

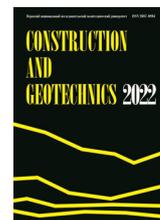


**пермский
политех**

CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 13, № 2, 2022

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2022.2.01

УДК 624.131

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСАДОК ЖЕСТКОГО ШТАМПА НА ОДНОРОДНОМ ВЕСОМОМ ОСНОВАНИИ

Л.А. Бартоломей¹, О.А. Богомолова², В.Д. Гейдт¹, А.В. Гейдт¹

¹Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

²Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 22 января 2022

Одобрена: 22 апреля 2022

Принята к публикации:

30 июня 2022

Ключевые слова:

осадки жесткого штампа, метод конечных элементов, расчетные параметры, модуль деформации, коэффициент Пуассона, графические зависимости, аппроксимации, условие пластичности Кулона.

АННОТАЦИЯ

Приведены результаты компьютерного моделирования процесса осадок жесткого штампа, в процессе которого учтены различные факторы, влияющие на деформируемость однородного основания. В результате установлено, что величина отношения модулей деформации материала фундамента и грунта существенно влияет на характер распределения вертикальных перемещений основания под подошвой штампа. Чем это отношение больше, тем равномернее его осадка. В первом приближении графическая зависимость $S/H = f(E_o/E_{\text{ш}})$ может быть аппроксимирована кусочно-линейной функцией. При $E_o/E_{\text{ш}} \leq 0,01$ эпюра вертикальных перемещений, построенная на оси симметрии штампа, приобретает некоторую нелинейность. Осадки штампа при всех прочих равных условиях существенным образом зависят от его ширины. Эта зависимость аппроксимирована полиномом второй степени, погрешность такой аппроксимации не превышает 5%. Зависимость осадки штампа от интенсивности внешней нагрузки оказалась линейной при всех численных значениях переменных расчетных параметров. Полученные результаты можно использовать при условии, что в каждом конкретном случае глубина развития пластических областей под краями фундамента, вычисленная на основании условия пластичности Кулона, не превышает одной четверти ширины фундамента. Все вычисления проведены при помощи компьютерной программы, имеющей государственную регистрацию, в которой формализован метод конечных элементов в упругой постановке. Размеры расчетной схемы и степень ее дискретизации выбираются таким образом, что дальнейшее их увеличение не оказывает влияния на величины напряжений и перемещений в точках расчетной схемы, расположенных в активной зоне фундамента. Расчетная схема разбита на 30 000 одинаковых треугольных элементов, сопряженных в 15 251 узлах, ширина матрицы жесткости системы – 206.

© ПНИПУ

© **Бартоломей Леонид Адольфович** – доктор технических наук, профессор, e-mail: vd.geidt@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-8092-6476

Богомолова Оксана Александровна – кандидат технических наук, доцент, e-mail: boazaritcyn@mail.ru, ORCID: 0000-0003-1163-6285

Гейдт Владимир Давидович – кандидат технических наук, доцент, e-mail: vd.geidt@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-6006-5218

Гейдт Андрей Владимирович – аспирант, e-mail: andrejgeydt@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2649-6927

Leonid A. Bartolomey – Doctor of Technical Science, Professor, e-mail: vd.geidt@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-8092-6476

Oksana A. Bogomolova – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: boazaritcyn@mail.ru, ORCID: 0000-0003-1163-6285

Vladimir D. Geidt – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: vd.geidt@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-6006-5218

Andrei V. Geidt – Postgraduate Student, e-mail: vd.geidt@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-2649-6927

COMPUTER SIMULATION OF RIGID PLATE SETTLEMENT ON A HOMOGENEOUS WEIGHT BASE

L.A. Bartolomey¹, O.A. Bogomolova², V.D. Geidt¹, A.V. Geidt¹

¹Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

²Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 22 January 2022

Approved: 22 April 2022

Accepted for publication:

30 June 2022

Keywords:

hard die upsetting, finite element method, design parameters, deformation modulus, Poisson's ratio, graphic dependences, approximations, Coulomb's plasticity condition.

ABSTRACT

The paper presents the results of computer simulation of the process of hard stamp upsetting, during which various factors affecting the deformability of a homogeneous base are taken into account. As a result, it was found that the value of the ratio of the deformation moduli of the foundation material and soil significantly affects the nature of the distribution of vertical displacements of the base under the sole of the stamp. The larger this ratio, the more uniform its settlement. In the first approximation, the graphical dependence $S/H = f(E_0/E_w)$ can be approximated by a piecewise linear function. At $E_0/E_w \leq 0,01$ the diagram of vertical displacements, built on the axis of symmetry of the stamp, acquires some non-linearity. Draft of the stamp, all other things being equal, significantly depend on its width. This dependence is approximated by a polynomial of the second degree; the error of such an approximation does not exceed 5 %. The dependence of the die settling on the intensity of the external load turned out to be linear for all numerical values of the variable design parameters. The results obtained can be used provided that in each specific case the depth of development of plastic regions under the edges of the foundation, calculated on the basis of the Coulomb plasticity condition, does not exceed one quarter of the width of the foundation. All calculations were carried out using a state-registered computer program that formalizes the finite element method in an elastic formulation. The dimensions of the design scheme and the degree of its discretization are chosen in such a way that their further increase does not affect the magnitude of stresses and displacements at the points of the design scheme located in the active zone of the foundation. The design scheme is divided into 30 000 identical triangular elements conjugated at 15 251 nodes, the width of the system stiffness matrix is – 206.

© PNRPU

Введение

Существенные статические нагрузки от инженерных сооружений обуславливают возникновение дополнительных напряжений в грунтовом массиве основания, что определяет его деформации и, как следствие, вертикальные и горизонтальные перемещения и крены сооружения.

Существует и в настоящее время широко применяются, большое количество методов расчета осадок: Ф. Шлейхера [1] – для бесконечного полупространства, находящегося под действием прямоугольной загруженной площадки, метод послойного суммирования Н.Н. Маслова, Н.А. Цытовича, С.Б. Ухова [2–4], метод эквивалентного слоя [3], метод линейно-деформируемого слоя К.Е. Егорова [5; 6] и др.

Базой практически для всех методов является решение Ж.В. Буссинеска [7; 8] задачи о распределении напряжений в упругом полупространстве от действия вертикальной сосредоточенной силы на граничной горизонтальной плоскости (рис. 1, а), при этом расчетная схема сводится к схемам, приведенным на рис. 1, б, в.

Анализ формул для вычисления осадок говорит о том, что они учитывают вес слоя грунта, расположенного выше подошвы фундамента (обратной засыпки), вертикальные напряжения σ_z , возникающие от нагрузки, действующей на фундамент, модули деформации E и коэффициенты Пуассона ν (бокового давления ξ) грунта основания и материала

фундамента, форму и размер фундамента, которые входят в том числе и в выражение для гибкости последнего, записываемое следующим образом [9]:

$$t = \frac{(1 - \vartheta_1^2)}{(1 - \vartheta_0^2)} \cdot \frac{\pi E_0 b l^3}{4 E_1 J}, \quad (1)$$

где $\vartheta_1, \vartheta_0, E_1, E_0$ – соответственно коэффициенты Пуассона и модули деформации материала сваи и грунта основания; b и l – соответственно ширина фундамента и его полудлина; J – момент инерции поперечного сечения фундамента.

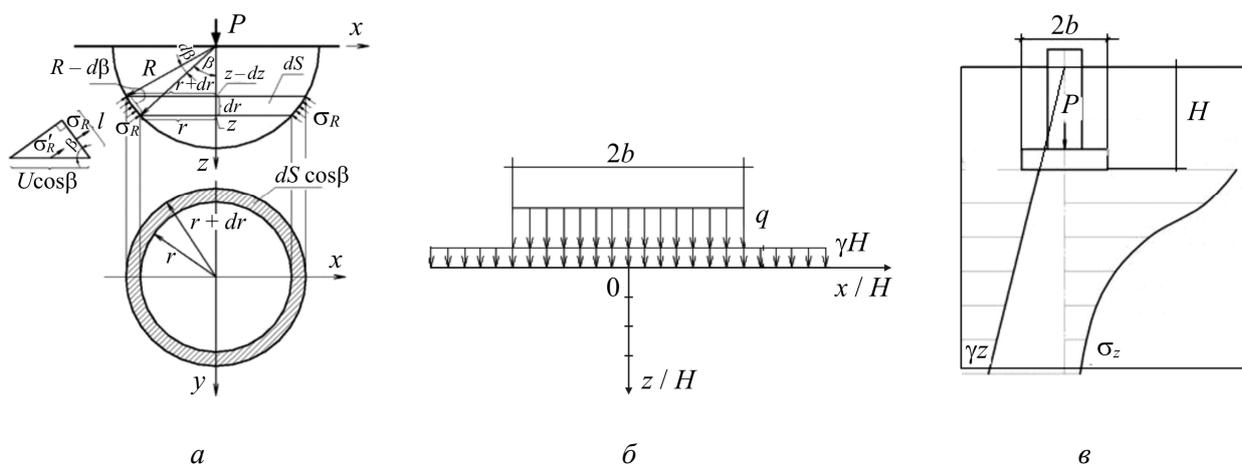


Рис. 1. Расчетная схема к задаче Буссинеска (а), имитация заглубленного прямоугольного фундамента (б) и эпюры вертикальных напряжений σ_z от собственного веса грунта и внешней нагрузки для определения величины сжимаемой толщи (в)

Fig. 1. Calculation scheme for the Boussinesq problem (a), simulation of a buried rectangular foundation (b) and diagrams of vertical stresses σ_z from the own weight of the soil and external load to determine the value of the compressible thickness (v)

В то же время грунт ниже подошвы фундамента считается невесомым, наличие грунта засыпки имитируется вертикальной равномерно распределенной нагрузкой интенсивности γH (см. рис. 1, б), учет жесткости фундамента значительно затрудняют расчеты в связи с большим количеством параметров в формуле (1) и, наконец, нет возможности непосредственно учитывать перераспределение давлений на основание и выравнивание осадок за счет жесткости надфундаментного строения (рис. 2), которые целесообразно учитывать в совместном расчете системы «здание (сооружение) – фундамент – основание» [10].

Факт перераспределения давления (напряжений) за счет жесткости надфундаментной части сооружения наглядно иллюстрируется результатами исследования моделей оснований фундаментов, выполненных из оптически активных материалов, поляризационно-оптическим методом [11], которые приведены на рис. 2.

В настоящей работе приводятся некоторые результаты численного исследования зависимости осадок жесткого штампа, нагруженного равномерно распределенной нагрузкой, являющегося начальным этапом работы по выявлению общих закономерностей осадок жесткого фундамента и надфундаментной конструкции как единого целого.

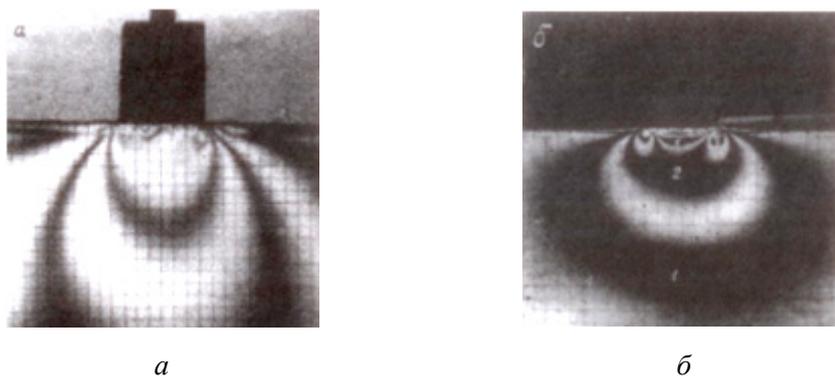


Рис. 2. Картины изохром, характеризующие распределение напряжений в моделях основания из оптически активного материала под жестким (а) и гибким (б) штампами (цитируется по работе [10])

Fig. 2. Isochrome patterns characterizing the distribution of stresses in base models made of optically active material under (a) rigid and (b) flexible dies (cited from [10])

Компьютерное моделирование

Параметры моделирования

При проведении компьютерного моделирования осадок будем использовать компьютерную программу [12], в которой для определения напряжений и перемещений формализован метод конечных элементов (МКЭ), реализующий линейно-упругую модель грунтовой среды.

На рис. 3 изображен фрагмент расчетной схемы МКЭ, которая ввиду симметричности ленточного или плитного фундамента включает в себя лишь его половину. При расчете задаются тривиальные граничные условия: узлам, расположенным на вертикальных границах расчетной схемы (РС), запрещены горизонтальные перемещения, а вертикальные не ограничены. Узлам, расположенным на нижней горизонтальной границе РС, напротив, запрещены вертикальные перемещения, а горизонтальные не ограничены; нижние угловые узлы РС неподвижны. По контакту «штамп – основание» принято условие полного прилипания грунта. Считается, что толщина штампа равна глубине его заложения.

Размеры расчетной схемы и степень ее дискретизации выбираются таким образом, что дальнейшее их увеличение не оказывает влияние на величины напряжений и перемещений в точках РС, расположенных в активной зоне фундамента. В нашем случае расчетная схема разбита на 30 000 одинаковых треугольных элементов, сопряженных в 15 251 узлах, ширина матрицы жесткости системы – 206.

Расчетная схема составлена таким образом, что за условную единицу измерения длины принята глубина заложения фундамента H , т.е. все геометрические размеры РС выражены в ее долях. За условную единицу объемной силы принят объемный вес грунта γ_0 и величина интенсивности внешней нагрузки задается в долях $\gamma_0 H$. Результаты расчетов при этом, в частности значения напряжений и перемещений, будут измеряться в безразмерных долях $\gamma_0 H$ и H соответственно, что весьма удобно при анализе этих результатов.

Перейдем теперь к определению переменных расчетных параметров и диапазонам их изменения.

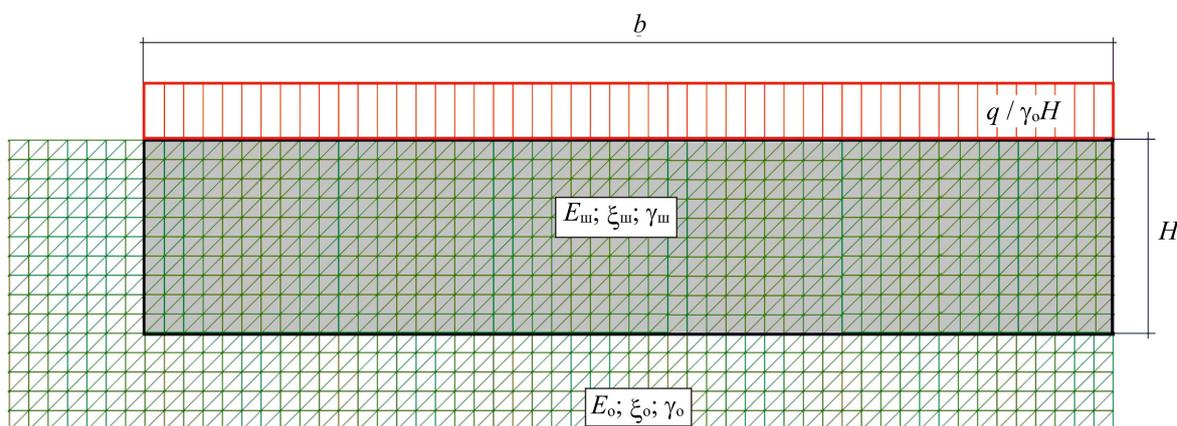


Рис. 3. Фрагмент схемы МКЭ для расчета осадок штампа
 Fig. 3. Fragment of the FEM scheme for calculating the plate settlement

Из формулы (1) следует, что

$$\frac{E_1}{E_0} = \frac{(1 - \vartheta_0^2)}{(1 - \vartheta_1^2)} \cdot \frac{\pi b l^3}{4J} \cdot t^{-1} = k t^{-1}, \quad (2)$$

где k – некоторый безразмерный коэффициент, причем, $k > 0$, так как $\vartheta_1 \leq \vartheta_0 < 1$ [13; 14]. Из этого соотношения следует, что $\vartheta_1 / \vartheta_0 < 1$. Учитывая, что для бетона $\vartheta_1 = 0,2$ [14], а среднее значение коэффициента бокового давления для глинистых грунтов $\xi_0 = 0,75$ [15], то используя известное соотношение между ξ_0 и ϑ_0 , получим, что величина $\vartheta_0 = 0,43$, а среднее значение отношения $\vartheta_1 / \vartheta_0 = 0,47$. Такая величина отношения $\vartheta_1 / \vartheta_0$ не оказывает сколько-нибудь заметного влияния на значения напряжений, а значит, и перемещений в точках активной зоны фундамента [16].

Учитывая выражение (2), можно утверждать, что при моделировании осадок ленточного и плитного фундаментов в качестве одного из параметров можно использовать величину отношения модулей деформации материала фундамента и грунта основания $\frac{E_1}{E_0}$.

Так как величины k и t индивидуальны для каждого фундамента и соответствующих грунтовых условий и величина их отношения может изменяться в широком диапазоне, то при проведении компьютерного моделирования диапазон изменения величины $\frac{E_1}{E_0}$ тоже

должен быть достаточно широк. Причем $\frac{E_1}{E_0} \geq 1$ – жесткость фундамента не может быть меньше жесткости основания. Условие $\frac{E_1}{E_0} = 1$ означает, что нагрузка приложена непосредственно к поверхности грунта основания (фундамент как таковой отсутствует).

Кроме отношения $\frac{E_1}{E_0}$ на величину осадок плитного фундамента будут оказывать влияние величина отношения ширины фундамента к его толщине (в нашем случае глубине

заложения) $\frac{2b}{H}$ и величина интенсивности внешней нагрузки, которая задается в безразмерных единицах $q(\gamma_0 H)^{-1}$. При дальнейшем изложении материала величину E_1 будем обозначать $E_{шт}$.

Для того чтобы наверняка охватить весь диапазон изменения вышеперечисленных параметров, при проведении компьютерного моделирования, принято, что им последовательно присваиваются следующие значения: $\frac{E_{шт}}{E_0} = 1; 5; 10; 20; 50$, $\frac{2b}{H} = 2; 4; 10; 20$

и $q(\gamma_0 H)^{-1} = 0; 3; 12; 20$.

Таким образом, выполнено 240 вычислительных операций, результаты которых приводятся ниже.

Под осадкой штампа будем понимать вертикальное перемещение точки «0» подошвы штампа, лежащей на вертикальной оси симметрии фундамента (см. рис. 1, б).

Анализ результатов компьютерного моделирования

Влияние величины отношения $E_{шт} / E_0$ на осадки штампа при фиксированных значениях параметров $2b / H$ и $q / \gamma_0 H$

На рис. 4 изображены картины изолиний вертикальных перемещений (осадок) в однородном основании под жестким штампом шириной $2b / H = 10$ и $q / \gamma_0 H = 12$ при величинах отношения модулей деформации материалов основания и штампа $E_{шт} / E_0 = 1,0; 10; 100; 1000$, а на рис. 5 – эпюры этих перемещений (осадок), построенные при тех же условиях на вертикальной оси, проходящих через середину штампа.

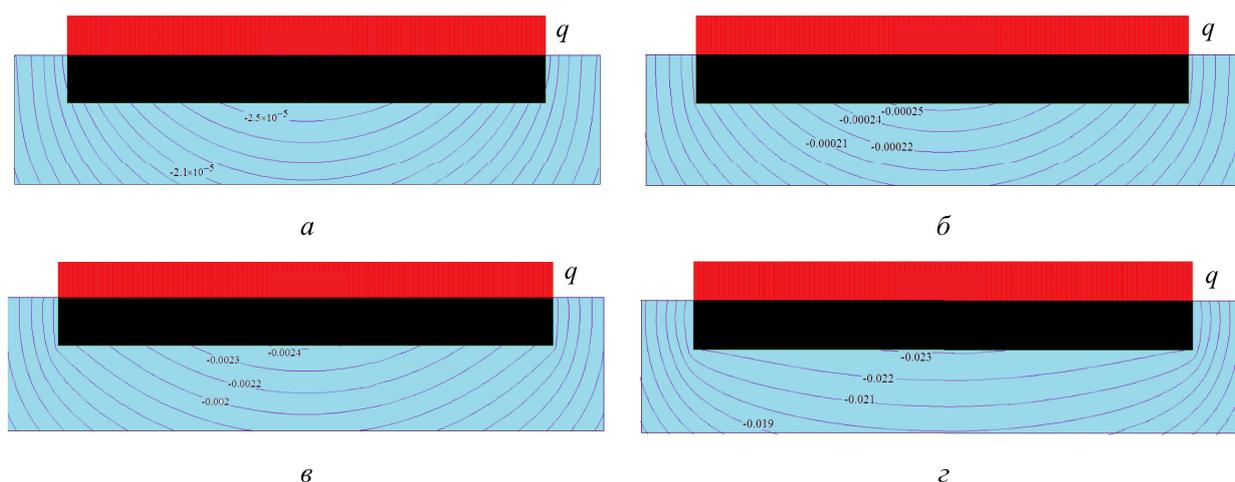


Рис. 4. Изолинии вертикальных перемещений (осадок) в однородном основании под жестким штампом шириной $2b / H = 10$ и $q / \gamma_0 H = 12$ при величинах отношения модулей деформации материалов основания и штампа $E_{шт} / E_0 = 1,0; 10; 100; 1000$ – а, б, в, г соответственно

Fig. 4. Isolines of vertical displacements (settlement) in a homogeneous base under a rigid stamp with a width of $2b / H = 10$ and $q / \gamma_0 H = 12$ at the values of the ratio of the deformation moduli of the base materials and the stamp $E_{шт} / E_0 = 1,0; 10; 100; 1000$ – а, б, в, г respectively

Анализ изображений на рис. 4 показывает, что с ростом численного значения величины отношения $E_{\text{шт}} / E_o$ кривизна изолиний перемещений уменьшается, происходит постепенное выравнивание осадок под подошвой фундамента. Чем больше $E_{\text{шт}} / E_o$, тем равномернее осадки штампа, а их численные значения увеличиваются пропорционально росту численного значения этого отношения. Заметим, что данное обстоятельство отмечено и автором работы [10].

Анализ эпюр осадок, построенных на вертикальной оси симметрии фундамента, говорит о том, что изменение численных значений перемещений по глубине происходит по линейному закону, однако при $E_{\text{шт}} / E_o = 1000$ даже визуально можно заметить некоторую кривизну образующей линии эпюры.

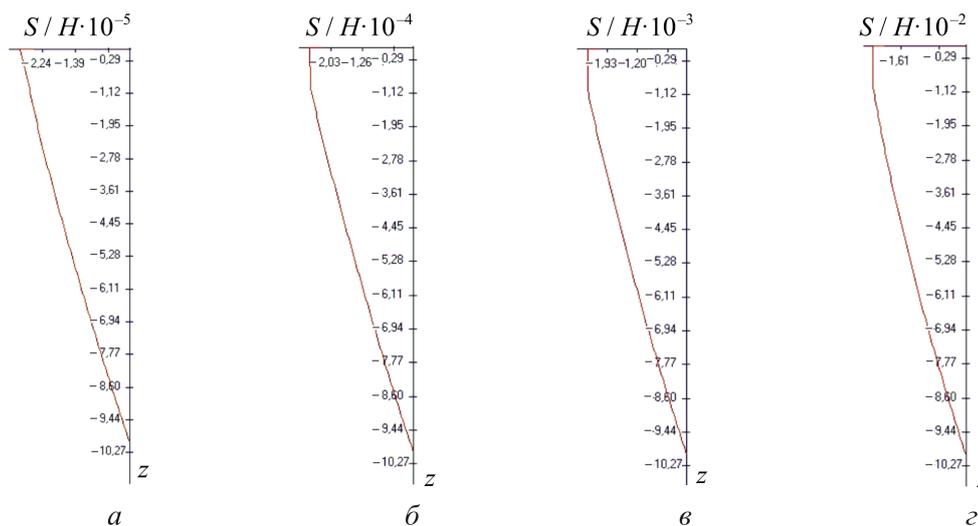


Рис. 5. Эпюры вертикальных перемещений (осадок) в однородном основании под жестким штампом шириной $2b / H = 10$ и $q / \gamma_o H = 12$ при величинах отношения модулей деформации материалов основания и штампа; 1000 – а, б, в, г соответственно, построенные на вертикальной оси, проходящих через середину штампа

Fig. 5. Diagrams of vertical displacements (settlement) in a homogeneous base under a rigid stamp with a width of $2b / H = 10$ and $q / \gamma_o H = 12$ at the values of the ratio of the moduli of deformation of the materials of the base and the stamp; 1000 – а, б, в, г respectively, built on a vertical axis passing through the middle of the stamp

На рис. 6 изображены графические зависимости вида $S / H = f(E_o / E_{\text{шт}})$ при различных значениях величины интенсивности равномерно распределенной нагрузки $q / \gamma_o H$, приложенной к поверхности штампа, и фиксированных значениях величины отношения ширины штампа к глубине заложения (толщине) $2b / H$.

Нам представляется, что в первом приближении возможна линейная аппроксимация зависимостей вида $S / H = f(E_o / E_{\text{шт}})$ на отрезках $E_o / E_{\text{шт}} \in [0,001-0,01]$ и $E_o / E_{\text{шт}} \in [0,01-0,05]$. Таким образом, все графические аппроксимации можно представить в виде кусочно-линейных функций, имеющих перелом в точках с абсциссой $E_o / E_{\text{шт}} \approx 0,01$. Однако из рис. 6, д, е, где приведены результаты построения этих графических зависимостей в оболочках MathCad и Excel, видно, что на отрезке $E_o / E_{\text{шт}} \in [0,01-0,05]$ явно наблюдается нелинейность. Поэтому при проведении дальнейших исследований необходимо провести оценку погрешности такой аппроксимации и в случае необходимости предложить другой ее вид.

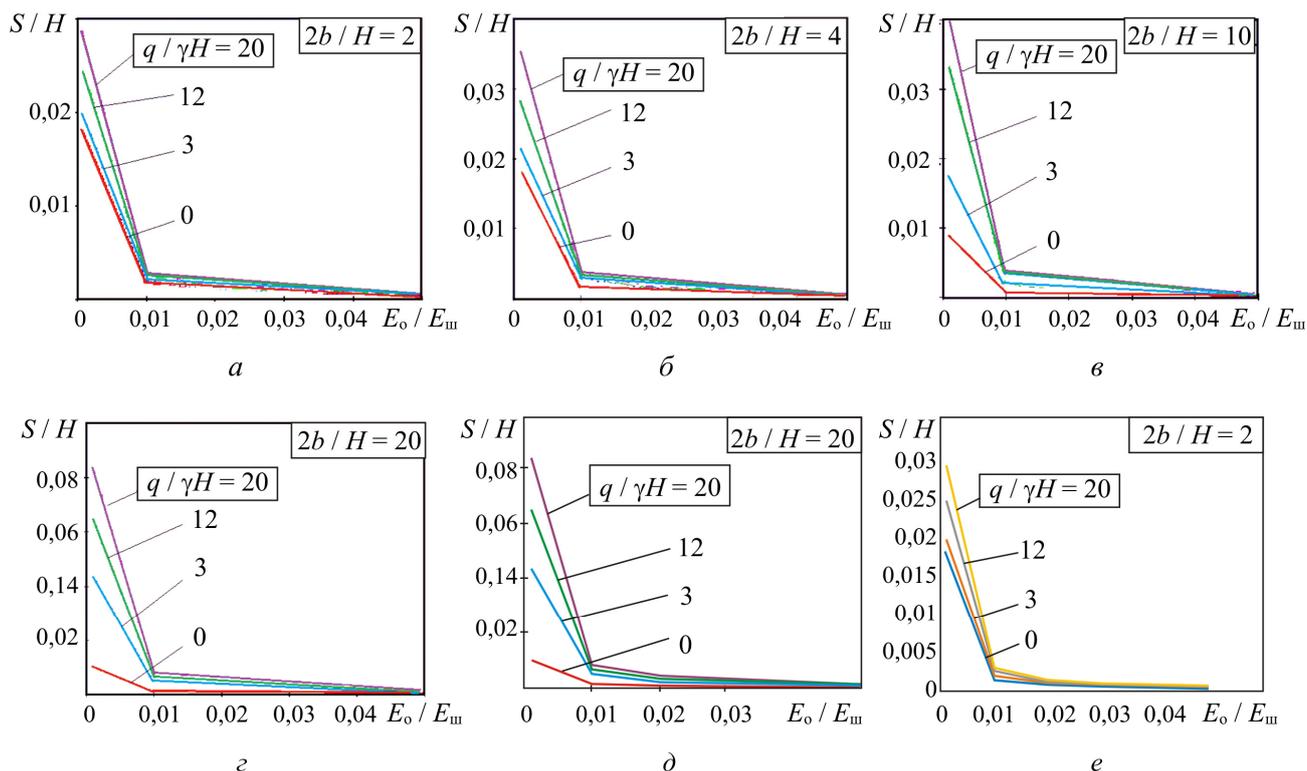


Рис. 6. Графические зависимости вида $S / H = f(E_o / E_m)$ при различных значениях величины $q / \gamma_o H$ (равные 0, 3, 12), и фиксированных значениях величины отношения ширины штампа к глубине заложения ($2b / H$) (a–z); графические аппроксимации тех же зависимостей в оболочках MathCad и Excel (д, е)

Fig. 6. Graphic dependences of the form $S / H = f(E_o / E_m)$ for different values of $q / \gamma_o H$ (to 0, 3, 12), and fixed values of the ratio of the width of the stamp to the depth of placement ($2b / H$) (a–z); graphical approximations of the same dependencies in MathCad and Excel shells (д, е)

Зависимость осадок штампа от его ширины

Как видно из рис. 7, зависимость осадки штампа от его ширины имеет весьма сложный характер, и ее не просто анализировать. На первом этапе проведена аппроксимация этих зависимостей полиномом второй степени, пример такой аппроксимации приведен на рис. 7, д. Установлено, что погрешность такой аппроксимации не превышает 5%. Отметим, что попытка аппроксимации графической зависимости $S / H = f(2b / H)$ линейной либо кусочно-линейной функцией дают весьма существенную ошибку аппроксимации (более 50%).

Зависимость осадок штампа от интенсивности нагрузки

Данные зависимости, как и следовало ожидать, являются линейными при всех численных значениях переменных расчетных параметров, рассмотренных в настоящей работе.

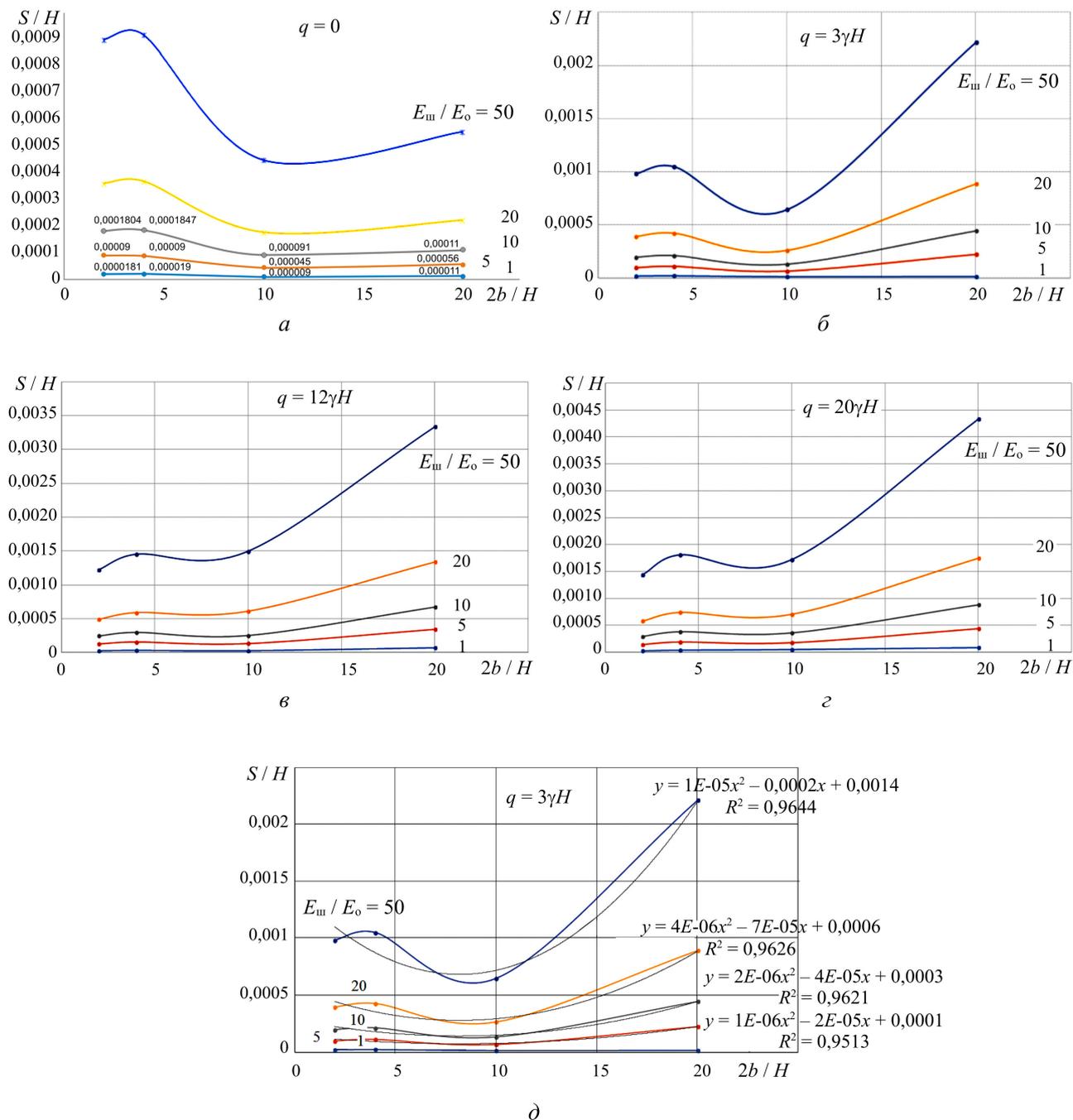


Рис. 7. Графические зависимости вида $S/H = f(2b/H)$ при различных значениях величины (E_{III}/E_0) (равные 1, 5, 10, 20, 50) и фиксированных значениях интенсивности внешней равномерно распределенной вертикальной нагрузки $q = n\gamma H$, приложенной к штампу (а–г); пример полиномиальной аппроксимации (δ)

Fig. 7. Graphical dependencies of the form $S/H = f(2b/H)$ for different values of the quantity (E_{III}/E_0) (to 1, 5, 10, 20, 50) and fixed values of the intensity of the external uniformly distributed vertical load $q = n\gamma H$ applied to the stamp (a–г); polynomial approximation example (δ)

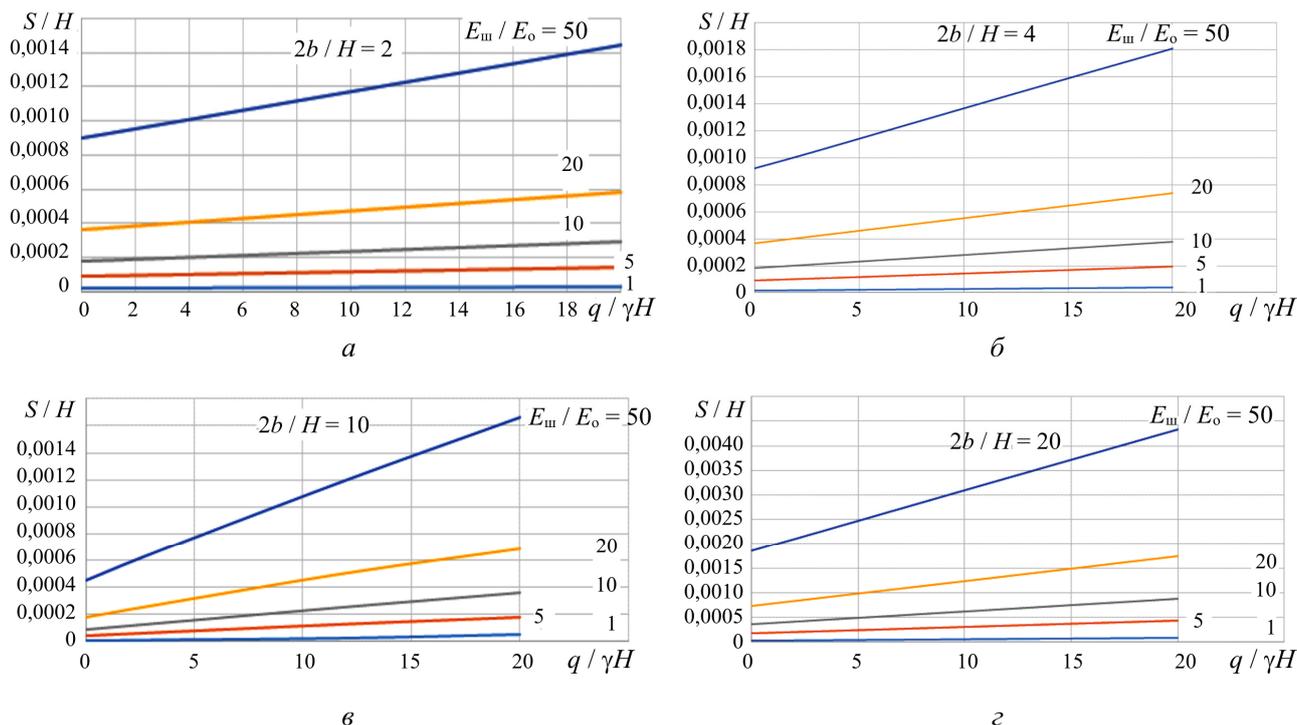


Рис. 8. Графические зависимости вида $S/H = f(q/\gamma H)$ при различных значениях величины отношения модулей деформации материалов штампа и основания (E_m/E_0) (равные 1, 5, 10, 20, 50) и фиксированных значениях величины отношения ширины штампа к глубине заложения: а – $2b/H = 2$, б – $2b/H = 4$, в – $2b/H = 10$, г – $2b/H = 20$

Fig. 8. Graphical dependences of the form $S/H = f(q/\gamma H)$ at different values of the ratio of the deformation moduli of the stamp and base materials (E_m/E_0) (to 1, 5, 10, 20, 50) and fixed values of the ratio of the width of the stamp to the insertion depth: а – $2b/H = 2$, б – $2b/H = 4$, в – $2b/H = 10$, г – $2b/H = 20$

Возможность использования полученных результатов

Графические аппроксимации полученных зависимостей могут быть использованы для предварительной оценки осадки ленточных и плитных фундаментов. Применяя различные интерполяционные методы и последовательно переходя от одной пары переменных расчетных параметров к другой, можно получить значение упругой осадки фундамента при условии, что его размеры и упругие свойства его материала соответствуют параметрам моделирования.

На рис. 9 приведены изображения областей пластических деформаций, построенных на основании условия пластичности Кулона [18], в однородном основании жесткого штампа при различных значениях отношения модулей деформации материалов основания и штампа (см. рис. 9, а–в). Здесь же изображена графическая зависимость относительной глубины развития областей пластических деформаций под краями штампа единичной толщины и относительной ширины $2b/H = 10$ при интенсивности внешнего воздействия $q/\gamma_0 H = 3$ от величины отношения E_0/E_m в однородном основании, сложенном суглинком ($c = 47$ кПа, $\varphi = 26^\circ$, $E_0 = 39$ МПа, $\nu = 0,28$) (г).

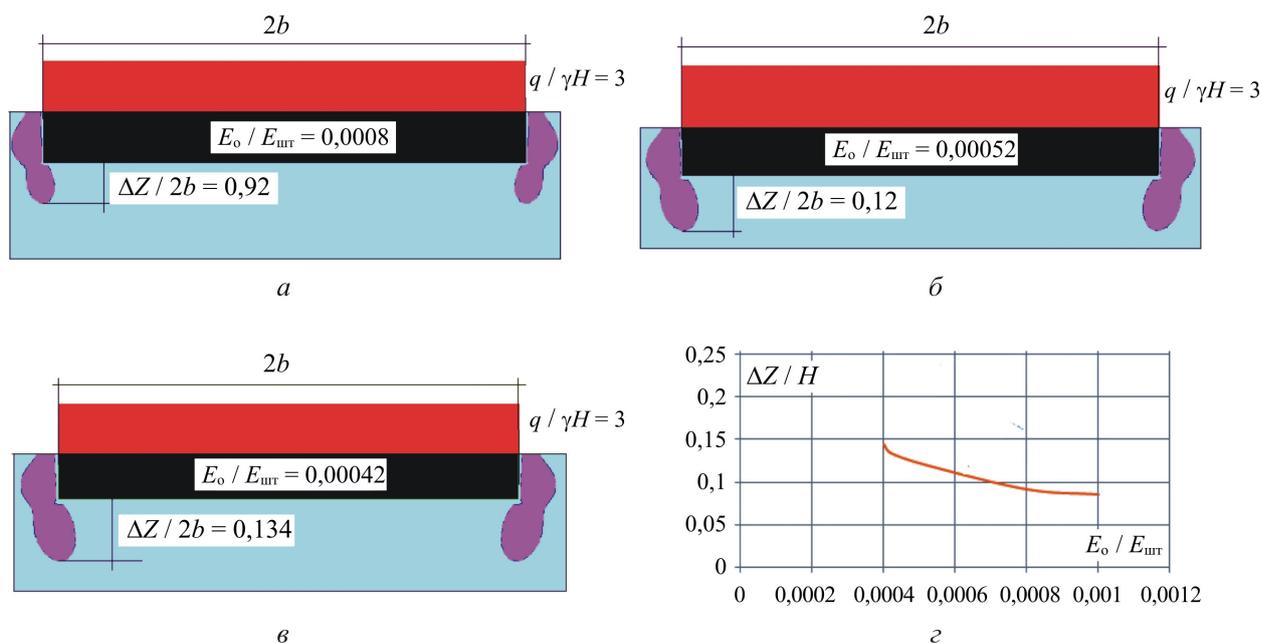


Рис. 9. Области пластических деформаций, построенные на основании условия пластичности Кулона, в однородном основании жесткого штампа при различных значениях отношения модулей деформации материалов основания и штампа (а–в); г – зависимость относительной глубины развития областей пластических деформаций под краями штампа единичной толщины ($H = 1$) и относительной ширины $2b / H = 10$ при интенсивности внешнего воздействия $q / \gamma_o H = 3$ от величины отношения $E_o / E_{шт}$ в однородном основании, сложенном суглинком ($c = 47$ кПа, $\varphi = 26^\circ$, $E_o = 39$ МПа, $\nu = 0,28$)

Fig. 9. Areas of plastic deformations, built on the basis of the Coulomb plasticity condition, in a homogeneous base of a rigid stamp at different values of the ratio of the deformation moduli of the materials of the base and stamp (a–в); г – dependence of the relative depth of development of areas of plastic deformations under the edges of a stamp of unit thickness ($H = 1$) and relative width $2b / H = 10$ at the intensity of external action $q / \gamma_o H = 3$ on the value of the ratio $E_o / E_{шт}$ in a homogeneous base composed of loam ($c = 47$ kPa, $\varphi = 26^\circ$, $E_o = 39$ MPa, $\nu = 0,28$)

Для обоснования возможности использования «упругих» осадок для дальнейших расчетов, необходимо для каждого конкретного варианта расчета (конкретных величин q , c , φ , E_o , ν , $2b / H$) построить графическую зависимость вида $\Delta Z / H = f(E_o / E_{шт})$. Если глубина развития пластических деформаций окажется меньше четверти ширины фундамента ($\Delta Z < 0,5b$), то полученный результат можно считать достоверным [19].

Выводы

В процессе компьютерного моделирования процесса осадок плитного фундамента рассмотрено влияние различных факторов на деформируемость однородного основания.

Установлено:

1. Величина отношения модулей деформации материала фундамента и грунта существенно влияет на характер распределения вертикальных перемещений основания под подошвой фундамента. Чем это отношение больше, тем равномернее осадка фундамента. В первом приближении графическая зависимость $S / H = f(E_o / E_{шт})$ может быть аппроксимирована кусочно-линейной функцией. При $E_o / E_{шт} \leq 0,01$ эпюра верти-

кальных перемещений, построенная на оси симметрии штампа, приобретает некоторую нелинейность.

2. Осадки штампа при всех прочих равных условиях существенным образом зависят от его ширины. На начальном этапе исследования эта зависимость аппроксимирована полиномом второй степени, погрешность такой аппроксимации не превышает 5 %.

3. Зависимость осадки штампа от интенсивности внешней нагрузки оказалась линейной при всех численных значениях переменных расчетных параметров.

4. Полученные результаты можно использовать при условии, что в каждом конкретном случае глубина развития пластических областей под краями фундамента, вычисленная на основании условия пластичности Кулона, не превышает одной четверти ширины фундамента.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Библиографический список

1. Schleicher F. Zur Theorie des Baugundes. – Der Bauingenieur. Berlin, 1926. – Н. 48–49.
2. Маслов Н.Н. Длительная устойчивость и деформации смещения подпорных сооружений. – М.: Энергия, 1968.
3. Цытович Н.А. Механика грунтов. – М.: Высшая школа, 1983. – 228 с.
4. Механика грунтов, основания и фундаменты / С.Б. Ухов, В.В. Семенов, В.В. Знаменский [и др.]. – М.: Высшая школа, 2007. – 566 с.
5. Егоров К.Е. К вопросу о деформации основания конечной толщины // Механика грунтов: сб. тр. НИИОСП. – № 34. – М.: Госстройиздат, 1958.
6. Егоров К.Е. К вопросу расчета основания под фундаментом с подошвой кольцевой формы // Механика грунтов: сб. тр. НИИОСП. – № 34. – М.: Госстройиздат, 1958.
7. Boussinesq J. Applications der potentiels a l'etude de l'equilibre et du mouvements de Solidos, elastiques. – Paris, 1885.
8. Boussinesq J. Essai sur la theorie des eaux courantes. – Paris, 1877. – 680 с.
9. Основания, фундаменты и подземные сооружения. Справочник проектировщика / М.И. Горбунов-Посадов, В.А. Ильичев, В.И. Крутов и др.; под общ. ред. Е.А. Сорочана и Ю.Г. Трофименкова. – М.: Стройиздат, 1985. – 480 с.
10. Кушнер С.Г. Расчет деформаций оснований зданий и сооружений. – Запорожье, 2008. – 496 с.
11. Александров А.Я., Ахметзянов М.Х. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела. – М.: Наука, 1973. – 576 с.
12. ФЕА: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015617889 / О.А. Богомоллова и др. Зарегистрировано 23 июля 2015 г.
13. Каган А.А. Расчетные показатели физико-механических свойств грунтов. – Ленинград: Стройиздат, 1973. – 144 с.
14. СНиП 2.02.01.-83. Бетонные и железобетонные конструкции / Госстрой СССР. – М.: Стройиздат, 1985.
15. Месчан С.Р. Начальная и длительная прочность глинистых грунтов. – М.: Недра, 1978. – 207 с.

16. Амусин Б.З., Фадеев А.Б. Метод конечных элементов при решении задач горной геомеханики. – М.: Недра, 1975. – 144 с.
17. Сопоставление результатов расчета несущей способности двухслойного основания заглубленного ленточного фундамента различными способами / О.А. Богомолова, А.И. Вайнгольц, О.В. Ермаков [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2014. – № 2. – С. 106–116.
18. Coulomb C. Application des riles de maximus et minimis a quelques problemes de statique relatifs a L`architecture // *Memories de savants strangers de L`Academlie des sciences de Paris*. – 1773. – 233 p.
19. Флорин В.А. Основы механики грунтов. – Л.: Госстройиздат, 1959. – Т. I. – 360 с.

References

1. Schleicher F. Zur Theorie des Baugundes. *Der Bauingenieur*. Berlin, 1926, pp. 48-49.
2. Maslov N.N. Long-Term Stability and Displacement Deformations of Sub-Portal Structures. Moscow, Energiya, 1968.
3. Tsytovich N.A. Soil mechanics. Moscow, High School, 228 p.
4. Ukhov S.B. et al. Soil mechanics, bases and foundations. Moscow, High School, 2007, 566 p.
5. Egorov K.E. To the finite thickness base deformation. *Collection of NIIOSP Works*, no. 34, Soil Mechanics. Moscow, Gosstrojizdat, 1958.
6. Egorov K.E. To the calculation of foundations under foundations with circular form footing. *Collection of NIIOSP Proceedings*, no. 34, Soil Mechanics. Moscow, Gosstrojizdat, 1958.
7. Boussinesq J. Applications der potentiels a l'etude de l'equilibre et du mouvements de Solidos, elastiques. Paris, 1885.
8. Boussinesq J. Essai sur la theorie des eaux courantes. Paris, 1877, 680 p.
9. Gorbunov-Posadov M.I., Ilyichev V.A., Krutov V.I. et al. Bases, foundations and underground structures. Eds. E.A. Sorochan, Yu.G. Trofimenkov. Moscow, Stroyizdat, 1985, 480 p.
10. Kushner S.G. Calculation of deformations of foundations of buildings and structures. Zaporizhia, 2008, 496 p.
11. Alexandrov A.Y., Akhmetzyanov M.Kh. Polarization-optical methods of mechanics of deformable bodies. Moscow, Nauka, 1973, 576 p.
12. O.A. Bogomolova et al. FEA: certificate of state registration of computer program. No. 2015617889 (2015).
13. Kagan A.A. Calculated indicators of physical and mechanical properties of soils. Leningrad, Stroyizdat, 1973, 144 p.
14. SNiP 2.02.01.-83. Concrete and Concrete Structures / USSR Gosstroi. Moscow: Stroyizdat, 1985.
15. Meschyan S.R. Initial and long-term strength of clay soils. Moscow, Nedra, 1978, 207 p.
16. Amusin B.Z., Fadeev A.B. Finite Element Method for solving problems of mining geomechanics. Moscow, Nedra, 1975, 144 p.
17. Bogomolova O.A. et al. Comparison of results of calculation of carrying capacity of two-layered foundation of the buried tape foundation by different methods. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Construction and architecture*, 2014, no. 2, pp. 106-116.
18. Coulomb C. Application des riles de maximus et minimis a quelques problemes de statique relatifs a L`architecture. *Memories de savants strangers de L`Academie des sciences de Paris*, 1773, 233 p.
19. Florin V.A. Fundamentals of soil mechanics. Leningrad, Gosstroyizdat, 1959, vol. I, 360 p.