

Разработка методики расчета перекрестно-балочного фундамента на наклонном основании, осложненного карстово-провальными процессами

Александр Борисович Барыкин, Борис Юрьевич Барыкин,
Евгений Владимирович Зеленин

Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского (КФУ им. В.И. Вернадского);
г. Симферополь, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Разработана расчетная схема провально-карстовой воронки на закарстованных территориях с использованием результатов лабораторных экспериментальных исследований, позволяющая определить форму и размер карстового провала в зависимости от диаметра (радиуса) карстовой полости, глубины ее залегания, угла наклона основания и угла внутреннего трения грунтов, слагающих склон.

Материалы и методы. Приведена методика расчета нормальных контактных напряжений в наклонном грунтовом основании под подошвой перекрестно-балочного фундамента при образовании карстово-провальных воронок. Рассмотрены три основных случая расположения карстовой полости в массиве склона при наиболее неблагоприятном расположении карстовой полости относительно конструкций перекрестно-балочного фундамента.

Результаты. Получена аналитическая зависимость, позволяющая определить теоретическое значение расчетного значения диаметра L_c полости в наклонном основании, а также установить основные расчетные зависимости для установления нормальных контактных напряжений, которые дают возможность оценить изменения параметров НДС работы перекрестно-балочного фундамента после обрушения свода полости и образования сложной формы воронки обрушения.

Выводы. Разработанная методика удобна в применении для качественной оценки проектных решений при проектировании перекрестно-балочных фундаментов на наклонном основании на карстоопасных территориях. Полученные вариантные расчетные значения основных параметров НДС по предложенной методике позволят использовать рациональные конструктивные решения при проектировании.

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

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Барыкин А.Б., Барыкин Б.Ю., Зеленин Е.В. Разработка методики расчета перекрестно-балочного фундамента на наклонном основании, осложненного карстово-провальными процессами // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 9. С. 1494–1504. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1494-1504

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

Development of the calculation methodology of cross-beam foundation on the sloping base complicated by karst and sinkhole processes

Alexander B. Barykin, Boris Yu. Barykin, Evgeniy V. Zelenin
V.I. Vernadsky Crimean Federal University; Simferopol, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. A calculation scheme of karst sinkhole in karst territories using the results of laboratory experimental studies is developed, which makes it possible to determine the shape and size of karst sinkhole depending on the karst cavity diameter (radius), its depth, the base slope angle and the angle of internal friction of soils composing the slope.

Materials and methods. The method of calculation of normal contact stresses in the sloping soil base under the bottom of the cross-beam foundation during the formation of karst sinkholes is given, considering three main cases of karst cavity location in the slope massif with the most unfavourable location of the karst cavity relative to the cross-beam foundation structures.

Results. The analytical dependence allowing to determine the theoretical value of the design value of the diameter L_c of the cavity in the sloping base is obtained, as well as to establish the main design dependences for determining the normal contact stresses, which allow to estimate the changes in the VAT parameters of the cross-beam foundation operation after the cavity vault collapse and formation of a complex shape of the collapse funnel.

Conclusions. The developed methodology is convenient to use for qualitative assessment of design solutions in the design

of cross-beam foundations on a sloping base in karst-prone areas. The obtained variant design values of the main VAT parameters according to the proposed methodology will allow to apply rational design solutions in design.

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

FOR CITATION: Barykin A.B., Barykin B.Yu., Zelenin E.V. Development of the calculation methodology of cross-beam foundation on the sloping base complicated by karst and sinkhole processes. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(9):1494-1504. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1494-1504 (rus.).

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

ВВЕДЕНИЕ

Большая часть территории России подвержена карстовым процессам, вероятность образования которых имеет устойчивую тенденцию к увеличению [1–3]. В связи с этим исследования, направленные на изучение ключевых параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) при совместной работе конструкций фундаментов с грунтовым основанием в случае возникновения карстово-обвальных процессов, актуальны в геотехническом проектировании.

Крымский полуостров можно отнести к региону со сложной изменчивой геологической структурой. Основным явлением, подтверждающим такую сложную структурно-геологическую обстановку, служит образование негативных экзогенных процессов в грунтах: карста, оползней, эрозии и других, которые существенно усложняют инженерно-геологические условия при строительстве зданий и сооружений и отрицательно влияют на последующую их безопасную эксплуатацию [4, 5].

Из-за отсутствия благоприятных участков для строительства на южном берегу Крыма в последние годы, начиная с 2014 г., отводятся участки с уклонами от 15–30°, которые зачастую осложнены неблагоприятными инженерно-геологическими условиями, в том числе карст. В качестве фундаментов на таких территориях оптимальным решением с точки зрения экономической и технической направленности является перекрестно-балочный фундамент, устраиваемый на наклонном основании [6] (рис. 1).

Карстовые явления можно отнести к одним из опаснейших геологических процессов как по степени опасности, так и скорости проявления в виде возникновения провалов и мульд оседания земной поверхности, а также по масштабам и степени угрозы для вновь застраиваемых и уже плотно застроенных городских территорий [7–10]. Карстовые провалы сопровождаются внезапным обрушением толщи грунта. Диаметры воронок могут достигать нескольких десятков метров [11–13]. Поэтому данное явление представляет наибольшую опасность

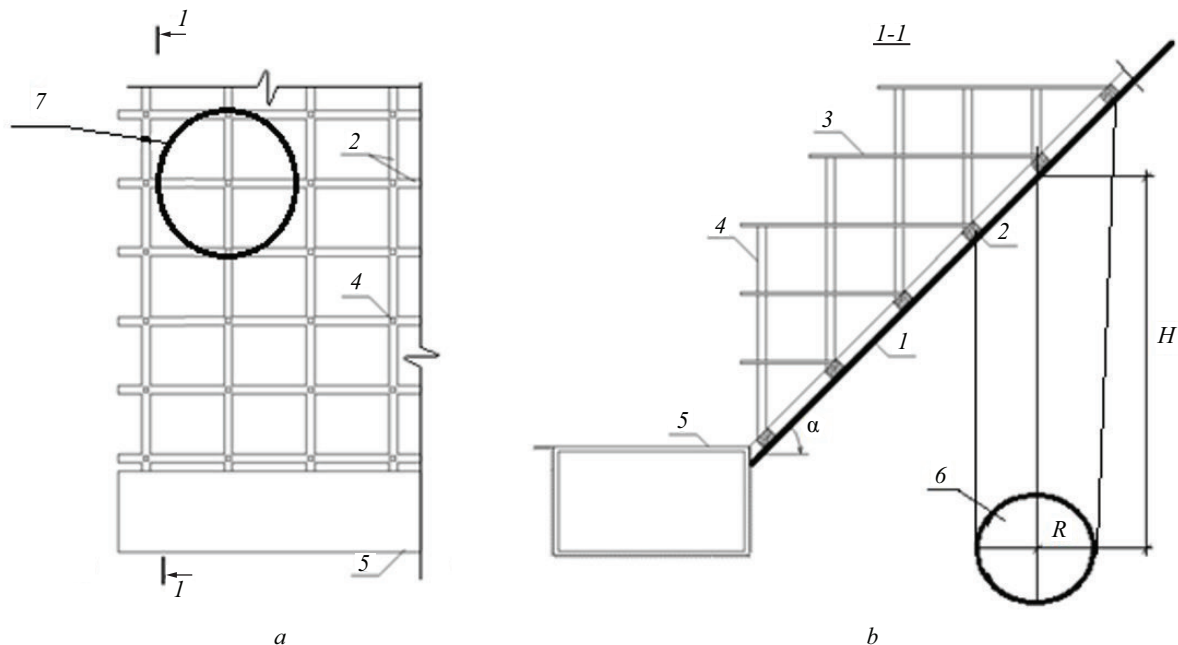


Рис. 1. Схема здания на склоне: 1 — продольные балки фундаментной решетки; 2 — поперечные балки фундаментной решетки; 3 — диски перекрытий; 4 — вертикальные несущие элементы (колонны); 5 — удерживающая заглубленная конструкция; 6 — карстовая воронка; 7 — проекция карстовой воронки на плоскость склона

Fig. 1. Scheme of the building on the slope: 1 — longitudinal beams of the foundation grid; 2 — transverse beams of the foundation grid; 3 — floor disks; 4 — vertical bearing elements (columns); 5 — retaining buried structure; 6 — sinkhole; 7 — projection of the sinkhole on the plane of the slope

для большинства зданий и сооружений, в том числе и на наклонных основаниях [14].

Современные подходы используют главным образом расчеты, в которых ключевыми параметрами являются расчетный диаметр карстового провала в основании и цилиндрическая форма тела обрушения. Существующие методы не учитывают такие параметры, как влияние наклона основания, глубина расположения карстовой полости, угол внутреннего трения грунта на формирование провальной воронки при выходе карста на поверхность, на изменение НДС основания. При этом проектирование перекрестно-балочных фундаментов на наклонных основаниях на закарстованных территориях до настоящего времени не выполнялось вследствие отсутствия комплексных экспериментально-теоретических исследований, на базе которых была бы построена приближенная к реальности форма тела обрушения и разработана методика расчета эпюры контактных напряжений.

Разработка аналитической методики расчета перекрестно-балочных фундаментов в условиях закарстованных территорий, основанной на результатах, полученных экспериментальным и численным методами с помощью МКЭ, позволит установить размер карстовой воронки и формы обрушения грунта, зависящей от известных исходных данных, таких как диаметр карстовой полости, глубина ее расположения, угол наклона основания, угол внутреннего трения, с последующим созданием расчетной модели для определения ординат эпюры нормальных контактных напряжений в наклонном основании под подошвой фундамента с учетом вариантного образования карстовых воронок.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Карстовые воронки обрушения могут иметь различную форму в зависимости от генезиса образования карстовой полости: цилиндрическую, коническую, чашевидную и другие [15]. Возникновение карстово-обвальной формы сложного строения служит последовательным комбинированием простых форм. Например, в нижней части воронка может быть цилиндрической, а в верхней — конической, и наоборот.

При эксплуатации здания или сооружения на контакте «основание – фундамент» появляется НДС, которое обуславливается такими параметрами, как площадь подошвы фундамента и внешняя нагрузка на него, передаваемая от надземной части конструкций; особенности устройства котлована в условиях плотной городской застройки и влияние от рядом расположенных объектов. Грунт основания — многокомпонентная неоднородная среда, параметры которой характеризуют его свойства, которые могут значительно отличаться в условиях расположения выделенного участка под строительство. Параметры деформации основания и нормаль-

ные контактные напряжения в наклонных грунтах представляют трудоемкость при проведении геотехнических расчетов в условиях вероятного образования карстовых явлений для проектировщиков на сегодняшний день. Исключением могут быть стандартные случаи, описанные в нормативных документах. Для возможности проектирования зданий и сооружений в нестандартных условиях необходимо выполнять экспериментально-теоретические исследования. С целью разработки методики расчета фундаментов на наклонном основании, подверженном образованию карста, рассмотрим расчетную схему, представленную на рис. 2.

Карстовая воронка на наклонном основании имеет форму перевернутого наклонного усеченного конуса с большим основанием на наклонной плоскости (рис. 2). В сечении одна из поверхностей этого конуса вертикальная (GE), другая наклонная (AC). Главная задача при расчетах — определение расчетного диаметра провала L_c на поверхности склона, который связан с диаметром карстовой полости и ее радиусом R , глубиной заложения карстовой полости H , а также углами наклона основания α и внутреннего трения грунта φ . Это для фундамента имеет решающее значение, так как на протяжении диаметра провала L_c фундаментная балка теряет контакт с основанием, что резко меняет форму эпюры контактных напряжений и, естественно, внешнюю нагрузку на фундамент. Часть эпюры на длине L_c исключается из эпюры и перераспределяется на оставшиеся участки. Экспериментальными исследованиями [16] установлено, угол наклона ξ связан с углами α и φ . Расчеты показали, что данный угол равен:

$$\xi = \frac{\alpha}{n} + \frac{\varphi}{n}, \quad (1)$$

где коэффициент $n = 4$. Данный коэффициент вычислен по результатам лабораторных экспериментальных исследований с эквивалентным грунтом, проведенных на кафедре строительных конструкций Института «Академия строительства и архитектуры» Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Из схемы будем иметь, что максимальный диаметр провальной воронки L_c состоит из трех основных частей (рис. 2):

$$L_c = ED + DB + BC; \quad (2)$$

$$ED = \frac{R}{\cos \alpha}; \quad (3)$$

$$DB = \frac{R \cdot \cos \xi}{\cos \alpha}; \quad (4)$$

$$BC = \frac{[H + R \cdot (\sin \xi + \cos \xi \cdot \tan \alpha)] \cdot \sin \xi}{\sin(90 - \alpha - \xi)}. \quad (5)$$

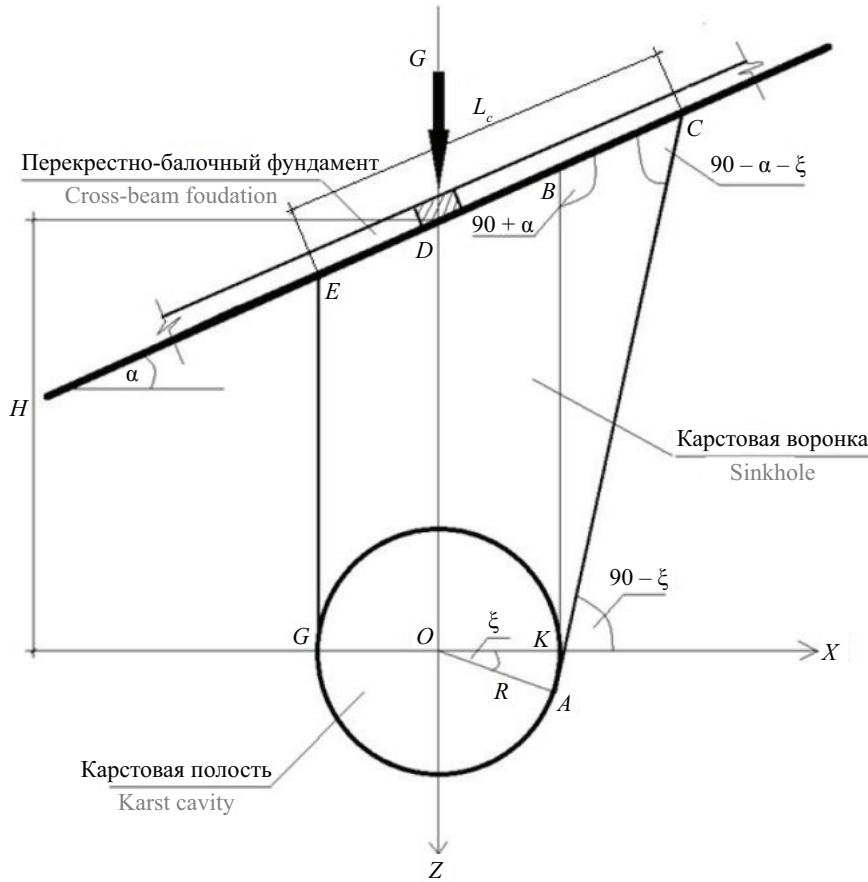


Рис. 2. Расчетная схема к определению карстовой воронки в наклонном основании

Fig. 2. Calculation scheme for karst sinkhole determination in a sloping basement

Определим длину «выключаемой» части наклонного грунтового основания:

$$L_c = \frac{R}{\cos \alpha} (1 + \cos \xi) + \frac{[H + R \cdot (\sin \xi + \cos \xi \cdot \tan \alpha)] \cdot \sin \xi}{\sin(90 - \alpha - \xi)}. \quad (6)$$

Рассмотрим три основных наиболее невыгодных случая расположения карстовой полости в наклонном основании (рис. 3).

Проанализируем каждый из этих случаев. В первом карстовая полость располагается рядом с удерживающей конструкцией и при выходе провала на поверхность из расчетной эпюры нормальных контактных напряжений, которая имеет трапециевидную форму с ординатами P_1 и P_2 , исключается ее часть с ординатами P_1 и P_{xc1} на длине провала L_c . Ординаты P_1 и P_2 определяются по методике, изложенной в работах [17, 18], по формулам:

$$P_1 = 2P_{cp}^* \Delta K; \quad (7)$$

$$P_2 = 2P_{cp}^* (1 - \Delta K), \quad (8)$$

где ΔK — коэффициент, определяющий соотношение граничных коэффициентов жесткости основа-

ния на этапах нагружения конструкции:

$$\Delta K = \frac{\frac{2}{3} P_{cp}^* L^2 b - \sum_{i=1}^n G_i \cos \alpha x_i}{\frac{1}{3} P_{cp}^* L^2 b},$$

где L — общая длина ленты, м; x_i — расстояние от точки приложения усилия G_i до нижней крайней точки фундаментной ленты, м.

Величину среднего давления P_{cp}^* устанавливают из уравнения равновесия всех сил, действующих на балку, при проектировании их на местные координатные оси $OY\alpha$. Тогда:

$$P_{cp}^* = \frac{\sum_{i=1}^n G_i}{Lb} \times (\cos \alpha + \cos \alpha \sin^2 \alpha - \cos^2 \alpha \sin \alpha f_{tp}^6), \quad (9)$$

где f_{tp}^6 — коэффициент трения бетона по бетону, равен 0,4.

Промежуточные ординаты трапециевидной эпюры контактных давлений рассчитывают по формуле:

$$P_{xi} = P_1 - \frac{(P_1 - P_2) l_i}{L}, \quad (10)$$

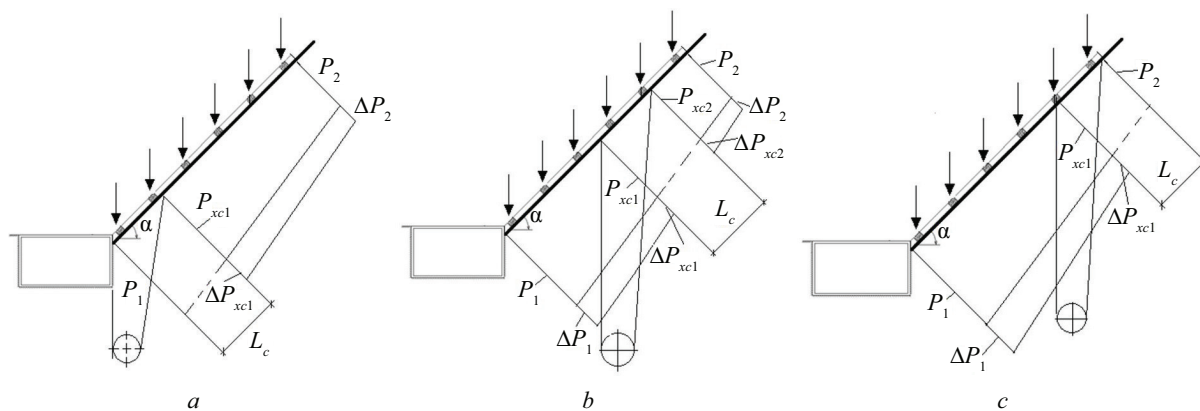


Рис. 3. Трансформирование эпюры контактных напряжений: *a* — у удерживающей конструкции; *b* — в средней части склона; *c* — в крайней точке склона

Fig. 3. Transformation of the contact stresses diagram: *a* — at the retaining structure; *b* — in the middle part of the slope; *c* — at the extreme point of the slope

где l_i — расстояние от точки, в которой определяется давление, до нижней точки фундаментной ленты, м, в данном случае $l_i = L_c$; L — длина продольной ленты, м.

При этом расчетная длина эпюры вычисляется по уравнению:

$$L_b = L - L_c; \quad (11)$$

ординаты соответственно по выражениям:

$$P_{\max} = P_{xc1} + \Delta P_{xc1}; \quad (12)$$

$$P_{\min} = P_2 + \Delta P_2. \quad (13)$$

Тогда:

$$P_{xc1} = P_1 - \frac{(P_1 - P_2) \cdot L_c}{L} = P_1 - \Delta P \cdot \frac{L_c}{L}. \quad (14)$$

Задача сводится к получению ординат дополнительной эпюры контактных давлений ΔP_2 и ΔP_{xc1} . Основными условиями получения данных неизвестных являются соотношение ординат:

$$\frac{P_{xc1}}{P_2} = \frac{\Delta P_{xc1}}{\Delta P_2} \quad (15)$$

и равенство площадей изымаемой эпюры S_{sc} и прибавляемой S_{sc}^a :

$$\frac{P_1 + P_1 - \Delta P \cdot \frac{L_c}{L}}{2} \cdot L_c = \frac{\Delta P_{xc1} + \Delta P_2}{2} \cdot (L - L_c). \quad (16)$$

Проведя соответствующие преобразования и подстановки, получим:

$$\Delta P_2 = \frac{\left(2P_1 - \Delta P \cdot \frac{L_c}{L}\right) \cdot L_c}{\left(\frac{P_{xc1}}{P_2} + 1\right) \cdot (L - L_c)}; \quad (17)$$

$$\Delta P_{xc1} = \Delta P_2 \cdot \frac{P_{xc1}}{P_2}. \quad (18)$$

Во втором случае карстовая полость находится на расстоянии x_c от удерживающей конструкции. При этом должно соблюдаться условие:

$$x_c \geq R_c,$$

где R_c — радиус карстовой полости.

Тогда левая граница карстовой полости на поверхности склона будет определяться исходя из угла наклона основания по условию:

$$\Delta x_c = x_c^* - R_c^* = \frac{1}{\cos \alpha} (x_c - R_c). \quad (19)$$

При этом из общей расчетной эпюры контактных напряжений будет изъята эпюра площадью:

$$S_{cs} = \frac{P_{xc1} + P_{xc2}}{2} \cdot L_c, \quad (20)$$

где $P_{xc1} = P_1 - \Delta P \cdot \Delta x_c / L$; $P_{xc2} = P_2 - \Delta P \cdot \frac{\Delta x_c + L_c}{L}$ — левая и правая ординаты расчетной трапециевидной эпюры контактных напряжений, между которыми напряжения становятся равными нулю из-за провала карстовой полости на длине L_c .

Исходя из нескольких условий:

1) равенства площадей изымаемой эпюры S_{cs} и прибавляемых S_1^a и S_2^a :

$$S_{cs} = S_1^a + S_2^a;$$

2) равенства соотношений соответствующих площадей эпюр:

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{S_1^a}{S_2^a}, \quad (21)$$

будем иметь:

$$S_1^a = S_{cs} - \frac{S_{cs}}{1 + \delta_s}; \quad (22)$$

$$S_2^a = \frac{S_{cs}}{1 + \delta_s}, \quad (23)$$

где $\delta_s = S_1/S_2$ — соотношение площадей эпюр.

Решая уравнение (23) относительно неизвестной ординаты ΔP_{xc2} , получим:

$$\Delta P_{xc2} = \frac{(P_{xc1} + P_{xc2}) \cdot L_c}{(1 + \delta S) \cdot \Delta L_b} - \Delta P_2. \quad (24)$$

Используя уравнение (17) и производя соответствующие подстановки и замены, получим:

$$\Delta P_2 = \frac{\frac{(P_{xc1} + P_{xc2}) \cdot L_c}{(1 + \delta S) \cdot \Delta L_b} [(L - \Delta x_c - L_c) \cdot \delta S - \delta P_{xc} \cdot \Delta x_c]}{(\delta P - \delta P_{xc}) \cdot \Delta x_c}. \quad (25)$$

Тогда, используя вышеприведенные зависимости, будем иметь:

$$\Delta P_1 = \Delta P_2 \cdot \delta P; \quad (26)$$

$$\Delta P_{xc1} = \Delta P_{xc2} \cdot \delta P_{xc}, \quad (27)$$

где $\delta P = P_1/P_2$ — соотношение ординат трапецевидной эпюры при отсутствии карстовой полости; $\delta P_{xc} = P_{xc1}/P_{xc2}$ — соотношение ординат трапецевидной эпюры на границах карстовой полости при ее отсутствии.

В третьем случае карстовая полость располагается у края фундаментной ленты таким образом, чтобы наклонное сечение провальной воронки находилось в крайней точке фундамента и при выходе провала на поверхность из расчетной эпюры нормальных контактных напряжений, которая имеет трапецевидную форму с ординатами P_1 и P_2 исключается ее часть с орди-

натами P_2 и P_{xc1} на длине провала L_c . Этот случай с точки зрения математических решений близок к первому, поэтому детально рассматривать решение считаем нецелесообразным. Таким образом, запишем сразу полученные значения ординат:

$$P_{xc1} = P_1 - \Delta P \cdot \delta L_b, \quad (28)$$

где $\Delta P = P_1 - P_2$ — разность максимальной и минимальной ординат трапецевидной расчетной эпюры без наличия карстовой полости в наклонном основании; $\delta L_b = L - L_c/L$ — отношение разности общей длины балки L и длины карстового провала на поверхности склона L_c к общей длине балки L :

$$\Delta P_{xc1} = \Delta P_1 \cdot \frac{P_2}{P_1}; \quad (29)$$

$$\Delta P_1 = \frac{(P_1 - \Delta P \cdot \delta L_b + P_2) \cdot L_c}{(L - L_c) \cdot P_2/P_1}. \quad (30)$$

Итак, все необходимые компоненты расчетной перераспределенной эпюры нормальных контактных напряжений в наклонном основании получены и могут быть использованы при расчете, проектировании и конструировании такого типа фундаментов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оценки применимости представленной методики с разработанными зависимостями был проведен расчет для конкретного фундамента, представленного в работе [18].

Исходные данные

Initial data

Исходные данные Initial data	Значение параметра Parameter value
Угол наклона склона α Slope angle α	35°
Ширина здания, м Building width, m	18
Длина здания, м Building length, m	25,5
Усилие, приходящее в каждый узел решетки, кН Force arriving at each grid node, kN	1000
Модуль деформации грунта, кН/м ² Soil deformation modulus, kN/m ²	2,4 · 10 ⁴
Проектный класс бетона фундамента В25, МПа Design class of foundation concrete В25, MPa	14,5
Модуль упругости бетона, кН/м ² Modulus of elasticity of concrete, kN/m ²	3 · 10 ⁷
Модуль деформации арматуры, кН/м ² Modulus of deformation of reinforcement, kN/m ²	2,0 · 10 ⁸
Грунт основания Foundation soil	Суглинок Loam
Удельный вес в естественном состоянии γ , кН/м ³ Specific gravity in natural state γ , kN/m ³	16,2
Угол внутреннего трения φ Angle of internal friction φ	30°

Окончание табл. / End of the Table	
Исходные данные Initial data	Значение параметра Parameter value
Коэффициент трения бетона по бетону $f_{\text{п}}^{\text{б}}$ Coefficient of friction of concrete on concrete f_f^c	0,4
Диаметра карстового провала D , м Karst failure diameter D , m	5
Глубина карстовой полости, м Depth of karst cavity, m	10
Расстояние карстовой полости от удерживающей конструкции, м Distance of the karst cavity from the retaining structure, m	0

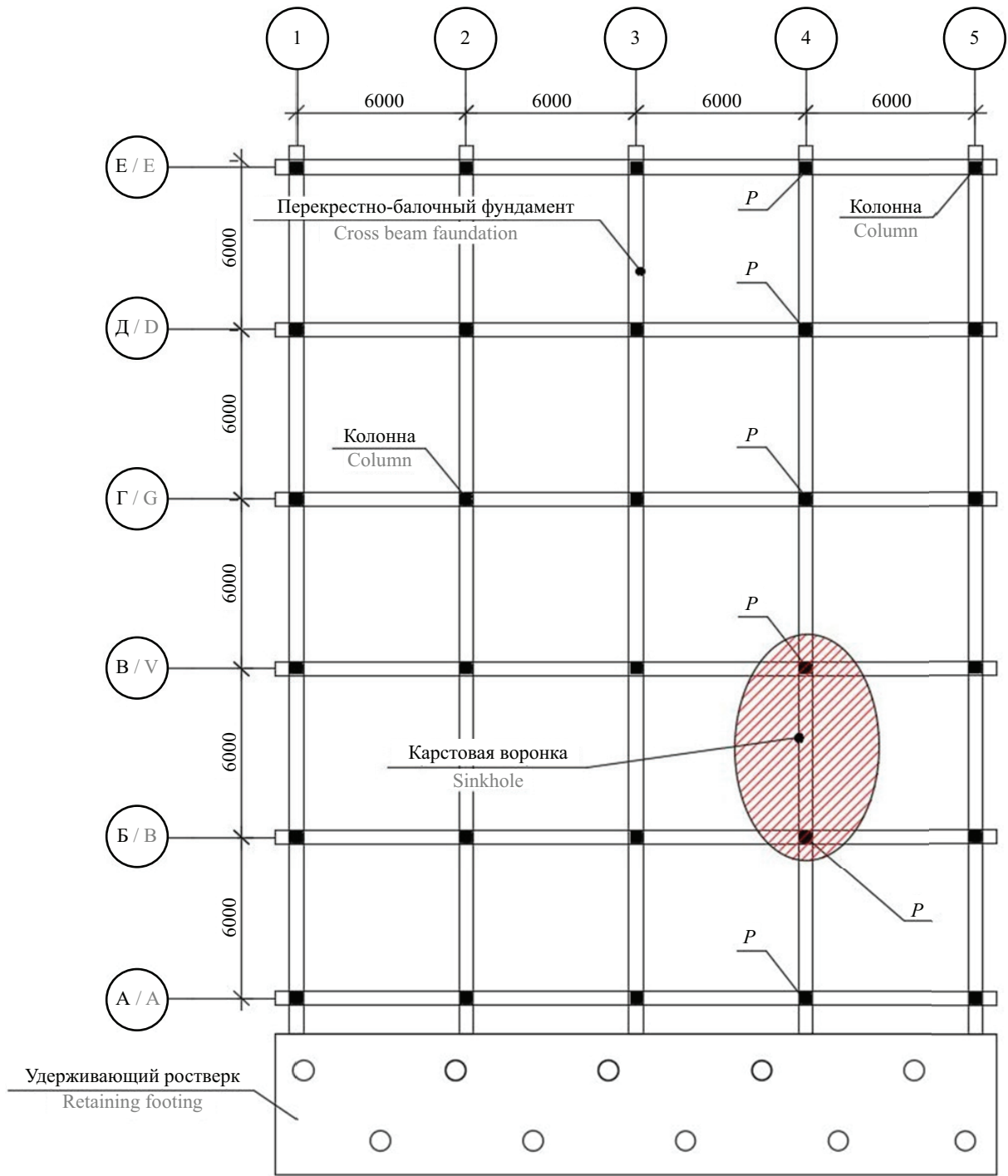


Рис. 4. Схема фундамента из перекрестных лент на склоне
Fig. 4. Schematic diagram of the foundation made of crossed tapes on a slope

Исходные данные для проектирования представлены в таблице, расчетная схема приведена на рис. 4.

При выполнении расчета фундамента без карста получена эпюра нормальных контактных напряжений в наклонном основании под крайней продольной балкой (рис. 5).

Рассчитаем длину карстового провала L_c , выходящего на поверхность.

Расчетная длина эпюры определится по уравнению (11):

$$L_b = L - L_c = 25,5 - 11,51 = 13,99 \text{ м.}$$

Расчетные ординаты эпюры по формуле (26):

$$P_{xc1} = P_1 - \frac{(P_1 - P_2) \cdot L_c}{L} = P_1 - \Delta P \cdot \frac{L_c}{L} = 254,76 - (254,79 - 111,66) \cdot \frac{11,51}{25,5} = 190,19 \text{ кН/м}^2;$$

$$\begin{aligned} \Delta P_2 &= \frac{\left(2P_1 - \Delta P \cdot \frac{L_c}{L}\right) \cdot L_c}{\left(\frac{P_{xc1}}{P_2} + 1\right) \cdot (L - L_c)} = \\ &= \frac{\left(2 \cdot 254,79 - (254,79 - 111,66) \cdot \frac{11,51}{25,5}\right) \cdot 11,51}{\left(\frac{190,19}{111,66} + 1\right) \cdot (25,5 - 11,51)} = \\ &= 135,43 \text{ кН/м}^2; \end{aligned}$$

$$\Delta P_{xc1} = P_2 \cdot \frac{P_{xc1}}{P_2} = 135,43 \cdot \frac{190,19}{111,66} = 309,02 \text{ кН/м}^2.$$

Тогда ординаты перераспределенной эпюры нормальных контактных напряжений после выхода карстовой воронки на поверхность будут иметь вид:

$$P_{\min}^1 = P_2 + \Delta P_2 = 111,66 + 135,43 = 247,09 \text{ кН/м}^2;$$

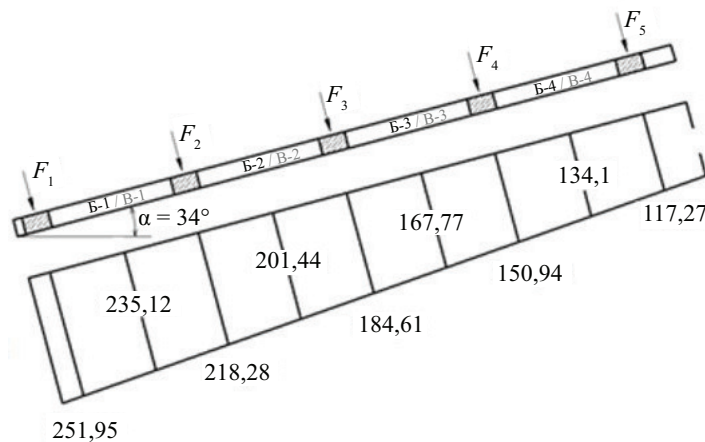


Рис. 5. Трапециевидная эпюра контактных напряжений под продольной лентой

Fig. 5. Trapezoidal diagram of contact stresses under the longitudinal strip

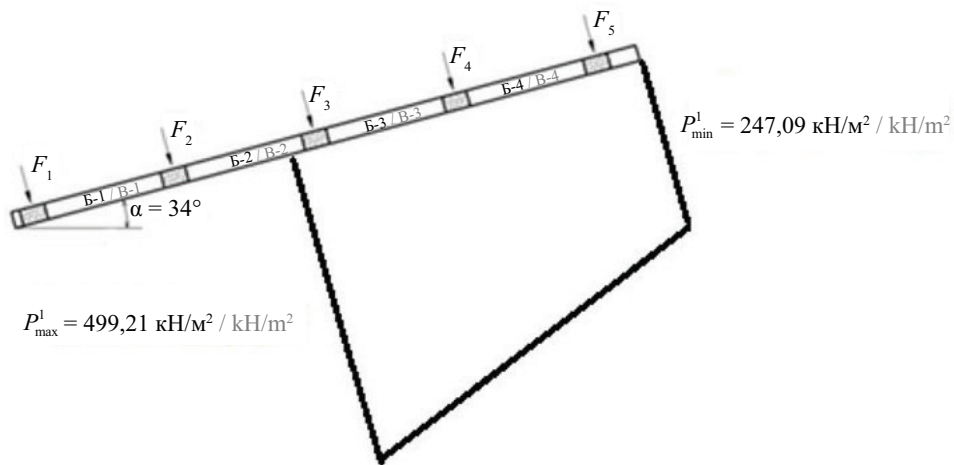


Рис. 6. Перераспределенная эпюра контактных напряжений при наличии карстовой полости

Fig. 6. Redistributed contact stress profile in the presence of a karst cavity

$$P_{\max}^I = P_{\text{xc1}} + \Delta P_{\text{xc1}} = 190,19 + 309,02 = 499,21 \text{ кН/м}^2.$$

В этом случае продольная балка фундамента рассчитывается как многопролетная на воздействие нормальных контактных напряжений трапециевидной формы на длине 13,99 м. Другая часть балки будет рассчитываться как защемленная внецентренно нагруженная консольная балка длиной 11,51 м с нагрузкой от внешних усилий и веса здания (рис. 6).

Расчет моментов и поперечных усилий для определения армирования данной конструкции выполняется по общим правилам строительной механики в программных комплексах САПР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам проведенных исследований разработана методика расчета перекрестно-балочного фундамента на наклонном основании, осложненного карстово-провальными процессами.

Представленная аналитическая методика позволяет определить нормальные контактные на-

пряжения в наклонном грунтовом основании, осложненном карстово-провальными процессами с учетом совместной работы с перекрестно-балочным фундаментом. Методику возможно применять с целью расчета и конструирования фундаментов, а также определения необходимых мероприятий по противокарстовой защите для конкретных условий работы системы «фундамент – наклонное основание».

Разработанная методика может быть использована при проектировании фундаментов зданий и сооружений в условиях сложного рельефа при наличии карстово-провальных процессов на основаниях с углами наклона в пределах от 15 до 35°. Применение данной методики дает возможность выявить особенности изменения НДС системы «фундамент – наклонное основание» при возникновении карстово-провальных процессов в основании, а также проводить варианты расчеты усилий, возникающих в грунтовом основании и фундаментной конструкции в зависимости от параметров месторасположения карстовой полости, ее геометрических размеров, угла наклона основания.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Аникеев А.В., Рагозин А.Л., Селезнев В.Н. Оценка геологического риска на участке городского строительства // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2007. № 6. С. 547–560. EDN IBCDKZ.
2. 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. Всерос. конф. «Риск–2006». 2006. С. 315–318.
3. Tolmachev V., Leonenko M. Experience in collapse risk assessment of building on covered karst landscapes in Russia // Karst Management. 2011. Pp. 75–102. DOI: 10.1007/978-94-007-1207-2_4
4. 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. Общерос. науч.-практ. конф. 2023. С. 72–92. EDN URNRRM.
5. Вахрушев Б.А. Районирование карста Крымского полуострова // Speleology and Karstology. 2009. № 3. С. 39–46. EDN RCVUYD.
6. Барыкин Б.Ю., Барыкин А.Б., Морозов В.В. Здания и сооружения на сложном рельефе : учебно-методическое пособие. Симферополь : Институт «Академия строительства и архитектуры», 2022. 74 с.
7. Aktürk Ö., Drumm E.C., Tutluoglu L., Akgün H. Undrained stability of residual soil in karst // Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst. 2008. Pp. 223–232. DOI: 10.1061/41003(327)22
8. Newton J.G. Development of Sinkholes Resulting From Man's Activities in the Eastern United States // Circular. 1987. DOI: 10.3133/cir968
9. Waltham T., Bell F., Culshaw M. Sinkholes and subsidence: karst and cavernous rocks in engineering and construction. Springer Praxis, 2005.
10. Zhou W., Beck B.F. Management and mitigation of sinkholes on karst lands: an overview of practical applications // Environmental Geology. 2008. Vol. 55. Pp. 837–851. DOI: 10.1007/s00254-007-1035-9
11. Roscoe K.H. The influence of strains in soil mechanics // Géotechnique. 1970. Vol. 20. Issue 2. Pp. 129–170. DOI: 10.1680/geot.1970.20.2.129
12. 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. Lisse : Swets & Zeitlinger, 2001. Pp. 163–167.
13. Tharp T.M. Cover-collapse sinkhole formation and soil plasticity // Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst. 2003. Pp. 110–123. DOI: 10.1061/40698(2003)9
14. Аникеев А.В. Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска. М. : ПУДН, 2017. 328 с. EDN ZSLFBT.

15. Саваренский И.А., Миронов Н.А. Руководство по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста. М., 1995. 167 с.

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. DOI: 10.29039/2308-0191-2023-11-4-8-8. EDN OIBIJK.

17. Барыкин А.Б. Модельные исследования деформаций оснований перекрестно-балочных фундаментов на склонах // Строительная механика и расчет сооружений. 2017. № 3 (272). С. 68–75. EDN YPJIT.

18. Барыкин А.Б. Экспериментально-теоретические основы взаимодействия перекрестно-балочных фундаментов с наклонным основанием: дис. ... канд. тех. наук. Волгоград, 2018. 184 с. EDN SSOIFD.

Поступила в редакцию 6 мая 2024 г.

Принята в доработанном виде 27 мая 2024 г.

Одобрена для публикации 6 июня 2024 г.

О Б А В Т О Р А Х: Александр Борисович Барыкин — кандидат технических наук, преподаватель кафедры геотехники и конструктивных элементов, Институт «Академия строительства и архитектуры»; Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского (КФУ им. В.И. Вернадского); 295007, Республика Крым, г. Симферополь, пр-т Академика Вернадского, д. 4; aleksbarykin@yandex.com;

Борис Юрьевич Барыкин — кандидат технических наук, доцент, преподаватель кафедры строительных конструкций, Институт «Академия строительства и архитектуры»; Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского (КФУ им. В.И. Вернадского); 295007, Республика Крым, г. Симферополь, пр-т Академика Вернадского, д. 4; dekan.asf@mail.ru;

Евгений Владимирович Зеленин — аспирант кафедры строительных конструкций, Институт «Академия строительства и архитектуры»; Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского (КФУ им. В.И. Вернадского); 295007, Республика Крым, г. Симферополь, пр-т Академика Вернадского, д. 4; workandearn@mail.ru.

Вклад авторов:

Барыкин А.Б. — концепция исследования, научное редактирование.

Барыкин Б.Ю. — научное руководство.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Anikeev A.V., Ragozin A.L., Seleznev V.N. Evaluation of the geological risk on an urban construction site. *Geoekologiya. Inzhenernaya Geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya*. 2007; 6:547-560. EDN IBCDKZ. (rus.).

2. 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.).

3. Tolmachev V., Leonenko M. Experience in Collapse risk assessment of building on covered karst landscapes in Russia. *Karst Management*. 2011; 75-102. DOI: 10.1007/978-94-007-1207-2_4

4. Amelichev G.N., Vakhrushev B.A., Samokhin G.V., Tokarev S.V. Peculiarities of engineering surveys on the Carsted 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. EDN URNRRM. (rus.).

5. Vakhrushev B.A. Karst zonation of the Crimean Peninsula. *Speleology and Karstology*. 2009; 3:39-46. EDN RCVUYD. (rus.).

6. Barykin B.Yu., Barykin A.B., Morozov V.V. *Buildings and constructions on a complex relief: educational and methodical manual*. Simferopol, Institute “Academy of Construction and Architecture”, 2022; 74. (rus.).

7. Aktürk Ö., Drumm E.C., Tutluoglu L., Akgün H. Undrained stability of residual soil in karst. *Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst*. 2008; 223-232. DOI: 10.1061/41003(327)22

8. Newton J.G. Development of sinkholes resulting from man’s activities in the Eastern United States. *Circular*. 1987. DOI: 10.3133/cir968

9. Waltham T., Bell F., Culshaw M. *Sinkholes and Subsidence: Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction*. Springer Praxis, 2005.

10. Zhou W., Beck B.F. Management and mitigation of sinkholes on karst lands : an overview of practical applications. *Environmental Geology*. 2008; 55:837-851. DOI: 10.1007/s00254-007-1035-9

11. Roscoe K.H. The influence of strains in soil mechanics. *Géotechnique*. 1970; 20(2):129-170. DOI: 10.1680/geot.1970.20.2.129
12. 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*. Lisse, Swets & Zeitlinger, 2001; 163-167.
13. Tharp T.M. Cover-collapse sinkhole formation and soil plasticity. *Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst*. 2003; 110-123. DOI: 10.1061/40698(2003)9
14. Anikeev A.V. *Falls and sinkholes in karst areas: mechanisms of formation, forecast and risk assessment*. Moscow, RUDN, 2017; 328. EDN ZSLFBT. (rus.).
15. Savarensky I.A., Mironov N.A. *Guidelines for engineering-geological surveys in areas of karst development*. Moscow, 1995; 167. (rus.).
16. Evtushenko S., Zelenin E. Experimental studies of the interaction of a cross-beam foundation and an inclined base over a karst cavity. *Construction and Architecture*. 2023; 11(4):8. DOI: 10.29039/2308-0191-2023-11-4-8-8. EDN OIBIJK. (rus.).
17. Barykin A.B. Model studies of deformations of cross-beam foundations on slopes. *Structural Mechanics and Calculation of Structures*. 2017; 3(272):68-75. EDN YPJIT. (rus.).
18. Barykin A.B. *Experimental-theoretical bases of interaction of cross-beam foundations with the sloping base : dis. ... Candidate of Technical Sciences*. Volgograd, 2018; 184. EDN SSOIFD. (rus.).

Received May 6, 2024.

Adopted in revised form on May 27, 2024.

Approved for publication on June 6, 2024.

B I O N O T E S : **Alexander B. Barykin** — Candidate of Technical Sciences, Lecturer at the Department of Geotechnics and Structural Elements, Institute “Academy of Construction and Architecture”; **V.I. Vernadsky Crimean Federal University**; 4 prospekt Vernadskogo, Simferopol, Republic of Crimea, 295007, Russian Federation; aleksbarykin@yandex.com;

Boris Yu. Barykin — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Lecturer at the Department of Building Structures, Institute “Academy of Construction and Architecture”; **V.I. Vernadsky Crimean Federal University**; 4 prospekt Vernadskogo, Simferopol, Republic of Crimea, 295007, Russian Federation; dekan.asf@mail.ru;

Evgeniy V. Zelenin — postgraduate student; Institute “Academy of Construction and Architecture”; **V.I. Vernadsky Crimean Federal University**; 4 prospekt Vernadskogo, Simferopol, Republic of Crimea, 295007, Russian Federation; workandearn@mail.ru.

Contribution of the authors:

Alexander B. Barykin — research concept, scientific editing.

Boris Yu. Barykin — scientific supervision.

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

The authors declare that there is no conflict of interest.