

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ. ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ И ОБСЛЕДОВАНИЕ ЗДАНИЙ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.131.541.3

DOI: 10.22227/2305-5502.2025.1.1

Анализ сходимости аналитического и численного решений при расчете перекрестно-балочного фундамента на наклонном основании при внезапном образовании карстово-обвальных процессов

Сергей Иванович Евтушенко¹, Евгений Владимирович Зеленин²,
Александр Борисович Барыкин²

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

² Академия строительства и архитектуры Крымского федерального
университета им. В.И. Вернадского; Республика Крым, г. Симферополь, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Проведен анализ сходимости результатов, полученных в ходе сравнения аналитического и численного методов с помощью метода конечных элементов в ПК Midas GTS NX при расчете перекрестно-балочного фундамента и наклонного основания при внезапном образовании карстово-обвальных процессов. Аналитический метод расчета разработан на основании эмпирических данных, полученных в ходе выполнения лабораторных модельных исследований в специальной установке, позволяющей моделировать карстово-обвальные процессы, численная модель являлась идентичным прототипом, повторяющим качественные и количественные характеристики, используемые при физическом моделировании.

Материалы и методы. Приведена сравнительная оценка сходимости полученных результатов двумя независимыми методами при расчете перекрестно-балочного фундамента на наклонном основании в условиях карстово-обвальных процессов.

Результаты. Осуществлена оценка полученных расхождений основных количественных параметров, таких как нормальные контактные напряжения под подошвой продольной ленты перекрестно-балочного фундамента, деформаций основания после выхода карстовой полости на поверхность и образования провальных воронок.

Выводы. В результате исследований подтверждена достоверность предложенной численной модели. Она позволяет уменьшить трудоемкость лабораторных испытаний и расширить границы исследования при дальнейшем изучении работы перекрестно-балочного фундамента и наклонного основания в условиях закарстованных территорий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: провально-карстовая воронка, перекрестно-балочный фундамент, наклонное основание, склон, нормальные контактные напряжения, карстово-обвальные процессы

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Евтушенко С.И., Зеленин Е.В., Барыкин А.Б. Анализ сходимости аналитического и численного решений при расчете перекрестно-балочного фундамента на наклонном основании при внезапном образовании карстово-обвальных процессов // Строительство: наука и образование. 2025. Т. 15. Вып. 1. Ст. 1. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.1.1

Автор, ответственный за переписку: Евгений Владимирович Зеленин, workandearn@mail.ru.

Analysis of convergence of analytical and numerical solutions in the calculation of cross-beam foundation on a sloping basement in case of sudden formation of karst-rockfall processes

Sergey I. Evtushenko¹, Evgeny V. Zelenin², Alexander B. Barykin²

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation;

² Academy of Construction and Architecture of the Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky;
Republic of Crimea, Simferopol, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The convergence of the results obtained during the comparison of analytical and numerical methods using FEM in the Midas GTS NX PC for the calculation of cross-beam foundation and sloping foundation in case of sudden formation of karst-rockfall processes was analyzed. The analytical calculation method was developed on the basis of empirical data obtained during laboratory model tests in a special facility that allows modelling karst-rockfall processes, the numerical model was an identical prototype repeating qualitative and quantitative characteristics used in physical modelling.

Materials and methods. A comparative assessment of the convergence of the results obtained by two independent methods in the calculation of a cross-beam foundation on a sloping base in the conditions of karst-rockfall processes is given.

Results. The obtained discrepancies of the main quantitative parameters such as normal contact stresses under the bottom of the longitudinal strip of the cross-beam foundation, deformations of the foundation after the karst cavity emergence to the surface and formation of sinkholes were evaluated.

Conclusions. The reliability of the proposed numerical model was confirmed as a result of the research. It allows to reduce the labour intensity of laboratory tests and to expand the boundaries of research in further study of cross-beam foundation and sloping foundation performance in the conditions of karst territories.

KEYWORDS: sinkhole, cross-beam foundation, sloping foundation, slope, normal contact stresses, karst-rockfall processes

FOR CITATION: Evtushenko S.I., Zelenin E.V., Barykin A.B. Analysis of convergence of analytical and numerical solutions in the calculation of cross-beam foundation on a sloping basement in case of sudden formation of karst-rockfall processes. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2025; 15(1):1. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.1.1

Corresponding author: Evgeny V. Zelenin, workandearn@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

На большей части территории Российской Федерации и других стран перманентно увеличивается площадь территорий с развитием карстовых процессов [1–5]. В связи с этим в геотехническом проектировании становится все более актуальным изучение напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций фундаментов, взаимодействующих с грунтовым основанием при образовании карстово-обвальных процессов. Карстовые явления — одни из самых опасных геологических процессов. Они несут угрозу как по скорости своего проявления в виде образования провалов и мульд оседания земной поверхности, так и по масштабам и степени опасности для застраиваемых и уже застроенных городских территорий [4, 6–10].

В статьях, посвященных изучению работы фундаментов на наклонном основании [11–14], отмечается, что учет влияния угла наклона основания в проектных решениях требует проведения дополнительных исследований ввиду эффекта парного взаимодействия от таких факторов, как диаметр карстовой полости, угол наклона основания, глубина расположения полости. Исследования совместной работы «фундамент – наклонное основание» при негативном влиянии карста должны включать изучение процесса деформирования грунтового основания, смещение грунта в зоне его провала, скорости изменения основных параметров НДС.

Из-за трудоемкости выполнения модельных физических исследований в лабораторных условиях, направленных на изучение совместной работы перекрестно-балочного фундамента и наклонного основания, и невозможности проведения натурных

испытаний дальнейшие исследования целесообразно осуществлять в специализированных геотехнических программных комплексах (ПК), которые позволяют моделировать различные задачи. Метод конечных элементов (МКЭ) удобен тем, что дает возможность выполнять вычисления как в двумерной (2D) плоскости для предварительных расчетов, так и в трехмерной (3D) модели с учетом всех объемных внешних факторов. Основное достоинство МКЭ заключается в том, что он позволяет представить сплошную среду с бесконечным числом степеней свободы как систему с конечным их количеством. Это дает возможность конструктору использовать различные инструменты для решения поставленных задач [15].

После того как сплошная среда была аппроксимирована, применяется метод прямой жесткости, основанный на математическом аппарате сложных систем алгебраических уравнений. Благодаря этому методу можно определить перемещение каждого узла в построенной сетке, используя прямоугольные или триангулированные элементарные ячейки. На основе полученных значений перемещений вычисляются деформации и напряжения в каждой ячейке.

В связи с этим работа, направленная на разработку численной модели, которая будет адекватно отражать действительную работу перекрестно-балочного фундамента на наклонном основании с карстовой полостью, позволит сократить трудоемкость при проектировании [16].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Планирование исследований проводилось в соответствии с ранее описанной методикой [17], в рам-

ках которой рассматривались четыре независимых внешних фактора: угол наклона основания, диаметр карстовой полости D , м, глубина расположения полости относительно подошвы фундамента H , м, и расстояние от удерживающей конструкции L , м. Для уточнения численной модели и последующего создания алгоритма решения в автоматизированном ПК Midas GTS NX выбраны параметры, аналогичные

Табл. 1. Конечно-элементные модели опытов № 1–8 в ПК Midas GTS NX

Table 1. Finite element models of experiments No. 1–8 in PC Midas GTS NX

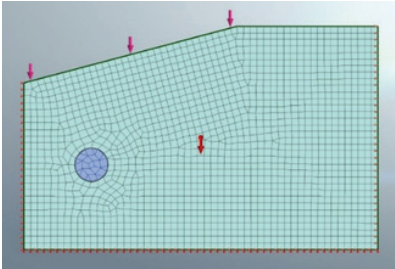
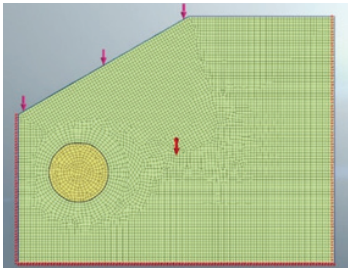
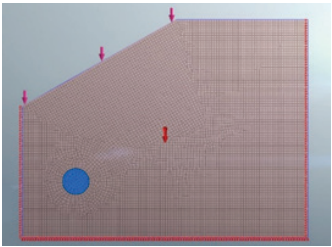
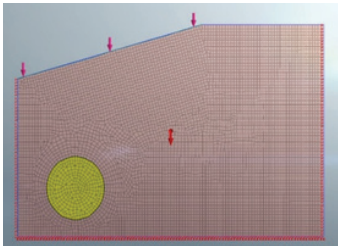
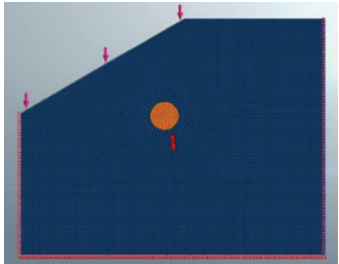
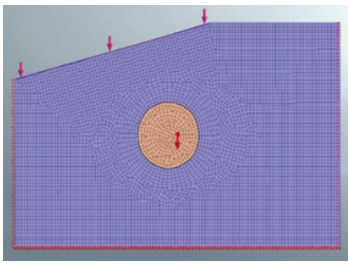
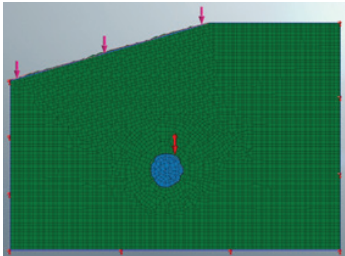
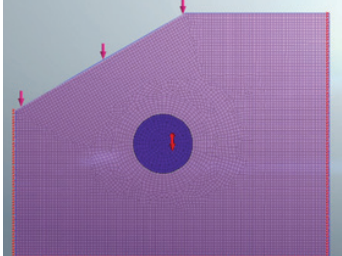
Опыт № 1 (сечение модели по продольной ленте фундамента) Experiment No. 1 (cross-section of the model along the longitudinal belt of the foundation)	Опыт № 2 (сечение модели по продольной ленте фундамента) Experiment No. 2 (cross-section of the model along the longitudinal belt of the foundation)
	
Опыт № 3 (сечение модели по продольной ленте фундамента) Experiment No. 3 (cross-section of the model along the longitudinal belt of the foundation)	Опыт № 4 (сечение модели по продольной ленте фундамента) Experiment No. 4 (cross-section of the model along the longitudinal belt of the foundation)
	
Опыт № 5 (сечение модели по продольной ленте фундамента) Experiment No. 5 (cross-section of the model along the longitudinal belt of the foundation)	Опыт № 6 (сечение модели по продольной ленте фундамента) Experiment No. 6 (cross-section of the model along the longitudinal belt of the foundation)
	
Опыт № 7 (сечение модели по продольной ленте фундамента) Experiment No. 7 (cross-section of the model along the longitudinal belt of the foundation)	Опыт № 8 (сечение модели по продольной ленте фундамента) Experiment No. 8 (cross-section of the model along the longitudinal belt of the foundation)
	

Табл. 2. Характеристики материала основания
Table 2. Base Material Characteristics

Характеристики материалов Material Characteristics	Показатель Indicator
Удельный вес грунта γ , кН/м ³ Specific weight of soil γ , kN/m ³	16,1
Модуль деформации E , МПа Modulus of deformation E , MPa	24
Угол внутреннего трения φ Internal friction angle φ	34
Коэффициент Пуассона ν Poisson's ratio ν	0,25
Угол дилатансии грунта ψ Ground dilatancy angle ψ	0

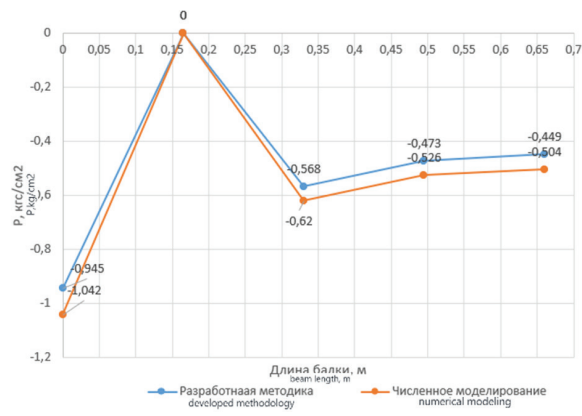


Рис. 1. Эпюры нормальных контактных напряжений опыта № 1 по разработанной методике и результатам численного моделирования
Fig. 1. Normal contact stresses of experiment No. 1 and according to the developed method and results of numerical modelling

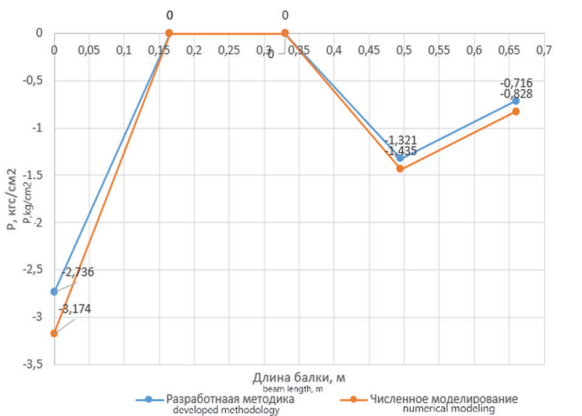


Рис. 2. Эпюры нормальных контактных напряжений опыта № 2 по разработанной методике и результатам численного моделирования
Fig. 2. Normal contact stresses of experiment No. 2 and according to the developed method and results of numerical modelling

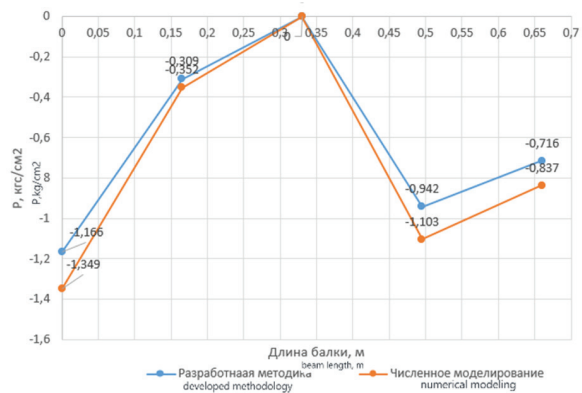


Рис. 3. Эпюры нормальных контактных напряжений опыта № 3 по разработанной методике и результатам численного моделирования
Fig. 3. Normal contact stresses of experiment No. 3 and according to the developed method and results of numerical modelling

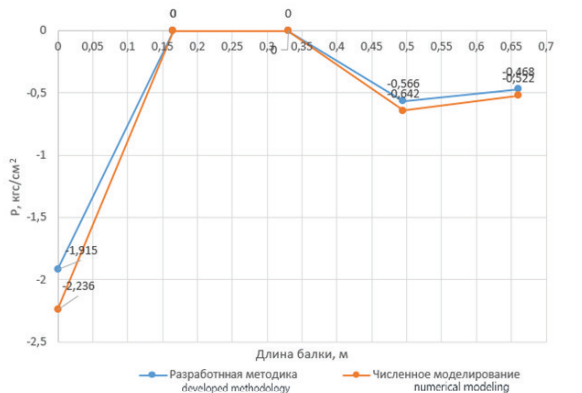


Рис. 4. Эпюры нормальных контактных напряжений опыта № 4 по разработанной методике и результатам численного моделирования
Fig. 4. Normal contact stresses of experiment No. 4 and according to the developed method and results of numerical modelling

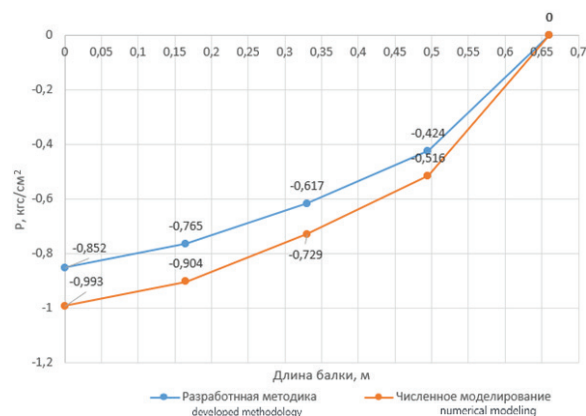


Рис. 5. Эпюры нормальных контактных напряжений опыта № 5 по разработанной методике и результатам численного моделирования

Fig. 5. Normal contact stresses of experiment No. 5 and according to the developed method and results of numerical modelling

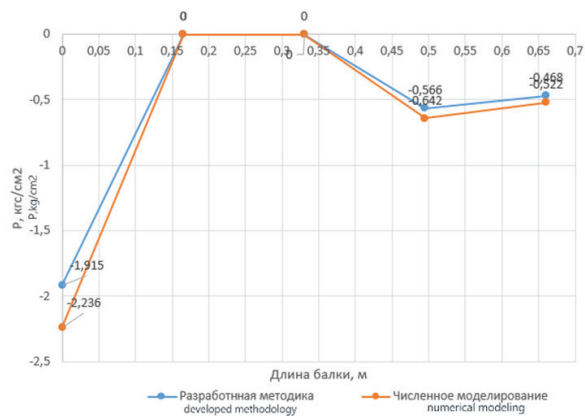


Рис. 6. Эпюры нормальных контактных напряжений опыта № 6 по разработанной методике и результатам численного моделирования

Fig. 6. Normal contact stresses of experiment No. 6 and according to the developed method and results of numerical modelling

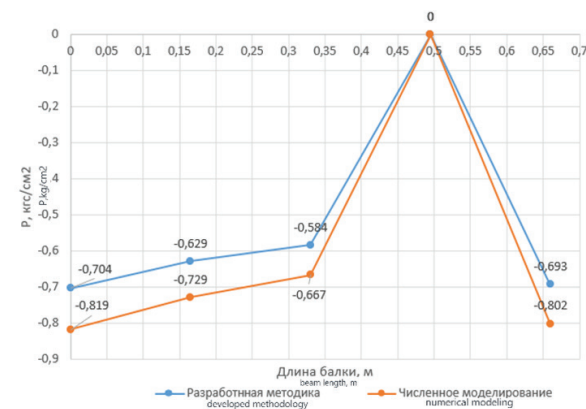


Рис. 7. Эпюры нормальных контактных напряжений опыта № 7 по разработанной методике и результатам численного моделирования

Fig. 7. Normal contact stresses of experiment No. 7 and according to the developed method and results of numerical modelling

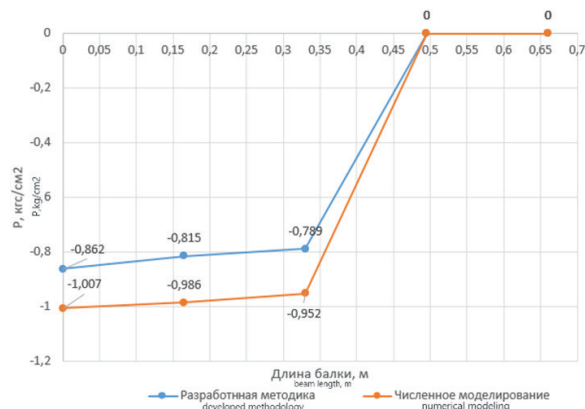


Рис. 8. Эпюры нормальных контактных напряжений опыта № 8 по разработанной методике и результатам численного моделирования

Fig. 8. Normal contact stresses of experiment No. 8 and according to the developed method and results of numerical modelling

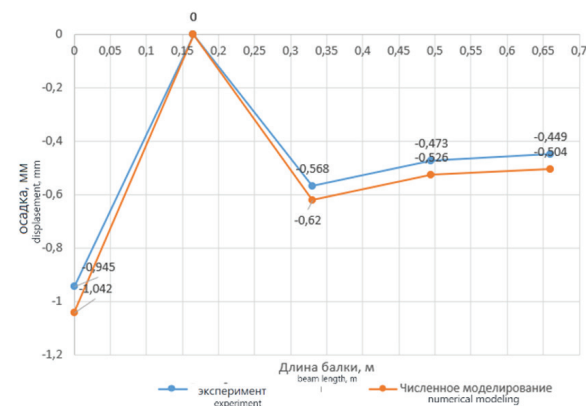


Рис. 9. График осадок основания при физическом моделировании опыта № 1 и численном моделировании

Fig. 9. Graph of foundation displacement in physical modelling of experiment No. 1 and numerical simulation

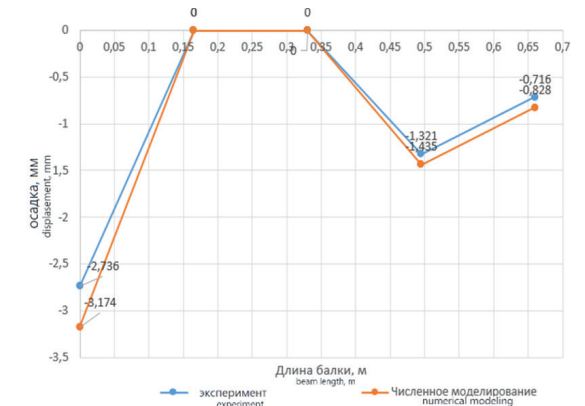


Рис. 10. График осадок основания при физическом моделировании опыта № 2 и численном моделировании

Fig. 10. Graph of foundation displacement in physical modelling of experiment No. 2 and numerical simulation

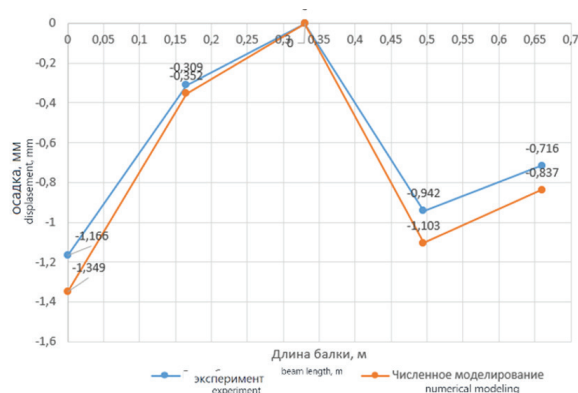


Рис. 11. График осадок основания при физическом моделировании опыта № 3 и численном моделировании

Fig. 11. Graph of foundation displacement in physical modelling of experiment No. 3 and numerical simulation

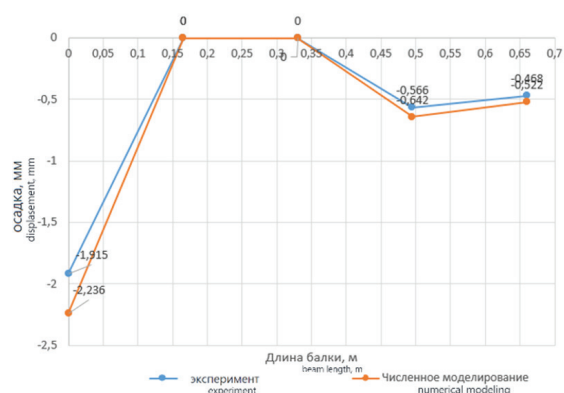


Рис. 12. График осадок основания при физическом моделировании опыта № 4 и численном моделировании

Fig. 12. Graph of foundation displacement in physical modelling of experiment No. 4 and numerical simulation

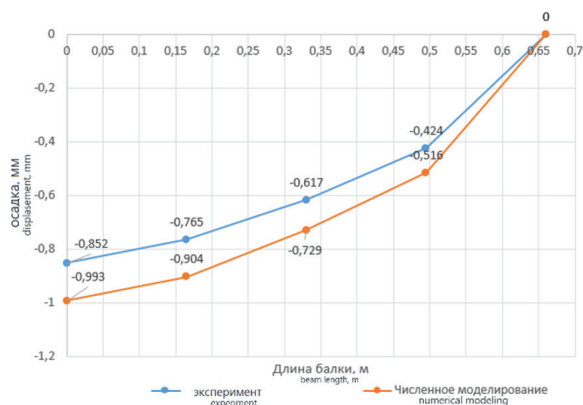


Рис. 13. График осадок основания при физическом моделировании опыта № 5 и численном моделировании

Fig. 13. Graph of foundation displacement in physical modelling of experiment No. 5 and numerical simulation

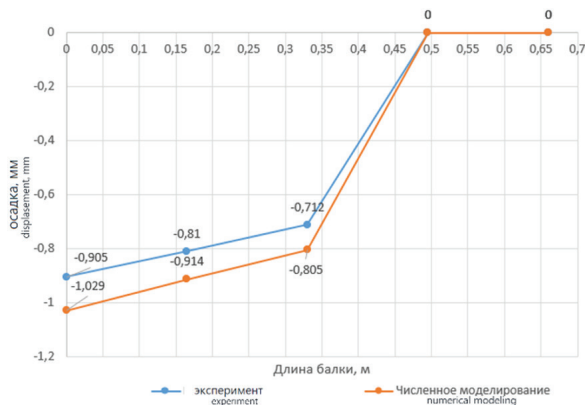


Рис. 14. График осадок основания при физическом моделировании опыта № 6 и численном моделировании

Fig. 14. Graph of foundation displacement in physical modelling of experiment No. 6 and numerical simulation

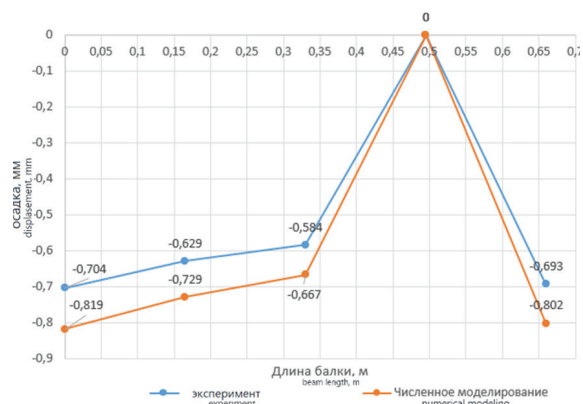


Рис. 15. График осадок основания при физическом моделировании опыта № 7 и численном моделировании

Fig. 15. Graph of foundation displacement in physical modelling of experiment No. 7 and numerical simulation

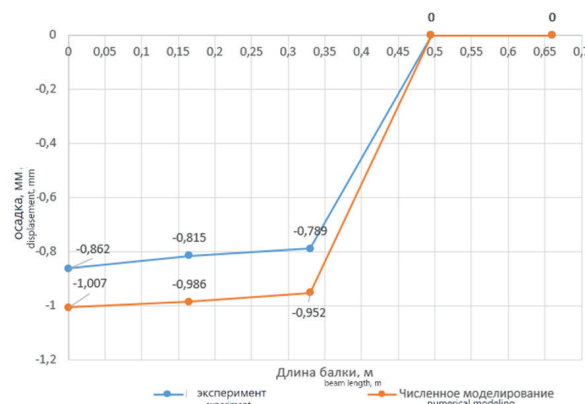


Рис. 16. График осадок основания при физическом моделировании опыта № 8 и численном моделировании

Fig. 16. Graph of foundation displacement in physical modelling of experiment No. 8 and numerical simulation

Табл. 3. Анализ сходимости по напряжениям
Table 3. Stress convergence analysis

Расстояние по длине фундаментной балки от удерживающей конструкции Distance along the length of the foundation beam from the retaining structure	Напряжение по разработанной методике (ссылка на статью), кг/см² Tension according to the developed method (reference to the article), kg/cm²	Напряжение по численному расчету, кг/см² Numerical stress, kg/cm²	Разность напряжений, кг/см² Stress difference, kg/cm²	Процент разности напряжений, % Percentage of stress difference, %	Среднее значение разности контактных напряжений, % Average value of contact stress difference, %
Опыт № 1 Experiment No. 1					
0,2 L _б	0,945	1,042	0,097	10,26	10,71
0,4 L _б	0	0	0	–	
0,6 L _б	0,568	0,620	0,052	9,15	
0,8 L _б	0,473	0,526	0,053	11,21	
L _б	0,449	0,504	0,055	12,25	
Опыт № 2 Experiment No. 2					
0,2 L _б	2,736	3,174	0,438	16	13,42
0,4 L _б	0	0	0	–	
0,6 L _б	0	0	0	–	
0,8 L _б	1,321	1,435	0,114	8,62	
L _б	0,716	0,828	0,112	15,64	
Опыт № 3 Experiment No. 3					
0,2 L _б	1,166	1,349	0,183	15,69	15,9
0,4 L _б	0,309	0,352	0,043	13,91	
0,6 L _б	0	0	–	–	
0,8 L _б	0,942	1,103	0,161	17,09	
L _б	0,716	0,837	0,121	16,89	
Опыт № 4 Experiment No. 4					
0,2 L _б	1,915	2,236	0,321	16,76	13,9
0,4 L _б	0	0	–	–	
0,6 L _б	0	0	–	–	
0,8 L _б	0,566	0,642	0,076	13,42	
L _б	0,468	0,522	0,054	11,53	
Опыт № 5 Experiment No. 5					
0,2 L _б	0,852	0,993	0,141	16,54	18,64
0,4 L _б	0,765	0,904	0,139	18,17	
0,6 L _б	0,617	0,729	0,112	18,15	
0,8 L _б	0,424	0,516	0,092	21,7	
L _б	0	0	–	–	

Окончание табл. 3 / End of the Table 3

Расстояние по длине фундаментной балки от удерживающей конструкции Distance along the length of the foundation beam from the retaining structure	Напряжение по разработанной методике (ссылка на статью), кг/см² Tension according to the developed method (reference to the article), kg/cm²	Напряжение по численному расчету, кг/см² Numerical stress, kg/cm²	Разность напряжений, кг/см² Stress difference, kg/cm²	Процент разности напряжений, % Percentage of stress difference, %	Среднее значение разности контактных напряжений, % Average value of contact stress difference, %
Опыт № 6 Experiment No. 6					
0,2 L ₆	0,905	1,029	0,124	13,7	13,2
0,4 L ₆	0,810	0,914	0,104	12,83	
0,6 L ₆	0,712	0,805	0,093	13,06	
0,8 L ₆	0	0	–	–	
L ₆	0	0	–	–	
Опыт № 7 Experiment No. 7					
0,2 L ₆	0,704	0,819	0,115	16,33	15,54
0,4 L ₆	0,629	0,729	0,1	15,89	
0,6 L ₆	0,584	0,667	0,083	14,21	
0,8 L ₆	0	0	–	–	
L ₆	0,693	0,802	0,109	15,72	
Опыт № 8 Experiment No. 8					
0,2 L ₆	0,862	1,007	0,145	16	19,48
0,4 L ₆	0,815	0,986	0,171	16,1	
0,6 L ₆	0,789	0,952	0,163	17,3	
0,8 L ₆	0	0	–	–	
L ₆	0	0	–	–	

Табл. 4. Анализ сходимости по деформациям

Table 4. Deformation convergence analysis

Расстояние по длине фундаментной балки от удерживающей конструкции Distance along the length of the foundation beam from the retaining structure	Осадка по данным эксперимента, мм Precipitation according to the experimental data, mm	Численный расчет перемещения, мм Numerical calculation displacement, mm	Разность осадка, мм Displacement difference, kg/cm²	Разница в смещении, % Displacement difference, %	Среднее значение разности осадок, % Percentage of displacement difference, %
Опыт № 1 Experiment No. 1					
0,2 L ₆	–1,39	–1,57	0,18	12,94	12,54
0,4 L ₆	>50	>50	–	–	
0,6 L ₆	–1,5	–1,69	0,19	12,66	
0,8 L ₆	–1,45	–1,62	0,17	11,72	
L ₆	–1,4	–1,58	0,18	12,85	

Продолжение табл. 4 / Continuation of the Table 4

Расстояние по длине фундаментной балки от удерживающей конструкции Distance along the length of the foundation beam from the retaining structure	Осадка по данным эксперимента, мм Precipitation according to the experimental data, mm	Численный расчет перемещения, мм Numerical calculation displacement, mm	Разность осадка, мм Displacement difference, kg/cm ²	Разница в смещении, % Displacement difference, %	Среднее значение разности осадок, % Percentage of displacement difference, %
Опыт № 2 Experiment No. 2					
0,2 L ₆	−1,99	−2,25	0,26	13,06	14,14
0,4 L ₆	>50	>50	—	—	
0,6 L ₆	>50	>50	—	—	
0,8 L ₆	−2,72	−3,11	0,39	14,33	
L ₆	−1,93	−2,22	0,29	15,02	
Опыт № 3 Experiment No. 3					
0,2 L ₆	−2,03	−2,39	0,36	18,1	18,2
0,4 L ₆	−2,14	−2,53	0,39	18,6	
0,6 L ₆	>50	>50	—	—	
0,8 L ₆	−2,13	−2,52	0,39	18,4	
L ₆	−1,62	−1,92	0,3	18,6	
Опыт № 4 Experiment No. 4					
0,2 L ₆	−1,43	−1,64	0,21	14,68	14,61
0,4 L ₆	>50	>50	—	—	
0,6 L ₆	>50	>50	—	—	
0,8 L ₆	−1,11	−1,27	0,16	14,41	
L ₆	−0,95	−1,09	0,14	14,73	
Опыт № 5 Experiment No. 5					
0,2 L ₆	−0,87	−1,02	0,15	17,4	17,55
0,4 L ₆	−1,26	−1,48	0,22	17,6	
0,6 L ₆	−1,59	−1,86	0,27	17,6	
0,8 L ₆	−2,19	−2,57	0,38	17,6	
L ₆	>50	>50	—	—	
Опыт № 6 Experiment No. 6					
0,2 L ₆	−0,86	−1,06	0,2	14,2	15,1
0,4 L ₆	−1,02	−1,27	0,25	14,6	
0,6 L ₆	−1,32	−1,66	0,35	16,5	
0,8 L ₆	>50	>50	—	—	
L ₆	>50	>50	—	—	
Опыт № 7 Experiment No. 7					
0,2 L ₆	−0,57	−0,65	0,08	14,03	15,61
0,4 L ₆	−0,69	−0,8	0,11	15,94	
0,6 L ₆	−0,77	−0,89	0,12	15,58	
0,8 L ₆	>50	>50	—	—	
L ₆	−1,48	−1,73	0,25	16,89	

Окончание табл. 4 / End of the Table 4

Растояние по длине фундаментной балки от удерживающей конструкции Distance along the length of the foundation beam from the retaining structure	Осадка по данным эксперимента, мм Precipitation according to the experimental data, mm	Численный расчет перемещения, мм Numerical calculation displacement, mm	Разность осадка, мм Displacement difference, kg/cm²	Разница в смещении, % Displacement difference, %	Среднее значение разности осадок, % Percentage of displacement difference, %
Опыт № 8 Experiment No. 8					
0,2 L_6	–1,52	–1,81	0,29	19,07	20,54
0,4 L_6	–1,83	–2,2	0,37	20,21	
0,6 L_6	–2,15	–2,63	0,48	22,32	
0,8 L_6	>50	>50	–	–	
L_6	>50	>50	–	–	

тем, что использовались при выполнении модельных экспериментальных исследований. В табл. 1 показаны основные расчетные сечения моделей опытов № 1–8.

В табл. 2 приведены характеристики материала основания.

Параметры перекрестно-балочного фундамента, величина нагрузений были приняты в соответствии с предыдущими исследованиями в этой области [18].

Для возможности визуального сравнения параметров нормальных контактных напряжений после обрушения свода карстовой полости и провала в нее грунта, полученных с помощью аналитической методики и численной модели, составлены графики, показанные на рис. 1–8.

Для возможности визуального сравнения параметров нормальных деформаций основания после обрушения свода карстовой полости и провала в нее грунта, полученных с помощью экспериментальных исследований и численной модели, составлены графики, приведенные на рис. 9–16.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ сходимости результатов нормальных контактных напряжений сведен в табл. 3.

Анализ сходимости результатов по деформациям грунтового основания сведен в табл. 4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

Анализ графиков (рис. 1–8) показал, что значения нормальных контактных напряжений, полученных путем численного моделирования методом

конечных элементов, больше значений, полученных с помощью методики [19]. Разница между этими значениями составляет от 10,71 до 19,48 %. Это существенно влияет на материалоемкость при проектировании фундаментов. В среднем нормальные контактные напряжения оказались больше на 15,1 %. Такой результат может привести к созданию необоснованного запаса прочности и, как следствие, к увеличению стоимости строительства из-за ошибок в расчетах фундамента.

Анализ графиков (рис. 9–16) показал, что значения деформаций основания, полученных путем численного моделирования методом конечных элементов, больше значений, полученных в результате физических экспериментальных исследований. Разница между этими значениями составляет от 12,5 до 20,5 %. Это может значительно увеличить геометрические размеры фундаментной ленты. В среднем деформации оказались больше на 16 %. Такой результат может привести к созданию необоснованного запаса прочности и, как следствие, к увеличению стоимости строительства из-за ошибок в расчетах фундамента.

Таким образом, в результате проведенных исследований была верифицирована предложенная численная модель, которая позволит сократить трудоемкость проведения испытаний в лабораторных условиях и способствует вариации границ исследования при дальнейшем изучении работы перекрестно-балочного фундамента и наклонного основания в условиях закарстованных территорий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Aktürk Ö., Drumm E.C., Tutluoğlu L., Akgün H. Undrained stability of residual soil in karst // Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst. 2008. Pp. 223–232.
2. Tharp T.M. Cover-collapse sinkhole formation and soil plasticity // Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst. 2003. Pp. 110–123.
3. Аникеев А.В., Рагозин А.Л., Селезнев В.Н. Оценка геологического риска на участке городского строительства // Геоэкология. 2007. № 6. С. 547–560.
4. Аникеев А.В. Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска. М. : РУДН, 2017. 328 с.
5. Salvati R., Tharp T.M., Capelli G. Conceptual model for geotechnical evaluation of sinkhole risk in the Latium Region // Geotechnical and Environmental Applications of Karst Geology and Hydrology. 2001. Pp. 163–167.
6. Waltham T., Bell F.G., Culshaw M.G. Sinkholes and Subsidence. Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction. 2005. 383 p.
7. Feng Z., Bai S., Min W., He J., Huang Z., Dong Y. et al. Calculation of Ultimate Bearing Capacity of Pile Foundations of Highway Bridges under the Coupling of Steep Slope and Karst // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 198.
8. Амеличев Г.Н., Вахрушев Б.А., Самохин Г.В., Токарев С.В. Особенности инженерных изысканий на закарстованных территориях в пределах Крымского п-ова // Изучение опасных природных процессов и геотехнический мониторинг при инженерных изысканиях : мат. Общеросс. науч.-практ. конф. 2023. С. 72–92.
9. Вахрушев Б.А. Районирование карста Крымского полуострова // Speleology and Karstology. 2009. № 3. С. 39–46.
10. Леоненко В.М., Леоненко М.В., Толмачев В.В. Определение параметров проектирования противокарстовой защиты в рамках геотехнической системы «карст-сооружение» // Оценка и управление природными рисками : мат. Всеросс. конф. «Риск–2006». 2006. С. 315–318.
11. Барыкин А.Б. Экспериментально-теоретические основы взаимодействия перекрестно-балочных фундаментов с наклонным основанием : дис. ... канд. тех. наук. Волгоград, 2018. 184 с.
12. Зеленин Е.В., Барыкин Б.Ю., Диденко Д.А. Планирование экспериментальных исследований при взаимодействии перекрестно-балочного фундамента и наклонного основания, подверженного явлениям карстообразования // Строительство и техногенная безопасность. 2022. № S1. С. 111–118.
13. Зеленин Е.В., Барыкин Б.Ю. К вопросу освоения закарстованных территорий в горных районах республики Крым // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения : мат. Междунар. академических чтений. 2020. С. 209–213.
14. Зеленин Е.В. Аналитический обзор трудов, посвященных исследованию работы конструкций фундаментов в условиях закарстованных территорий // Строительство и архитектура. 2024. Т. 12. № 2 (43).
15. Midas GTS NX Analysis Reference. Chapter 4. Materials.
16. Евтушенко С.И., Зеленин Е.В. Модельные исследования взаимодействия перекрестно-балочного фундамента и наклонного основания над карстовой полостью // Строительство и архитектура. 2023. Т. 11. № 4. С. 8.
17. Евтушенко С.И., Зеленин Е.В., Барыкин А.Б. К вопросу трансформации формы провальной воронки при взаимодействии перекрестно-балочного фундамента и наклонного основания с карстовой полостью // Строительство и архитектура. 2024. Т. 12. № 2 (43).
18. Зеленин Е.В., Барыкин Б.Ю. К вопросу численного моделирования работы перекрестно-балочного фундамента на наклонном основании в условиях активизации карстовых процессов // Передовое развитие современной науки: опыт, проблемы, прогнозы : сб. ст. II Междунар. науч.-практ. конф. 2020. С. 28–38.
19. Зеленин Е.В., Барыкин Б.Ю. К вопросу освоения закарстованных территорий в горных районах Республики Крым // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения : мат. Междунар. академических чтений. 2020. С. 209–213.

Поступила в редакцию 28 августа 2024 г.

Принята в доработанном виде 20 сентября 2024 г.

Одобрена для публикации 25 сентября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Сергей Иванович Евтушенко** — доктор технических наук, профессор кафедры информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; sergand1957@gmail.com;

Евгений Владимирович Зеленин — аспирант кафедры строительных конструкций; **Академия строительства и архитектуры Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского**; 295000, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Павленко, 3а; workandearn@mail.ru;

Александр Борисович Барыкин — кандидат технических наук, преподаватель кафедры геотехники и конструктивных элементов; **Академия строительства и архитектуры Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского**; 295000, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Павленко, 3а; aleksbarykin@yandex.com.

Вклад авторов:

Евтушенко С.И. — научное редактирование, итоговые выводы.

Зеленин Е.В. — написание статьи, концепция исследования, разработка методологии, итоговые выводы.

Барыкин А.Б. — научное редактирование.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Aktürk Ö., Drumm E.C., Tutluoğlu L., Akgün H. Undrained stability of residual soil in karst. *Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst*. 2008; 223-232.
2. Tharp T.M. Cover-collapse sinkhole formation and soil plasticity. *Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst*. 2003; 110-123.
3. Anikeev A.V., Ragozin A.L., Seleznev V.N. Evaluation of the geological risk on an urban construction site. *Geocology*. 2007; 6:547-560. (rus.).
4. Anikeev A.V. *Falls and sinkholes in karst areas: mechanisms of formation, forecast and risk assessment*. Moscow, RUDN, 2017; 328. (rus.).
5. Salvati R., Tharp T.M., Capelli G. Conceptual model for geotechnical evaluation of sinkhole risk in the Latium Region. *Geotechnical and Environmental Applications of Karst Geology and Hydrology*. 2001; 163-167.
6. Waltham T., Bell F.G., Culshaw M.G. Sinkholes and Subsidence. *Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction*. 2005; 383.
7. Feng Z., Bai S., Min W., He J., Huang Z., Dong Y. et al. Calculation of Ultimate Bearing Capacity of Pile Foundations of Highway Bridges under the Coupling of Steep Slope and Karst. *E3S Web of Conferences*. 2020; 198.
8. Amelichev G.N., Vakhrushev B.A., Samokhin G.V., Tokarev S.V. Features of engineering surveys on karsted territories within the Crimean Peninsula. *Study of Hazardous Natural Processes and Geotechnical Monitoring in Engineering Surveys : proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. 2023; 72-92. (rus.).
9. Vakhrushev B.A. Karst zoning of the Crimean Peninsula. *Speleology and Karstology*. 2009; 3:39-46. (rus.).
10. Leonenko V.M., Leonenko M.V., Tolmachev V.V. Determination of karst protection design parameters within the framework of geotechnical system “karst-construction”. *Assessment and management of natural risks : proceedings of the All-Russian Conf. “Risk-2006”*. 2006; 315-318. (rus.).
11. Barykin A.B. *Experimental-theoretical bases of interaction of cross-beam foundations with the sloping base : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences*. Volgograd, 2018; 184. (rus.).
12. Zelenin E.V., Barykin B.Yu., Didenko D.A. Planning of experimental studies in the interaction of cross-beam foundation and sloping foundation subject to karst formation phenomena. *Construction technogenic safety*. 2022; S1:111-118. (rus.).
13. Zelenin E.V., Barykin B.Yu. To the issue of development of karst territories in the mountainous areas of the Republic of Crimea. Safety of the building stock of Russia. *Problems and solutions : materials of international academic readings*. 2020; 209-213. (rus.).
14. Zelenin E.V. Analytical review of works devoted to the study of foundation structures operation in the conditions of karst territories. *Construction and Architecture*. 2024; 12(2):(43). (rus.).
15. *Midas GTS NX Analysis Reference*. Chapter 4. Materials.
16. Evtushenko S.I., Zelenin E.V. Model studies of interaction of cross-beam foundation and inclined basement over karst cavity. *Construction and Architecture*. 2023; 11(4):8. (rus.).
17. Evtushenko S.I., Zelenin E.V., Barykin A.B. To the question of transformation of the sinkhole shape at interaction of cross-beam foundation and sloping base with karst cavity. *Construction and Architecture*. 2024; 12(2):(43). (rus.).
18. Zelenin E.V., Barykin B.Yu. To the issue of numerical modelling of cross-beam foundation operation on the sloping base in the conditions of karst processes activation. *Advanced development of modern science: Experiment, problems, forecasts : collection of articles of the II International Scientific and Practical Conference*. 2020; 28-38. (rus.).
19. Zelenin E.V., Barykin B.Yu. To the issue of development of karst territories in the mountainous areas of the Republic of Crimea. Safety of the building stock of Russia. *Problems and solutions : materials of international academic readings*. 2020; 209-213. (rus.).

Received August 28, 2024.

Adopted in revised form on September 20, 2024.

Approved for publication on September 25, 2024.

B I O N O T E S: **Sergey I. Evtushenko** — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Information Systems, Technologies and Automation in Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; sergand1957@gmail.com;

Evgeny V. Zelenin — postgraduate student of the Department of Building Structures; **Academy of Construction and Architecture of the Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky**; 3a Pavlenko st., Republic of Crimea, Simferopol, 295000, Russian Federation; workandearn@mail.ru;

Alexander B. Barykin — Candidate of Technical Sciences, Lecturer at the Department of Geotechnics and Structural Elements; **Academy of Construction and Architecture of the Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky**; 3a Pavlenko st., Republic of Crimea, Simferopol, 295000, Russian Federation; aleksbarykin@yandex.com.

Contribution of the authors:

Sergey I. Evtushenko — scientific editing, final conclusions.

Evgeny V. Zelenin — article writing, research concept, methodology development, final conclusions.

Alexander B. Barykin — scientific editing.

The authors declare no conflict of interest.