ..., ап.

Применив критерий Фишера прошло проверку значимости и показало доверительную вероятность  $\alpha = 0,95$ .

В процессе обработки экспериментальных данных, было составлено уравнение регрессии (математическая модель), которое адекватно описывает зависимости напряжений, на поверхности плиты покрытия СС, от множества факторов. Такие, как  $X_1$ ,  $X_2$  и  $X_3$ , и визуализация этой зависимости была представлена на Рис. 5.

$$Y = -0,448 + 1,396 \cdot X_1 - 0,071 \cdot X_2 + 0,16 \cdot X_3 - 0,962 \cdot X_1^2 -$$

$$- 0,805 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,192 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,323 \cdot X_2 \cdot X_3$$

$$F_{\text{расч}} = 19,0811, F_{\text{табл}} = F(26, 23) = 1,9881$$

В ходе работы было установлено, что расчетное значения ( $F_{\text{расч}}$ ) превышает табличное ( $F_{\text{табл}}$ ), что указывает на статистическую точность уравнения регрессии. Из этого следует, что разработанная математическая модель показывает влияние факторов  $X_1$ ,  $X_2$  и  $X_3$  на способность модифицированной ЦПМ выполнять свою защитную функцию. Анализ показал, что при максимальном увеличении толщины стенки до 8,6 мм и шестикратном повышении ячейки покрытие СС испытывает минимальные динамические нагрузки. Оптимальный показатель, зафиксированный в ходе эксперимента, составил 2,25 МПа, что соответствует напряжениям в покрытии плиты СС, вызванных взрывом. Это значение является важным признаком, поскольку показывает, насколько эффективно покрытие выдерживает динамические действия и подтверждает правильность выбранных параметров для увеличения защиты СС. Из проведенных исследований можно сделать вывод, что ЗК СС ауксетического типа (BBC) имеют явные преимущества перед традиционными решениями (плиты с воздушной прослойкой и плиты, в которых имелись пустоты правильной геометрической формы).

## Выводы

Проведенное исследование подтверждает перспективность применения модифицированных цементно-песчаных матриц (ЦПМ) с ауксетической структурой для разработки усовершенствованных защитных систем. Полученные результаты создают основу не только для оптимизации существующих конструкций, но и для проектирования новых, более надежных решений, способных эффективно противостоять динамическим нагрузкам на СС.

Важным этапом работы стало построение регрессионной модели, устанавливающей количественную зависимость между напряжениями в плите покрытия СС и ключевыми факторами ( $X_1, X_2, X_3$ ). Проведенный анализ показал, что оптимальное сочетание геометрических параметров конструкции — увеличение толщины стенок до 8,6 мм при шестикратном масштабировании ячеек — обеспечивает минимальный уровень динамических нагрузок. Экспериментально подтверждено, что данная конфигурация позволяет снизить напряжения до 2,25 МПа, что свидетельствует о высокой эффективности предложенного решения для защиты сооружений от динамических воздействий и подтверждает корректность выбранных параметров модификации.

	Нормированные единицы								
	Sя/Sк	Sп/Sм	Прочность бетона					Y (напряжения)	
	Отн-е единицы	Отн-е единицы	B	4	5	6	7	МПа	
№ п/п	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	X <sub>1</sub> *X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> *X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub> *X <sub>3</sub>	Y <sub>эксп.</sub>	Y <sub>выч.</sub>
1	-1,0	-1,0	-1,00	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	0,4	0,575
2	0,0	-1,0	-1,00	-0,3	-0,8	-0,6	-1,0	0,9	0,965
3	1,0	-1,0	-1,00	1,0	-0,5	-0,2	-1,0	0,8	0,881
4	-1,0	-0,4	-1,00	-1,0	-0,9	-1,0	-0,8	0,0	0,345
5	0,0	-0,4	-1,00	-0,3	-0,5	-0,6	-0,8	0,3	0,620
6	1,0	-0,4	-1,00	1,0	-0,1	-0,2	-0,8	-0,1	0,421
7	-1,0	1,0	-1,00	-1,0	-0,5	-1,0	-0,2	-0,3	-0,217
8	0,0	1,0	-1,00	-0,3	0,3	-0,6	-0,2	-0,6	-0,224
9	1,0	1,0	-1,00	1,0	1,0	-0,2	-0,2	-0,7	-0,705
10	-1,0	-1,0	0,00	-1,0	-1,0	-0,8	-0,8	0,4	0,631
11	0,0	-1,0	0,00	-0,3	-0,8	-0,2	-0,8	1,0	0,982
12	1,0	-1,0	0,00	1,0	-0,5	0,4	-0,8	0,9	0,860
13	-1,0	-0,4	0,00	-1,0	-0,9	-0,8	-0,5	0,0	0,364
14	0,0	-0,4	0,00	-0,3	-0,5	-0,2	-0,5	0,3	0,601
15	1,0	-0,4	0,00	1,0	-0,1	0,4	-0,5	-0,4	0,364
16	-1,0	1,0	0,00	-1,0	-0,5	-0,8	0,4	-0,4	-0,289
17	0,0	1,0	0,00	-0,3	0,3	-0,2	0,4	-0,7	-0,333
18	1,0	1,0	0,00	1,0	1,0	0,4	0,4	-0,9	-0,852
19	-1,0	-1,0	1,00	-1,0	-1,0	-0,6	-0,6	0,5	0,686
20	0,0	-1,0	1,00	-0,3	-0,8	0,2	-0,6	1,0	1,000
21	1,0	-1,0	1,00	1,0	-0,5	1,0	-0,6	0,9	0,840
22	-1,0	-0,4	1,00	-1,0	-0,9	-0,6	-0,1	0,0	0,383
23	0,0	-0,4	1,00	-0,3	-0,5	0,2	-0,1	0,3	0,581
24	1,0	-0,4	1,00	1,0	-0,1	1,0	-0,1	-0,5	0,306
25	-1,0	1,0	1,00	-1,0	-0,5	-0,6	1,0	-0,5	-0,361
26	0,0	1,0	1,00	-0,3	0,3	0,2	1,0	-0,8	-0,443
27	1,0	1,0	1,00	1,0	1,0	1,0	1,0	-1,0	-1,000
среднее	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
max	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
min	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00
sko	0,83	0,86	0,83	0,84	0,60	0,62	0,62	0,65	0,60
max-min	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00

Рис. 4. Массив данных в нормированном виде

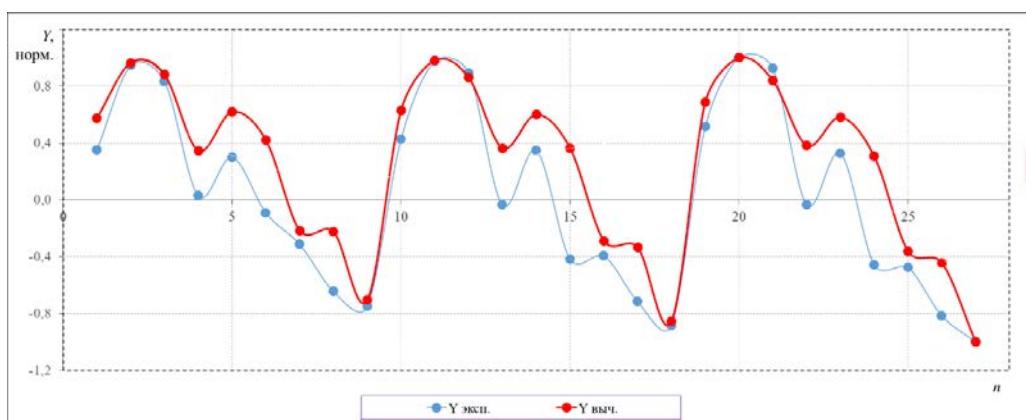


Рис. 5. Диаграмма экспериментальных и расчетных значений

### **Список литературы**

1. Stolyarski T., Nakasone Y., Yoshimoto S. Engieneering Analysis with ANSYS Software. 2nd ed. Oxford: Elsevier, 2018. 526 p.
2. Schwerdtfeger J., Heinl P., Singer R. F. , KörnerAuxetic C. Auxetic cellular structures through selective electron beam melting // Phys Status Solidi B. 2010. Vol. 247. I. 2. Pp. 269–272. DOI: <https://doi.org/10.1002/pssb.200945513>
3. Ren X. et al. Auxetic metamaterials and structures: A review / X. Ren, R. Das, P. Tran, T.D. Ngo, Y.M. Xie // Smart Materials and Structures. 2018. Vol. 27. No 2. Article number 023001. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aaa61c>
4. Bell J., Zhang Y.X., Soe K., Hermes P. High Velocity Impact Behaviour of Hybrid-Fiber Engineered Cementitious Composite Panels // Advanced Materials Research. 2012. Vol. 450–451. Pp.563–567. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.450-451.563>
5. Kelkar P. U. et al. Cellular auxetic structures for mechanical metamaterials: A review / P.U. Kelkar, H.S. Kim, K.-H. Cho, J.Y. Kwak, C.-Y. Kang, H.-C. Song // Sensors. 2020. Vo.I 20. Article number 3132. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20113132>
6. Chen D., Zheng X. Multi-material additive manufacturing of metamaterials with giant, tailorable negative Poisson's ratios // Scientific Reports. 2018. Vol. 8. Article number 9139. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26980-7>
7. Chen W.F. Plasticity in Reinforced Concrete. McGraw-Hill : J. Ross Publishing, 2007.
8. Albertini F. et al. Computational investigation of the effective mechanical behavior for 3D pre-buckled auxetic lattices / F. Albertini, J. Dirrenberger, A. Molotnikov, C. Sollogoub // Journal of Applied Mechanics. 2019. Vol 86. no 11. Article number 111003. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4044542>
9. Zhao X. Dynamic crushing of double-arrowed auxetic structure under impact loading / X. Zhao, Q. Gao, L. Wang, Q. Yu, Z.D. Ma // Materials & Design. 2018. Vol. 160. Pp. 527–537. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.09.041>

### **References**

1. Stolyarski T., Nakasone Y., Yoshimoto S. Engieneering Analysis with ANSYS Software. 2nd ed. Oxford: Elsevier, 2018. 526 p.
2. Schwerdtfeger J., Heinl P., Singer R. F. , KörnerAuxetic C. Auxetic cellular structures through selective electron beam melting // Phys Status Solidi B. 2010. Vol. 247. I. 2. Pp. 269–272. DOI: <https://doi.org/10.1002/pssb.200945513>
3. Ren X. et al. Auxetic metamaterials and structures: A review / X. Ren, R. Das, P. Tran, T.D. Ngo, Y.M. Xie // Smart Materials and Structures. 2018. Vol. 27. No 2. Article number 023001. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aaa61c>
4. Bell J., Zhang Y.X., Soe K., Hermes P. High Velocity Impact Behaviour of Hybrid-Fiber Engineered Cementitious Composite Panels // Advanced Materials Research. 2012. Vol. 450–451. Pp.563–567. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.450-451.563>
5. Kelkar P. U. et al. Cellular auxetic structures for mechanical metamaterials: A review / P.U. Kelkar, H.S. Kim, K.-H. Cho, J.Y. Kwak, C.-Y. Kang, H.-C. Song // Sensors. 2020. Vo.I 20. Article number 3132. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20113132>
6. Chen D., Zheng X. Multi-material additive manufacturing of metamaterials with giant, tailorable negative Poisson's ratios // Scientific Reports. 2018. Vol. 8. Article number 9139. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26980-7>

7. Chen W.F. Plasticity in Reinforced Concrete. McGraw-Hill : J. Ross Publishing, 2007.
8. Albertini F. et al. Computational investigation of the effective mechanical behavior for 3D pre-buckled auxetic lattices / F. Albertini, J. Dirrenberger, A. Molotnikov, C. Sollogoub // Journal of Applied Mechanics. 2019. Vol 86. no 11. Article number 111003. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4044542>
9. Zhao X. Dynamic crushing of double-arrowed auxetic structure under impact loading / X. Zhao, Q. Gao, L. Wang, Q. Yu, Z.D. Ma // Materials & Design. 2018. Vol. 160. Pp. 527–537. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.09.041>