



## Расчет несущей способности многощелевых фундаментов

О. А. Богомолова<sup>1</sup>✉, С. А. Богомолов<sup>2</sup>, Н. А. Богомолов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Волгоградский государственный технический университет

Волгоград, Проспект им. В. И. Ленина, 28, 400005, Российская Федерация

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет  
Москва, Ярославское шоссе, 26, 129337, Российская Федерация

✉ [boazaritcyn@mail.ru](mailto:boazaritcyn@mail.ru)



**Аннотация.** Приведены результаты расчетов несущей способности двух- и трехщелевого фундаментов на однородном основании, выполненных при помощи компьютерной программы FEA, в которой формализован метод конечных элементов. По результатам расчетов дана оценка влияния различных факторов (глубины заложения фундамента, межщелевого расстояния, коэффициента бокового давления вмещающего грунта) на напряженное состояние грунта и процесс развития кулоновских областей пластических деформаций. Расчеты выполнены при величине отношения модуля упругости железобетона к модулю деформации грунта, которое равно  $10^3$ , что соответствует его реальному значению. Показано, что применение трехщелевого Ш-образного фундамента является нецелесообразным ввиду того, что при прочих равных условиях он проигрывает двухщелевому П-образному фундаменту и по несущей способности, и по осадкам. Анализ результатов сопоставительных расчетов показал, что численные значения величины несущей способности основания двухщелевого фундамента, вычисленные на основе рекомендаций СНиП и СП, могут быть получены на основе вычислений по программе FEA при некоторых значениях коэффициента бокового давления грунта. Сделано предположение, что компьютерная программа FEA может быть рекомендована для использования при соответствующих расчетах.

**Ключевые слова:** метод конечных элементов, щелевые фундаменты, напряженное состояние основания, области пластических деформаций, физико-механические свойства грунта и железобетона, несущая способность

**Для цитирования:** Богомолова О. А., Богомолов С. А., Богомолов Н. А. Расчет несущей способности многощелевых фундаментов. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2025;5(4):24–35. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-4-24-35> EDN: BFYILD

## Calculation of bearing capacity for multi-slot foundations

Oksana A. Bogomolova<sup>1</sup>✉, Sergey A. Bogomolov<sup>2</sup>, Nikita A. Bogomolov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Volgograd State Technical University

Volgograd, 28 Lenin Avenue, 400005, Russian Federation

<sup>2</sup> Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)  
Moscow, 26 Yaroslavskoe Shosse, 129337, Russian Federation

✉ [boazaritcyn@mail.ru](mailto:boazaritcyn@mail.ru)

**Abstract.** This article presents the calculation results of the bearing capacity of two- and three-slot foundations on a homogeneous base, performed using the FEA computer program, which implements the finite element method. Based on these results, the influence of various factors (foundation embedment depth, distance between the slots, and the lateral earth pressure coefficient of the surrounding soil) on the soil's stress state and the development of Coulomb plastic deformation zones was assessed. The calculations were performed with a ratio of the reinforced concrete's modulus of elasticity to the soil's modulus of deformation equal to  $10^3$ , which, as demonstrated in the work, corresponds to a realistic value. It was shown that the use of a three-slotted Ш-shaped foundation is not advisable because it is inferior to a two-slotted Π-shaped foundation in both bearing capacity and settlement, under otherwise equal conditions. Analysis of the comparative calculation results indicated that the numerical values of the bearing capacity for a two-slot foundation, calculated according to SNiP and SP recommendations, can be reproduced using the FEA program for specific values of the lateral soil pressure coefficient. Consequently, the FEA computer program is recommended for use in relevant calculations.

**Keywords:** finite element method, slot-type foundations, stress state of the base, plastic deformation zones, physical and mechanical properties of soil and reinforced concrete, bearing capacity

**For citation:** Bogomolova O. A., Bogomolov S. A., Bogomolov N. A. Calculation of bearing capacity for multi-slot foundations. *Architecture, Construction, Transport*. 2025;5(4):24–35. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-4-24-35>

## 1. Введение / Introduction

Щелевые фундаменты работают как сложные конструкции, состоящие из буроинъекционных стен в грунте и защемленного в межщелевом пространстве грунта, находящегося в естественном состоянии. Стены в грунте (щели) объединяются плитным ростверком и образуют некое подобие короба, перевернутого вверх дном. Известно, что такие конструкции характеризуются большей несущей способностью и меньшими по величине осадками, нежели отдельные группы свай и плиты, что объясняется существенно развитой боковой поверхностью, за счет чего увеличиваются соответствующие силы трения и сцепления, и включением в работу заключенного в межщелевом пространстве грунта.

Работе щелевых фундаментов посвящено множество исследований, одними из первых были Е. А. Сорочан [1–3], В. В. Павлов [4], В. М. Зубков [5]. Результаты исследований на праяненно-деформированного состояния, процесса развития пластических областей и осадок щелевых фундаментов представлены в работах С. В. Платоновой [6, 7], Л. А. Бартоломея и О. А. Богомоловой с соавторами [8, 9]. Х. Брандтль [10] и В. П. Петров [11] рассматривали вопросы передачи через щелевые фундаменты сверхбольших и, наоборот, малых нагрузок. В. С. Уткин и О. Л. Борисов [12] рассматривали расчет надежности щелевого фундамента на стадии эксплуатации, а Д. Н. Банников – расчет мелкозаглубленных ленточных щелевых фундаментов по двум группам предельных состояний [13].

Несмотря на достаточно большое количество исследований, посвященных щелевым фундаментам, и наличие руководств и рекомендаций по их проектированию (Строительные правила Республики Беларусь, СП Российской Федерации, Рекомендации по проектированию и строительству щелевых фундаментов и т. д.), существуют вопросы по их расчету. Например, ни один из методов и подходов к расчету несущей способности щелевых фундаментов не учитывает величину коэффициента бокового давления грунта и жесткость фундамента.

В настоящей статье предложен подход к решению задачи о несущей способности основания щелевого фундамента с использованием компьютерной программы FEA, в которой formalизован метод конечных элементов (МКЭ) [14]. Применение данного метода для решения различных инженерных и научных задач широко рассматривается в отечественной и зарубежной литературе, однако авторам не удалось отыскать работ ученых, посвященных FEM-моделированию напряжен-

ного состояния и несущей способности оснований щелевых фундаментов, подобных рассмотренным в статье.

Для того, чтобы обосновать возможность использования МКЭ в качестве инструмента данного исследования, необходимо показать, что с его помощью можно учесть всю совокупность расчетных параметров, которые оказывают влияние на напряженное состояние грунтового массива и, как следствие, на процесс образования и развития областей пластических деформаций в активной зоне фундамента. В качестве переменных параметров при проведении численных исследований приняты: глубина заложения фундамента  $h$ , ширина фундамента  $2b$ , физико-механические свойства грунта – угол внутреннего трения  $\varphi$ , удельное сцепление  $c$ , объемный вес  $\gamma$ , коэффициент бокового давления  $\xi_o$  и модуль деформации грунта  $E_o$ , коэффициент Пуассона  $\nu$  и модуль упругости материала фундамента (железобетон)  $E$ , величина интенсивности равномерно распределенной нагрузки  $q$ . В качестве обобщенных параметров используются: приведенное давление связности  $\sigma_{ce} = c(\gamma htg\varphi)^{-1}$  и отношение модуля упругости железобетона и модуля деформации грунта основания  $n = \frac{E}{E_o}$ . Для примера рассмотрен расчет несущей способности основания двухщелевого фундамента.

Кроме того, проведено сопоставление результатов, полученных на основании предложенного подхода, с результатами, полученными другими расчетными методами, в том числе с использованием рекомендованных нормативных документов.

## 2. Материалы и методы / Materials and methods

Расчет по несущей способности – это прочностной расчет, поэтому важно знать, как меняется напряженное состояние основания в зависимости от тех или иных факторов. Для анализа процесса распределения напряжений в активной зоне щелевого фундамента воспользуемся компьютерной программой [14], в которой formalизован метод конечных элементов [15, 16].

На рис. 1 изображены фрагменты расчетных конечно-элементных схем двухщелевого и трехщелевого фундаментов одинаковой глубины заложения, у которых плиты и щели имеют равную толщину. На схемы наложены граничные условия, рекомендованные в работе [17].

Линейные размеры расчетной схемы двухщелевого фундамента  $8b \times 6b$  ( $b$  – полуширина фундамента), она состоит из 115 200 одинаковых по форме и размеру треугольных конечных элементов, сопряженных в 58 362 узлах; ширина матрицы жесткости системы составляет 246. Размеры расчетной схемы трехщелевого фундамента  $8b \times 8b$ , она состоит из 20 340 одинаковых треугольных элементов, сопряженных в 40 000 узлах, ширина матрицы жесткости системы – 206.

Как видно, степень дискретизации расчетной схемы основания трехщелевого фундамента существенно ниже, но, как нами было установлено, при однородной разбивке схемы (конечные элементы одинакового размера и формы) это практически не сказывается на точности и достоверности получаемого результата.

При расчете в качестве примера принято, что основание сложено однородным суглинком, физико-механические свойства которого имеют следующие значения:  $\gamma = 18 \text{ кН/м}^3$ ;  $\varphi = 25^\circ$ ;  $c = 37 \text{ кПа}$ ;  $\xi_o = 0.41$ ;  $E_o = 34 \text{ МПа}$  [20]. Фундамент выполнен из бетона класса B30,  $\gamma_b = 22.9 \text{ кН/м}^3$ ,  $\nu_b = 0.18$ ,  $E_b = 32.5 \cdot 10^3 \text{ МПа}$  (СП 63.13330.2018<sup>1</sup>),  $h = 2b = 1 \text{ м}$ .

<sup>1</sup> СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения = Concrete and reinforced concrete structures. General provisions: утвержден Приказом Министерства строительства и ЖКХ РФ от 19 декабря 2018 г. № 832/пр: введен в действие с 20 июня 2019 г. URL: <https://docs.cntd.ru/document/554403082> (дата обращения: 07.06.2025).

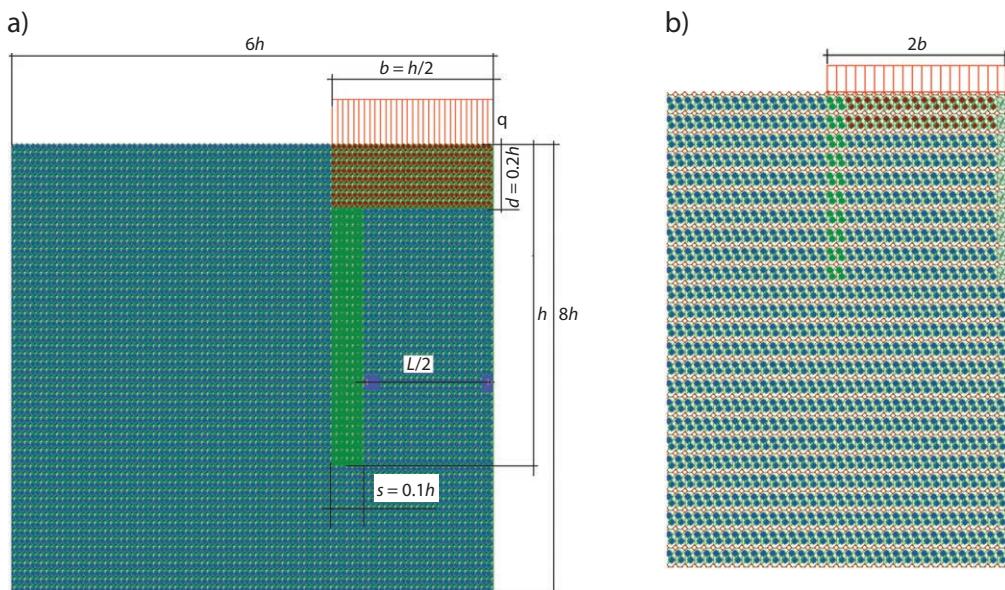


Рис. 1. Фрагменты расчетных конечно-элементных схем фундаментов: а) двухщелевого; б) трехщелевого (размеры даны в долях глубины заложения фундамента  $h$ , схемы изображены в разных масштабах) [19]  
 Fig. 1. Fragments of the FEM analysis models for the foundations: a) two-slot; b) three-slot (dimensions are given in fractions of the foundation depth  $h$ ; the models are shown in different scales) [19]

Необходимо отметить, что при таких значениях модуля деформации грунта  $E_o$  и модуля упругости бетона  $E_b$  реальное отношение этих величин равно  $32\ 500/34 = 956 = 10^{2.98} \approx 10^3$ , то есть  $n \approx 3$ . Именно при таком значении  $n$  выполнены все расчеты и именно этому значению  $n$  соответствуют все графики, приведенные ниже в статье (рис. 2–4).

### 3. Результаты и обсуждение / Results and discussion

В опубликованных ранее работах (в частности, в [18, 19] и других) авторами рассмотрены вопросы распределения напряжений в активной зоне одно-, двух- и трехщелевых фундаментов и влияния переменных расчетных параметров на процесс образования и развития областей пластических деформаций. Приведем результаты, не вошедшие в упомянутые выше работы и иллюстрирующие влияние различных переменных расчетных параметров на величину предельно допустимой нагрузки. Напомним, что величина предельно допустимой нагрузки определяется из условия смыкания пластических областей под фундаментом, а грунт основания считается однородным и изотропным.

На рис. 2 приведены графические зависимости вида  $q_{nd} = f(h/b)$ ;  $q_{nd} = f(2b/h)$  и  $q_{nd} = f(\xi_o)$ , построенные по результатам численных расчетов. Их анализ говорит о том, что для условий рассмотренных примеров увеличение отношения  $h/b$  влечет за собой увеличение предельной нагрузки по линейному закону; увеличение отношения  $2b/h$  приводит к снижению величины  $q_{nd}$  по логарифмическому закону, а увеличение численного значения коэффициента бокового давления вызывает рост предельной нагрузки по экспоненциальному закону.

На рис. 3 в качестве примера приведены кривые, описывающие функциональную зависимость относительной глубины развития пластических областей  $\Delta Z/h$  под подошвой двухщелевого фундамента от величины интенсивности внешней равномерно распределенной нагрузки. Анализ этих кривых показывает, что с точностью до 99 % они аппроксимируются полиномом второй степени. Чем больше величина приведенного давления связности и величина угла внутреннего трения слагающего грунта, тем медленнее происходит развитие пластических областей, что вполне естественно.

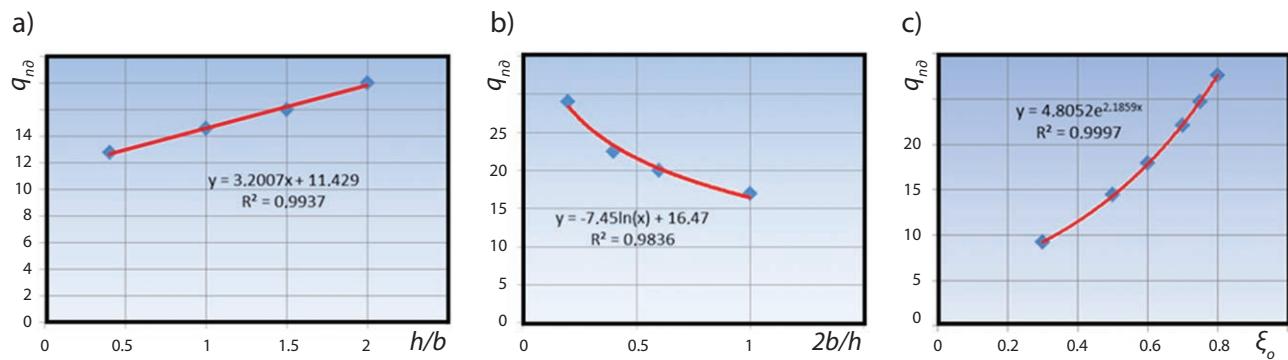


Рис. 2. Графики зависимости предельной нагрузки:  
a)  $q_{n0} = f(h/b)$ ; b)  $q_{n0} = f(2b/h)$ ; c)  $q_{n0} = f(\xi_0)$  (графики построены авторами)  
Fig. 2. Plots of the ultimate load dependence: a)  $q_{n0} = f(h/b)$ ;  
b)  $q_{n0} = f(2b/h)$ ; c)  $q_{n0} = f(\xi_0)$  (plots constructed by the authors)

При проведении вычислений нагрузка увеличивалась до момента смыкания областей пластических деформаций. Таким образом, координаты конечных точек этих кривых определяют величины предельно допустимой нагрузки и максимальную глубину развития пластических областей.

В качестве еще одного примера на рис. 4 изображены графические аппроксимации зависимости увеличения относительной высоты  $L/h$  областей пластических деформаций, зародившихся под краями щелевого фундамента и развивающихся вверх от его низа вдоль внешних сторон щелей, от величины интенсивности внешнего воздействия. Как и в предыдущем случае, полученные кривые с точностью почти в 100 % аппроксимируются полиномами второй степени.

Анализ результатов проведенных авторами расчетов и их графических аппроксимаций, часть которых приведена на рис. 2–4, позволяет утверждать, что применение компьютерной программы FEA [14], в которой формализован метод конечных элементов, позволяет не только анализировать процесс распределения напряжений в активной зоне щелевого фундамента, но и определять его несущую способность, рассматривая момент смыкания пластических областей под подошвой фундамента как критерий ее исчерпывания.

Для трехщелевого фундамента выполнены аналогичные расчеты, результаты которых качественно полностью совпадают с результатами расчетов для двухщелевого фундамента, что подтвердило предположение о возможности определения критических нагрузок исходя из степени развития пластических областей.

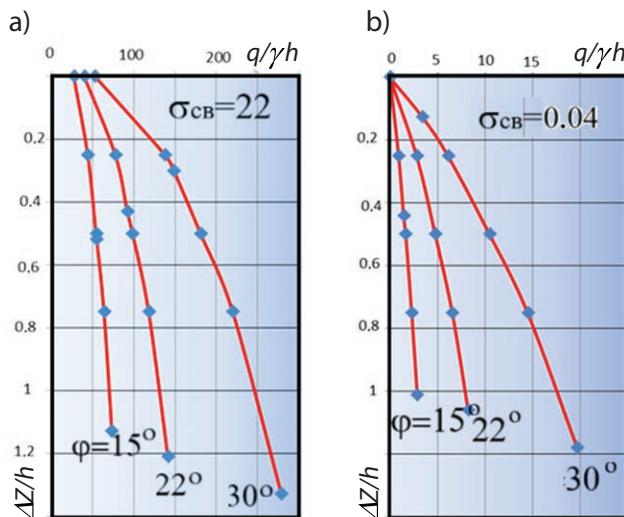


Рис. 3. Графические зависимости глубины развития пластических областей под подошвой двухщелевого фундамента от величины интенсивности равномерно распределенной нагрузки при  
a)  $\sigma_{cw} = 22$ ; b)  $\sigma_{cw} = 0.04$  (графики построены авторами)  
Fig. 3. Graphical dependencies of the depth of plastic zones development under the base of a two-slot foundation on the intensity of the uniformly distributed load at: a)  $\sigma_{cw} = 22$ ; b)  $\sigma_{cw} = 0.04$  (plots constructed by the authors)

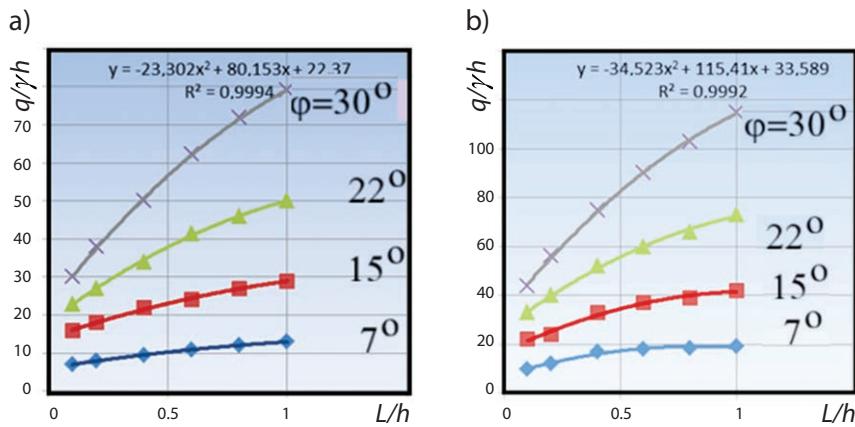


Рис. 4. Графики зависимости высоты областей пластических деформаций  $L$ , развивающихся от подошвы вверх по внешним плоскостям щелей, от величины внешней равномерно распределенной нагрузки при  $b/h = 0.625$  для а)  $\sigma_{c6} = 7$ ; б)  $\sigma_{c6} = 15$  (графики построены авторами)  
 Fig. 4. Plots of the dependence of the plastic deformation zones  $L$  height, developing from the base upwards along the external slot planes, on the magnitude of the external uniformly distributed bearing capacity at  $b/h = 0.625$  for а)  $\sigma_{c6} = 7$ ; б)  $\sigma_{c6} = 15$  (plots constructed by the authors)

По результатам расчетов для двух- и трехщелевых фундаментов построены графические зависимости вида  $q_{n\partial} = f(n)$  и  $\frac{10^3 S}{h} = f(n)$ , где  $n$  – показатель степени в выражении  $\frac{E_6}{E_0} = 10^n$ . Из рис. 5а видно, что зависимость  $q_{n\partial} = f(n)$  аппроксимируется прямой линейной зависимостью, а зависимость  $\frac{10^3 S}{h} = f(n)$  – экспонентой.

Главным выводом, который можно сделать на основании выполненных расчетов, является то, что трехщелевые фундаменты при всех прочих равных условиях не превосходят двухщелевые ни по несущей способности, ни по осадкам при условии, что мощность сжимаемой толщи в обоих случаях одинакова. Это четко видно из анализа графических аппроксимаций, представленных на рис. 5. Кроме того, трехщелевой фундамент при всех прочих равных условиях более материалоемок и трудозатратен.

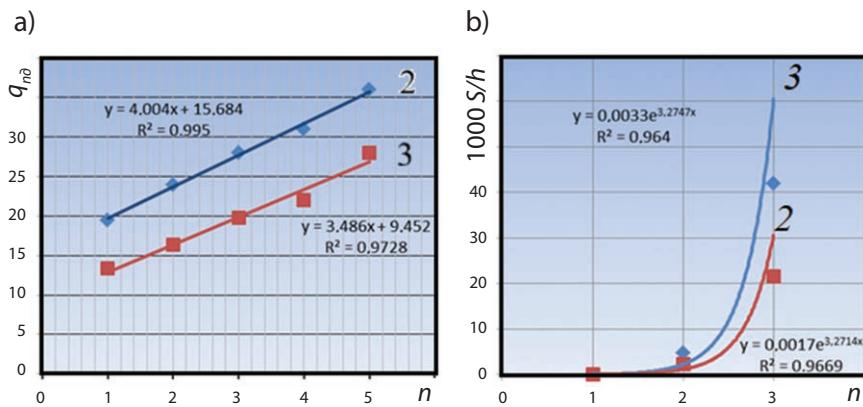


Рис. 5. Графические зависимости вида а)  $q_{n\partial} = f(n)$ ; б)  $\frac{10^3 S}{h} = f(n)$ , построенные для двух- (2) и трехщелевого (3) фундаментов (графики построены авторами)  
 Fig. 5. Graphical dependencies of the form а)  $q_{n\partial} = f(n)$ ;

б)  $\frac{10^3 S}{h} = f(n)$ , plotted for two-slot (2) and three-slot (3) foundations (plots constructed by the authors)

Для подтверждения достоверности получаемых авторами значений величины предельно допустимой нагрузки на основание двухщелевого фундамента выполнены расчеты по определению этой нагрузки при помощи методики, приводимой в СНиП 2.02.01-83<sup>2</sup> и СП 22.13330.2016<sup>3</sup>, с помощью метода, изложенного в работе Д. Н. Банникова [13] и при помощи компьютерной программы FEA [14].

Расчеты проведены для двухщелевого фундамента и однородного грунтового основания, параметры которых описаны выше, а глубина заложения фундамента последовательно принимала значения  $h = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$  м.

Так как метод [13], СНиП 2.02.01-83\* и СП 22.13330.2016 не предполагают использования в качестве переменного расчетного параметра коэффициент бокового давления грунта, все вычисления проведены при четырех его значениях  $\xi_o = 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ , которые входят в природный диапазон изменения значений этой величины [21, 22].

Численные значения величин интенсивности равномерно распределенной нагрузки, соответствующие моменту смыкания ОПД, которые строятся на основании условия пластичности Кулона [23, 24] (т. е. предельно допустимых нагрузок, полученных авторами при помощи компьютерной программы FEA [14]), и значения предельно допустимых нагрузок, рассчитанные авторами статьи по методике [13], приведены в таблице 1.

Для удобства анализа результатов вычислений по данным таблицы построены графические зависимости вида  $q_{n\theta} = f(h)$  (рис. 6). Результаты, полученные при расчете методом [13], на графике обозначены линией Б.

Совместный анализ результатов вычислений и графических зависимостей, приведенных на рис. 6, показал, что величина предельной нагрузки на основание щелевых фундаментов линейно зависит от глубины их заложения. После реализации сил трения и сцепления по внешним поверхностям стенок фундамента происходит реализация этих сил по некоторой части внутренних поверхностей. После этого несущая способность основания исчерпывается и фундамент «проваливается». Выпор связного грунта основания выше дневной поверхности маловероятен. Возможен внутренний

Таблица 1. Значения предельно допустимых нагрузок  
Table 1. Values of allowable ultimate loads

| $h, \text{м}$ | Величина интенсивности предельной нагрузки на основание $q_{n\theta}, \text{кПа}$ |                                     |                               |               |               | $\Delta, \%$  |              |
|---------------|---|-------------------------------------|-------------------------------|---------------|---------------|---------------|--------------|
|               | Метод [13]  | СНиП 2.02.01-83* и СП 22.13330.2016 | При помощи программы FEA [14] |               |               |               |              |
|               |   |                                     | $\xi_o = 0.5$                 | $\xi_o = 0.6$ | $\xi_o = 0.7$ | $\xi_o = 0.8$ |              |
| 0.5           | 676.60  | 615.98                              | 437.04                        | 524.80        | 617.40        | 739.88        | 8.55(16.75)  |
| 1.0           | 805.86  | 711.94                              | 524.88                        | 686.16        | 844.20        | 1 062.53      | 24.16(33)    |
| 1.5           | 935.30  | 807.90                              | 627.12                        | 835.20        | 1 085.40      | 1 440.61      | 35.08(44)    |
| 2.0           | 1071.4  | 903.86                              | 721.80                        | 992.52        | 1 332.15      | 1 838.12      | 41.63(50.83) |

<sup>2</sup> СНиП 2.02.01-83\*. Основания зданий и сооружений: утверждены постановлением Государственного комитета СССР по делам строительства от 5 декабря 1983 г. № 311; введены в действие 01.01.1985. URL: <https://docs.cntd.ru/document/5200033?marker> (дата обращения: 05.06.2025).

<sup>3</sup> СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений = Soil bases of buildings and structures. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83\*: утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 16 декабря 2016 г. N 970/пр и введен в действие с 17 июня 2017 г. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054206> (дата обращения: 05.06.2025).

выпор, о чем свидетельствует существенное развитие областей пластических деформаций в стороны от фундамента.

Совместный анализ графиков, приведенных на рис. 2–6, и данных, приведенных в таблице, позволяет сделать ряд выводов.

1. Зависимости вида  $q_{n\partial} = f(h)$  для всех рассмотренных способов определения величины предельной нагрузки и величины коэффициента бокового давления грунта носят линейный характер.
2. Величина коэффициента бокового давления грунта оказывает существенное влияние на величину предельной нагрузки. Увеличение численного значения  $\xi_o$  от 0.5 до 0.8 влечет за собой увеличение предельной нагрузки для фундамента глубиной заложения  $h = 0.5$  м на 41%; при  $h = 1$  м – на 51%; при  $h = 1.5$  м – на 56% и при  $h = 2$  м – на 61% при всех прочих равных условиях, рассматриваемых в настоящей работе.
3. Геометрические параметры фундамента также оказывают влияние на величину предельно допустимой нагрузки: увеличение отношения  $h/b$  влечет за собой увеличение предельной нагрузки по линейному закону, а увеличение отношения  $2b/h$ , напротив, снижает величину  $q_{n\partial}$  по логарифмическому закону.
4. Величина предельно допустимой нагрузки для двухщелевого фундамента приблизительно на 30% больше соответствующей нагрузки для трехщелевого фундамента (рис. 5а).
5. Трехщелевой фундамент проигрывает двухщелевому и по величине осадок, что видно из рис. 5б, где приведены кривые зависимости вида  $\frac{10^3 S}{h} = f(n)$ , построенные для момента исчерпания несущей способности по внешним поверхностям щелей фундаментов. Расчеты показывают, что для условий рассмотренных примеров осадки трехщелевого фундамента на 21–48% больше осадки двухщелевого фундамента.
6. Численные значения предельной нагрузки, вычисленные при помощи компьютерной программы FEA [14], могут быть как больше, так и меньше значений, полученных на основе СНиП 2.02.01-83\*, СП 22.13330.2016 и метода, описанного в работе [13]. Более того, из рис. 6 видно, что значения предельной нагрузки, вычисленные при помощи СП при  $h = 0.5$  м и  $h = 1.25$  м с точностью равны соответствующим значениям нагрузки, вычисленным при помощи предлагаемой компьютерной программы [14], при  $\xi_o = 0.7$  и  $\xi_o = 0.6$  соответственно. Величина предельно допустимой нагрузки, вычисленная на основе предложений Д. Н. Банникова [13] (на рис. 6 обозначено буквой Б) при  $h = 0.75$  м с точностью совпадает с соответствующим значением, рассчитанным при помощи компьютерной программы [14] для величины коэффициента бокового давления грунта  $\xi_o = 0.7$ .
7. При помощи обратных расчетов в среде компьютерной программы [14] установлено, что численные значения предельной нагрузки, размещенные во втором и третьем столбцах таблицы (результаты программы FEA [14] и указанных выше СНиП и СП), соответствуют следующим значениям коэффициента бокового давления: при  $d = 0.5$  м  $\xi_o = 0.755$  и  $\xi_o = 0.695$ ; при  $d = 1.0$  м  $\xi_o = 0.683$  и  $\xi_o = 0.635$ ; при  $d = 1.5$  м  $\xi_o = 0.645$  и  $\xi_o = 0.59$ ; при  $d = 2.0$  м  $\xi_o = 0.633$  и  $\xi_o = 0.57$ .

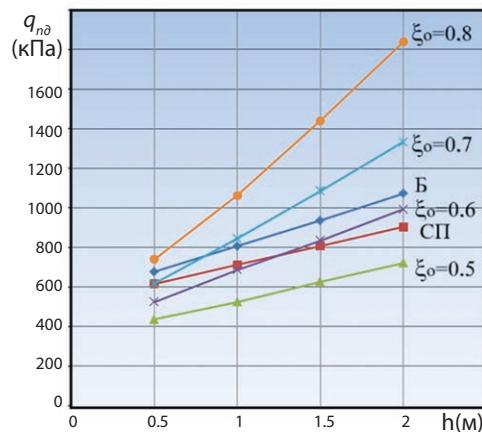


Рис. 6. Графические зависимости вида  $q_{n\partial} = f(h)$ , построенные для разных методов расчета (графики построены авторами)

Fig. 6. Graphical dependencies of  $q_{n\partial} = f(h)$  for various calculation methods (plots constructed by the authors)

Перейдя к средним значениям, получим, что результаты, получаемые по методике [13], соответствуют среднему значению коэффициента бокового давления  $\xi_o = 0.684$ , а по методике СНиП 2.02.01-83\* и СП22.13330.2016 –  $\xi_o = 0.623$ .

Отметим, что количественные оценки справедливы только для рассмотренных в работе примеров.

#### 4. Заключение / Conclusions

Результаты исследования указывают на то, что использование компьютерной программы FEA позволяет выявить влияние каждого из принятых переменных расчетных параметров на напряженное состояние активной зоны основания щелевого фундамента и учесть их совокупное влияние на величины критических нагрузок.

Расчетные значения предельно допустимой нагрузки на основание двухщелевого фундамента, получаемые по [13], СНиП 2.02.01-83\* и СП 22.13330.2016, соответствуют результатам, получаемым при помощи компьютерной программы FEA при определенных заданных значениях коэффициента бокового давления, то есть, по сути, являются частными решениями задачи об определении предельной нагрузки.

Установлено, что трехщелевые фундаменты при всех прочих равных условиях не превосходят двухщелевые ни по несущей способности, ни по осадкам. Кроме того, устройство трехщелевых фундаментов является более материалоемким и трудозатратным.

На основании вышеизложенного считаем возможным рекомендовать компьютерную программу FEA [14] для расчета оснований щелевых фундаментов по первой группе предельных состояний, сложенных связными грунтами, параметры которых оговорены в СНиП 2.02.01-83\* и СП 22.13330.2016.



**Вклад авторов.** Авторы внесли равный вклад в подготовку публикации.

**Author contribution.** All authors contributed equally to preparing the publication.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interest.** The authors declare no relevant conflict of interest.

#### Список литературы

1. Сорочан Е. А., Ковалев В. А. Расчет двухщелевых фундаментов мелкого заложения. *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2006;(1):11–14. URL: <https://ofmg.ru/index.php/ofmg/article/view/857>
2. Сорочан Е. А., Ревазишвили Р. Г. Исследование работы щелевых фундаментов. *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 1986;(5):12–15.
3. Сорочан Е. А., Быцутенко В. К., Ярутин В. К. Работа малозаглубленных щелевых фундаментов при сейсмических воздействиях. *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 1990;(3):15–17.
4. Павлов В. В. *Щелевые фундаменты*. Красноярск: Стройиздат; 1992. 139 с.
5. Зубков В. М., Перлей Е. М., Раюк В. Ф., Феоктистова Н. В. *Подземные сооружения, возводимые способом «стена в грунте»*. Ленинград: Стройиздат, Ленингр. отделение; 1977. 200 с. URL: <https://dwg.ru/lib/2900>
6. Платонова С. В. Напряженно-деформированное состояние ленточного щелевого фундамента. *Известия вузов. Строительство*. 2011;(1):3–9.
7. Платонова С. В. Исследование влияния заглубления щелевого фундамента на его осадки и напряженное состояние грунтового основания. *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии*. 2014;7(8):990–997.
8. Иванов А. А., Богомолов А. Н., Богомолова О. А., Нестратов М. Ю., Донсков Р. Е. Экспериментальное исследование процесса образования областей предельного состояния в основании щелевого фунда-

- мента на моделях из эквивалентного материала. *Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политехническая*. 2013;(2). URL: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/IvanonBogomolovBogomolovaNestratovDonskov-2013\\_2%2827%29.pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/IvanonBogomolovBogomolovaNestratovDonskov-2013_2%2827%29.pdf)
9. Богомолов А. Н., Бартоломей Л. А., Богомолова О. А. Расчет основания щелевого фундамента по первой группе предельных состояний. *Construction and Geotechnics*. 2025;16(2):26–36. <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2025.2.03>
10. Брандтль Х. Использование коробчатых фундаментов глубокого заложения для передачи больших нагрузок (мосты, электростанции, высотные здания). *Реконструкция городов и геотехническое строительство*. 2005;(9):100–117. URL: <http://georeconstruction.net/journals/09/files/09008.pdf>
11. Петров В. П. К вопросу использования щелевых фундаментов на естественном основании для малонагруженных зданий и сооружений. В сб.: *Геотехнические проблемы строительства крупномасштабных и уникальных объектов. Труды международной геотехнической конференции, посвященной Году РФ в КР, 23–25 сентября 2004 года, Алматы, Казахстан*. Алматы: Казахстанская геотехническая ассоциация; 2004. С. 366–368.
12. Уткин В. С., Борисова О. Л. Расчет надежности щелевого фундамента по критерию несущей способности грунта основания на стадии эксплуатации. *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2017;(6):7–17. <https://doi.org/10.18720/CUBS.57.1>
13. Банников Д. Н. Устойчивость и несущая способность основания ленточных мелкозаглубленных щелевых фундаментов. *Наука и техника*. 2003;(5):16–19. URL: <https://sat.bntu.by/jour/article/view/1639/1538>
14. Богомолов А. Н., Богомолова О. А., Редин А. В., Ушаков А. Н. FEA. Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015617889. 23 июля 2015 года. URL: [https://vgasu.ru/upload/files/patent/2015\\_sv2015617889.pdf](https://vgasu.ru/upload/files/patent/2015_sv2015617889.pdf)
15. Фадеев А. Б. *Метод конечных элементов в геомеханике*. Москва: Недра; 1987. 221 с. URL: <https://www.geokniga.org/books/16260>
16. Зенкевич О., Чанг И. *Метод конечных элементов в теории сооружений и механике сплошных сред*. Москва: Недра; 1974. 239 с. URL: <https://dwg.ru/dnl/1949>
17. Бартоломей Л. А., Богомолова О. А., Гейдт В. Д., Гейдт А. В. Назначение размеров расчетных схем при компьютерном моделировании напряженного состояния основания плитного фундамента на основе метода конечных элементов. *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2023;(2):5–17. URL: <https://vgasu.ru/nauka/zhurnaly/vestnik-volggasu/arkhiv-vypuskov/2023-2/1>
18. Богомолов А. Н., Ушаков А. Н., Богомолова О. А., Соловьев А. В., Прокопенко А. В., Калиновский С. А. Определение глубины развития областей пластических деформаций в однородном основании заглубленного ленточного фундамента на основе анализа напряженного состояния грунтового массива при помощи методов теории функций комплексного переменного. *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2013;(30):13–26. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20362995>
19. Богомолова О. А. Расчет несущей способности основания двухщелевого ленточного фундамента. *Construction and Geotechnics*. 2021;12(1):57–71. <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2021.1.05>
20. Каган А. А. *Расчетные показатели физико-механических свойств грунтов*. Ленинград: Стройиздат; 1973. 144 с. URL: <https://dwg.ru/lib/3053>
21. Месчян С. Р. *Начальная и длительная прочность глинистых грунтов*. Москва: Недра; 1978. 207 с. URL: <https://dwg.ru/lib/4159>
22. Вялов С. С. *Реологические основы механики грунтов*. Москва: Высшая школа; 1978. 447 с. URL: <https://dwg.ru/dnl/5735>
23. Coulomb C. A. Essai sur une application des règles des maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs, à la architecture. In: *Mémoires de mathématique et de physique*. Paris: De l'Imprimerie Royale; 1776. Vol. 7. P. 343–387.
24. Coulomb C. A. Application des règles des maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture. In: *Memories de savants étrangers de l'Academie des sciences de Paris*. Paris; 1773. 233 p.

#### References

1. Sorochan E. A., Kovalev V. A. Analysis of shallow double-slot foundations. *Soil Mechanics and Foundations Engineering*. 2006;43:13–17. <https://doi.org/10.1007/s11204-006-0016-4>

2. Sorochan E. A., Revazishvili R. G. Performance of slit foundations. *Soil Mechanics and Foundations Engineering*. 1986;23:185–190. <https://doi.org/10.1007/BF01711887>
3. Sorochan E. A., Bytsutenko O. V., Yarutin V. K. Performance of shallow slotted foundations subjected to seismic effects. *Soil Mechanics and Foundations Engineering*. 1990;27110–113. <https://doi.org/10.1007/BF02306667>
4. Pavlov V. V. *Slotted foundations*. Krasnoyarsk: Stroyizdat; 1992. 139 p. (In Russ.)
5. Zubkov V. M., Perley Ye. M., Rayuk V. F., Feoktistova N. V. *Underground structures constructed using the diaphragm wall method*. Leningrad: Stroyizdat, Leningr. otdeleniye; 1977. 200 p. (In Russ.) URL: <https://dwg.ru/lib/2900>
6. Platonova S. V. Stress-strain state of a strip slit foundation. *News of higher educational institutions. Construction*. 2011;(1):3–9. (In Russ.)
7. Platonova S. V. Investigation of the influence of penetration slit at its foundation rainfall and the stress state of subgrade. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2014;7(8):990–997.
8. Ivanov A. A., Bogomolov A. N., Bogomolova O. A., Nestratov M. Yu., Donskov R. E. Pilot study of formation process of limit state areas in the basis of the box-shaped foundation on the models made of the equivalent material. *Internet-Vestnik VolgGASU*. 2013;(2(27)). (In Russ.) URL: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/IvanonBogomolovBogomolovaNestratovDonskov-2013\\_2%2827%29.pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/IvanonBogomolovBogomolovaNestratovDonskov-2013_2%2827%29.pdf)
9. Bogomolov A. N., Bartolomey L. A., Bogomolova O. A. Calculation of the base of a slotted foundation according to the first group of limit states. *Construction and Geotechnics*. 2025;16(2):26–36. (In Russ.) <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2025.2.03>
10. Brandtl' X. Use of deep box foundations to transfer heavy loads (bridges, power plants, high-rise buildings). *Rekonstruktsiya gorodov i geotekhnicheskoye stroitel'stvo*. 2005;(9):100–117. (In Russ.) URL: <http://georeconstruction.net/journals/09/files/09008.pdf>
11. Petrov V. P. On the issue of using slot foundations on a natural base for low-load buildings and structures. In: *Geotechnical problem on construction of large-scale and unique projects. Proceedings of International Geotechnical Conference dedicated to the Year of Russia in Kazakhstan 23–25 September 2004, Almaty, Kazakhstan*. Almaty: Kazakhstan Geotechnical Society; 2004. P. 366–368. (In Russ.)
12. Utkin V. S., Borisova O. L. Calculation of the reliability of the slit foundation by the criterion of the bearing capacity of the foundation soil at the stage of operation. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2017;(6):7–17. <https://doi.org/10.18720/CUBS.57.1>
13. Bannikov D. N. Stability and Bearing Ability' of Base of Strip Shallow Slot Fill Foundation. *Science & Technique*. 2003;(5):16–19. (In Russ.)
14. Bogomolov A. N., Bogomolova O. A., Redin A. V., Ushakov A. N. FEA. Russian Federation. Certificate of state registration of computer software No. 2015617889. 23 July 2015. (In Russ.) URL: [https://vgasu.ru/upload/files/patent/2015\\_sv2015617889.pdf](https://vgasu.ru/upload/files/patent/2015_sv2015617889.pdf)
15. Fadeyev A. B. *Finite element method in geomechanics*. Moscow: Nedra; 1987. 221 p. (In Russ.) URL: <https://www.geokniga.org/books/16260>
16. Zenkevich O., Chang I. *Finite element method in the theory of structures and continuum mechanics*. Moscow: Nedra; 1974. 239 p. (In Russ.) URL: <https://dwg.ru/dnl/1949>
17. Bartolomey L. A., Bogomolova O. A., Geidt V. D., Geidt A. V. Assignment of the dimensions of the calculation schemes in computer simulation of the stress state of the plate foundation base based on the finite element method. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura*. 2023;(2):5–17. (In Russ.) URL: <https://vgasu.ru/nauka/zhurnaly/vestnik-volggasu/arkhiv-vypuskov/2023-2/1/>
18. Bogomolov A. N., Ushakov A. N., Bogomolova O. A., Solovev A. V., Prokopenko A. V., Kalinovskiy S. A. Depth determination of plastic deformation areas in homogeneous base of buried continuous footing on the base of the analysis of stress state of soil mass by complex variable method. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura*. 2013;(30):13–26. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20362995>
19. Bogomolova O. A. Calculation of the bearing capacity of a two-slot strip foundation. *Construction and Geotechnics*. 2021;12(1):57–71. (In Russ.) <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2021.1.05>
20. Kagan A. A. *Calculated indicators of physical and mechanical properties of soils*. Leningrad: Stroyizdat; 1973. 144 p. (In Russ.) URL: <https://dwg.ru/lib/3053>
21. Meschyan S. R. *Initial and long-term strength of clay soils*. Moscow: Nedra; 1978. 207 p. (In Russ.) URL: <https://dwg.ru/lib/4159>

22. Vyalov S. S. *Rheological principles of soil mechanics*. Moscow: Vysshaya shkola; 1978. 447 p. (In Russ.) URL: <https://dwg.ru/dnl/5735>
23. Coulomb C. A. *Essai sur une application des regles des maximis et minimis a quelques problemes de statique relatifs, a la architecture*. In: *Mémoires de mathématique et de physique*. Paris: De l'Imprimerie Royale; 1776. Vol. 7. P. 343–387. (In French)
24. Coulomb C. A. *Application des riles de maximus et minimis a quelques problemes de statique relatifs a L'architecture*. In: *Memories de savants strangers de L'Academie des sciences de Paris*. Paris; 1773. (In French)



### Информация об авторах

**Богомолова Оксана Александровна**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры математических и естественнонаучных дисциплин, Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Российская Федерация, boazaritcyn@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1163-6285>

**Богомолов Сергей Александрович**, канд. техн. наук, доцент кафедры испытаний сооружений, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация, bogomolovsa@mgsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5531-6163>

**Богомолов Никита Александрович**, студент, Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Российская Федерация, Волгоград, Российская Федерация, nik.bogomolov-34@yandex.ru

### Information about the authors

**Oksana A. Bogomolova**, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor in the Department of Mathematical and Natural Sciences, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation, boazaritcyn@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1163-6285>

**Sergey A. Bogomolov**, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor in the Department of Testing of Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation, bogomolovsa@mgsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5531-6163>

**Nikita A. Bogomolov**, Student, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation, nik.bogomolov-34@yandex.ru

Получена 15 сентября 2025 г., одобрена 05 ноября 2025 г., принята к публикации 30 ноября 2025 г.

Received 15 September 2025, Approved 05 November 2025, Accepted for publication 30 November 2025