

РАСЧЕТ ОСАДОК ПРОТЯЖЕННОГО ПЛИТНОГО ФУНДАМЕНТА КОНЕЧНОЙ ЖЕСТКОСТИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

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

¹ Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

² Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

CALCULATION OF SETTLEMENT OF AN EXTENDED SLAB FOUNDATION OF FINITE STIFFNESS BASED ON COMPUTER MODELLING DATA

Leonid A. Bartolomey¹, Oksana A. Bogomolova², Larisa V. Geidt¹, Andrei V. Geidt¹

¹ Industrial University of Tyumen, Russia

² Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

Аннотация. Построена база данных, с помощью которой на начальной стадии проектирования можно оценить величину осадки протяженного плитного фундамента конечной жесткости, используя лишь интерполяционные методы, без привлечения мощных вычислительных устройств. Для получения результата использована компьютерная программа FEA, в которой формализован метод конечных элементов. Максимальные горизонтальный и вертикальный размеры расчетных схем в исследовании составляют $25H_3 \cdot 46H_3$; расчетная схема состоит из 57 500 конечных элементов в форме прямоугольных равнобедренных треугольников, сопряженных в 29 106 узлах, ширина матрицы жесткости системы линейных уравнений равна 466. Это позволило исключить влияние тривиальных граничных

Abstract. The paper presents a database for estimation the magnitude of the settlement of an extended slab foundation of finite stiffness in the initial phase of projecting. The offered solution uses only interpolation methods without involving powerful computing devices. The computer program FEA, which formalises the finite element method, was used to obtain the result. The maximum horizontal and vertical dimensions of the computational schemes were $25H_3 \cdot 46H_3$. The computational scheme consisted of 57 500 finite elements in the form of right isosceles triangles conjugated at 29 106 nodes. The width of the stiffness matrix of the linear equation system was 466. This made it possible to eliminate the influence of trivial boundary conditions on the results. 560 computational operations were performed. It corresponded to

условий на результаты вычислений. Выполнено 560 вычислительных операций, что соответствует числу возможных сочетаний численных значений переменных расчетных параметров, принятых при компьютерном моделировании процесса осадки плитного фундамента. В результате вычислений составлена таблица коэффициентов аппроксимирующих выражений для кривых, построенных по результатам найденных зависимостей осадок плитного фундамента от переменных расчетных параметров. Проведен расчет осадок двух протяженных плитных фундаментам различной ширины, при котором использована построенная база данных и интерполяционные методы. Контрольный расчет, выполненный при помощи FEA, показал, что величины контрольных осадок отличаются на 13.45 и 22.08 % от соответствующих значений осадок, полученных при помощи предложенных таблиц и метода линейной интерполяции. Сделан вывод о возможности использования полученной базы данных для проведения предварительных (оценочных) расчетов осадок протяженных плитных фундаментам.

Ключевые слова: осадка фундамента, протяженный плитный фундамент конечной жесткости, метод конечных элементов, прочностные и деформационные свойства грунта, модуль упругости и коэффициент Пуассона бетона, коэффициенты аппроксимирующих выражений, интерполяционные методы

Для цитирования: Расчет осадок протяженного плитного фундамента конечной жесткости на основе данных компьютерного моделирования / Л. А. Бартоломей, О. А. Богомолова, Л. В. Гейдт, А. В. Гейдт. – DOI 10.31660/2782-232X-2023-3-33-47. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2023. – № 3 (105). – С. 33–47.

For citation: Bartolomey, L. A., Bogomolova, O. A., Geidt, L. V., & Geidt, A. V. (2023). Calculation of settlement of an extended slab foundation of finite stiffness based on computer modelling data. *Architecture, Construction, Transport*, (3(105)), pp. 33-47. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2023-3-33-47.

Введение

Существует процедура, предшествующая расчету оснований по второй группе предель-

the number of possible combinations of numerical values of the variables calculated parameters adopted in computer modelling of process of the slab foundation settlement. As an upshot of the computations, the authors made a table of coefficients of approximating expressions for the curves constructed from the results of the calculated dependences of slab foundation settlement on the variable design parameters. The article provides a calculation of settlements of two extended slab foundations of different widths, using a constructed database and interpolation methods. The control calculation in the FEA showed the difference between the values of the control settlements and the values obtained using the proposed tables and the linear interpolation method for 13.45 and 22.08 %. Summing up the results, the offered database can be used for preliminary (estimation) calculations of extended slab foundations settlements.

Key words: foundation settlement, extended slab foundation of finite stiffness, finite element method, strength and deformation properties of soil, modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete, coefficients of approximating expressions, interpolation methods

ных состояний (по деформациям), которая состоит в определении величины их расчетного сопротивления R . Если нагрузка на основание

не превосходит этой величины, то расчет осадок можно вести в упругой постановке, согласно [1], СП 22.13330.2016¹.

Величина расчетного сопротивления R должна соответствовать выполнению условия, при котором глубина развития пластических областей, образующихся под краями фундамента, не должна превышать четверти его ширины, то есть $\Delta z \leq b / 4$. Исходя из этого условия, величина расчетного сопротивления вычисляется по формуле:

$$R = \frac{\pi(0.25\gamma b + \gamma h + c \cdot ctg\varphi)}{ctg\varphi + \varphi - \pi / 2} + \gamma h. \quad (1)$$

Анализируя формулу (1), отмечаем, что в ее транскрипцию не входят такие важные величины, как коэффициент Пуассона ν (коэффициент бокового давления ξ_0), модуль упругости E материала фундамента и модуль деформации E_0 грунтового основания, гибкость (жесткость) фундамента, величина отношения глубины заложения фундамента H к его ширине b и так далее, которые оказывают существенное влияние на напряженное состояние активной зоны фундамента и процесс образования и развития пластических областей [2, 3]. Возможно, именно из-за этого величины расчетного сопротивления основания, вычисляемые по формуле (1), оказываются сильно завышенными, о чем свидетельствуют результаты исследований [4–6]. Отметим, что в числитель формулы (1) входит величина ширины фундамента b . Как отмечено в работах [7, 8], при увеличении b происходит необоснованный рост величины расчетного сопротивления.

Все вышесказанное можно в полном объеме отнести и к величине предельно допустимой P_{nd} или, что одно и то же, второй критической на-

грузке $P_{кр}^2$, формула для определения которой приводится в работах Л. Прандтля [9] и Х. Рейснера [10]:

$$P_{кр}^2 = P_{nd} = (q + c \cdot ctg\varphi) \frac{(1 + \sin\varphi)}{(1 - \sin\varphi)} \cdot e^{\pi ctg\varphi} - c \cdot ctg\varphi. \quad (2)$$

Анализ теоретических [11–13] и экспериментальных [14–16] исследований говорит о том, что численные значения критических нагрузок, получаемых при использовании формул (1) и (2), являются существенно завышенными.

Резонно предположить, что существенное превышение вычисленных при помощи формулы (1) значений расчетного сопротивления R над фактическим его значением приводит к ситуации, когда действительные осадки фундаментов оказываются значительно больше их расчетных значений [17].

Ранее нами введено понятие «обобщенных прочностных параметров грунта основания $\sigma_{св}^{R*}$ и $\sigma_{св}^R$ » [18]. В данной статье в виде графиков, формул и таблиц приведены результаты вычислений для определения параметров $\sigma_{св}^{R*}$ и $\sigma_{св}^R$, численные значения которых позволяют судить, можно ли в том или ином случае вести расчет осадок плитного фундамента в упруго-линейной постановке. Расчеты выполнены как с учетом жесткости надфундаментной части сооружения ($\sigma_{св}^{R*}$), так и без него ($\sigma_{св}^R$). Предположим, что слабый грунт основания закреплен, определены его улучшенные физико-механические характеристики и величина приведенного давления связности $\sigma_{св} = c(\gamma_0 H ctg\varphi)^{-1}$. Если будут выполняться неравенства $\sigma_{св} \geq \sigma_{св}^{R*}$ или $\sigma_{св} \geq \sigma_{св}^R$, то силовые эквиваленты внешнего воздействия (q и H^*) не превышают величины рас-

¹ Основания зданий и сооружений = Soil bases of buildings and structure : СП 22.13330.2016 : утверждены приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 16 декабря 2016 г. № 970/пр. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054206> (дата обращения: 03.09.2023).

четного сопротивления и расчет осадок основания можно проводить в линейной постановке.

В настоящей статье приведены результаты вычисления осадок плитного фундамента конечной жесткости, под которыми подразумеваем вертикальные перемещения точек расположенной в месте пересечения вертикальной оси симметрии фундамента и его подошвы. При проведении вычислений приняты следующие значения переменных расчетных параметров: отношение модуля упругости материала фундамента и модуля деформации грунта равны $\frac{E}{E_0} = 1; 5; 10; 20; 50; 100; 1000$; величина отношения

ширины фундамента к глубине его заложения $\frac{2b}{H_3} = 2; 4; 6; 10; 20$, что охватывает весь возможный диапазон их изменения при расчете реальных объектов.

Численное значение коэффициента бокового давления материала фундамента принято постоянным и равным $\xi_0 = 0.2$, а численные значения этого коэффициента для грунта были равны $\xi_0 = 0.15; 0.28; 0.5; 0.6$. Проведено 560 вычислительных операций, в результате которых получены безразмерные (в долях H_3) значения вертикальных перемещений. Здесь же приведены основные результаты анализа влияния численных значений переменных расчетных параметров на величину осадок.

Если $\frac{E}{E_0} = 1$, то равномерно распределенная нагрузка приложена непосредственно к поверхности грунта (гибкий фундамент).

Целью настоящей работы является получение базы данных, с помощью которой можно на начальной стадии проектирования быстро и без привлечения мощных вычислительных устройств оценить величину осадки плитного фундамента конечной жесткости.

Объект и методы исследования

Объектом исследования выступает однородное и модифицированное (квазиоднородное) основание протяженного плитного фундамента.

Метод исследования – многофакторный численный (на основе метода конечных элементов (МКЭ)) анализ напряженно-деформированного состояния и осадок плитного фундамента конечной жесткости.

Результаты

Для определения осадок фундаментов использована компьютерная программа [19], в которой реализован метод конечных элементов [20].

Если расчетная схема МКЭ абсолютно симметрична относительно вертикальной оси (как в нашем случае), то при численном моделировании можно рассматривать лишь одну ее половину [21] (рис. 1).

Отметим, что максимальные размеры расчетных схем, которые использованы при проведении исследования, равны $25H_3 \cdot 46H_3$ (горизонтальный и вертикальный размеры). В этом случае расчетная схема состоит из 57 500 конечных элементов в форме прямоугольных равнобедренных треугольников, сопряженных в 29 106 узлах, а ширина матрицы жесткости системы линейных

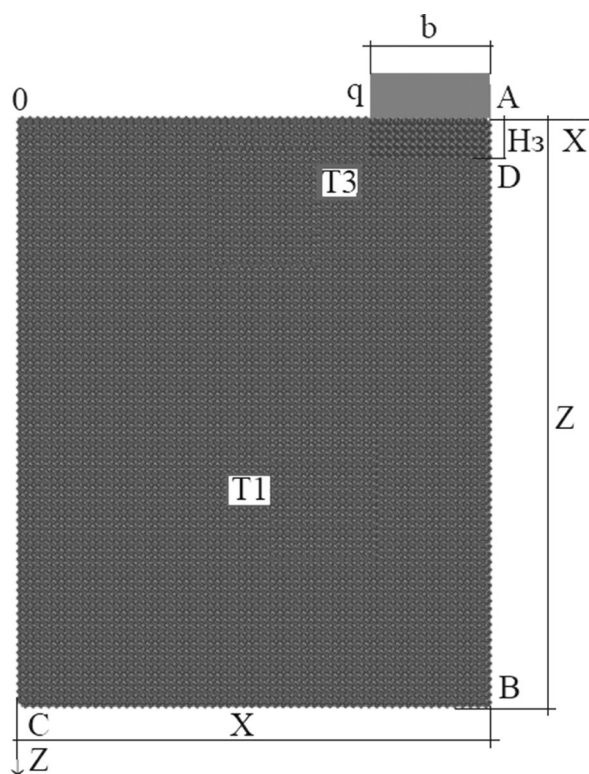


Рис. 1. Расчетная схема метода конечных элементов
Fig. 1. The calculation scheme of the finite element method

уравнений равна 466. Такие линейные размеры расчетных схем практически исключают влияние тривиальных граничных условий на результаты вычислений [22].

В связи с тем, что объем статьи ограничен, в качестве примера приведена одна из четырех составленных нами таблиц (таблица 1), в каждой из которых содержится 140 численных значений

Таблица 1
Table 1

Значения безразмерных осадок протяженного плитного фундамента
Values of the dimensionless settlements of extended slab foundations

$2b/H_3 = 2; q/\gamma H_3 = 3; S/H_3$							
$\xi_0 \backslash E/E_0$	1	5	10	20	50	100	1000
0.15	0.000090	0.000448	0.000891	0.004468	0.004468	0.008936	0.089178
0.38	0.000075	0.000370	0.000741	0.001479	0.003699	0.007395	0.073842
0.5	0.000063	0.000314	0.000627	0.001254	0.003133	0.006267	0.062656
0.6	0.000052	0.000261	0.000521	0.001042	0.002604	0.005207	0.051945
$2b/H_3 = 4; q/\gamma H_3 = 3; S/H_3$							
$\xi_0 \backslash E/E_0$	1	5	10	20	50	100	1000
0.15	0.000092	0.000460	0.000919	0.001836	0.004576	0.009146	0.091179
0.38	0.000077	0.000382	0.000762	0.001522	0.003800	0.0075930	0.075699
0.5	0.000065	0.000325	0.000648	0.001294	0.003230	0.006454	0.064597
0.6	0.000054	0.000271	0.000541	0.001080	0.002695	0.005484	0.053667
$2b/H_3 = 6; q/\gamma H_3 = 3; S/H_3$							
$\xi_0 \backslash E/E_0$	1	5	10	20	50	100	1000
0.15	0.000089	0.000444	0.000889	0.001778	0.004437	0.008874	0.088624
0.38	0.000073	0.000392	0.000781	0.001559	0.003888	0.007760	0.0772700
0.5	0.000062	0.000307	0.000615	0.001231	0.003078	0.006157	0.061592
0.6	0.000051	0.000254	0.000508	0.001016	0.002541	0.005084	0.050774
$2b/H_3 = 10; q/\gamma H_3 = 3; S/H_3$							
$\xi_0 \backslash E/E_0$	1	5	10	20	50	100	1000
0.15	0.000097	0.000486	0.000971	0.001938	0.004823	0.009626	0.095500
0.38	0.000081	0.000406	0.000810	0.001617	0.004033	0.008047	0.079645
0.5	0.000070	0.000347	0.000693	0.001384	0.003449	0.006875	0.068170
0.6	0.000059	0.000292	0.000583	0.001163	0.002900	0.005777	0.056809
$2b/H_3 = 20; q/\gamma H_3 = 3; S/H_3$							
$\xi_0 \backslash E/E_0$	1	5	10	20	50	100	1000
0.15	0.000103	0.000512	0.001022	0.002040	0.005081	0.010147	0,100495
0.38	0.000086	0.000428	0.000854	0.001706	0.004262	0.008510	0.084077
0.5	0.000073	0.000367	0.000732	0.001425	0.003653	0.007295	0.071874
0.6	0.000062	0.000309	0.000617	0.001239	0.003080	0.006156	0.060278

безразмерных (в долях H_3) вертикальных перемещений S .

Анализ результатов. Используя данные таблиц и интерполяционные методы, можно для любого возможного сочетания численных значений переменных расчетных параметров, которые ограничены рамками, оговоренными выше, определить вертикальные перемещения (осадки) протяженных плитных фундаментов.

Кроме того, эти данные позволили провести анализ влияния численных значений переменных расчетных параметров на величину осадок плитного фундамента. Такими параметрами, как говорилось выше, являются: интенсивность внешнего воздействия ($q/\gamma H_3$), отношение шири-

ны фундамента к глубине его заложения ($2b/H$), отношение модуля упругости материала фундамента и модуля деформации грунта основания (E/E_0) и коэффициент бокового давления грунта (ξ_0), или отношение коэффициентов бокового давления материала фундамента и грунта (ξ/ξ_0). Величина коэффициента бокового давления материала фундамента определена при помощи известной формулы по величине коэффициента Пуассона ν и принята равной $\xi = 0.2$.

На рис. 2 приведены графические зависимости величины осадки фундамента от численных значений переменных расчетных параметров.

Зависимости вида $S/H_3 = f(E/E_0)$ и $S/H_3 = f(q/\gamma H)$ являются линейными. Графические аппроксима-

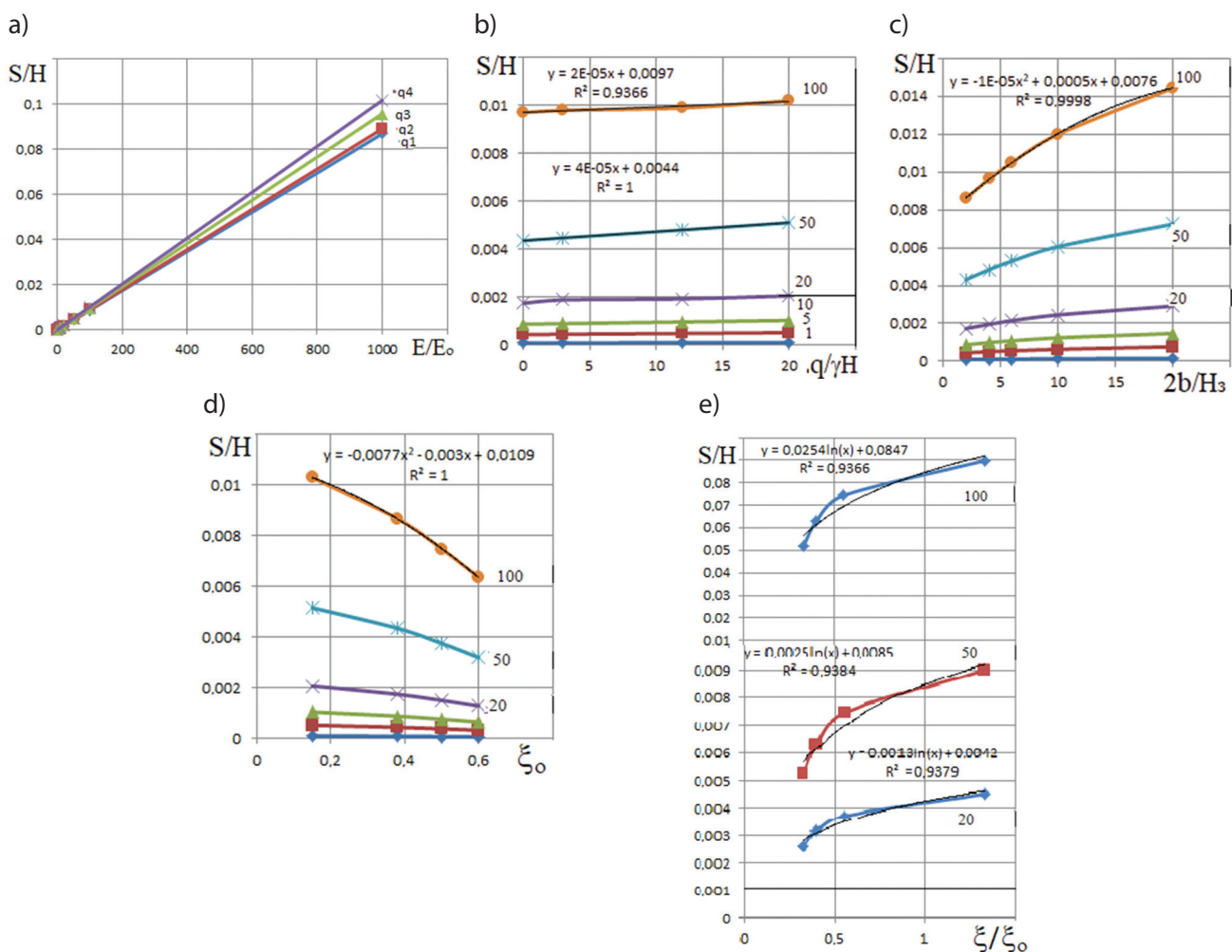


Рис. 2. Графические зависимости вида $S/H_3 = f(E/E_0)$ (a), $S/H_3 = f(q/\gamma H)$ (b) при $2b/H_3 = 2$ и $\xi_0 = 0.15$; графические зависимости вида $S/H_3 = f(2b/H_3)$ (c) при $q/\gamma H_3 = 20$; $S/H_3 = f(\xi_0)$ (d) и $S/H_3 = f(\xi/\xi_0)$ (e) при $2b/H_3 = 4$ и $q/\gamma H_3 = 12$
 Fig. 2. Graphical dependences of $S/H_3 = f(E/E_0)$ (a), $S/H_3 = f(q/\gamma H)$ (b) at $2b/H_3 = 2$ and $\xi_0 = 0.15$; graphical dependences of $S/H_3 = f(2b/H_3)$ (c) at $q/\gamma H_3 = 20$; $S/H_3 = f(\xi_0)$ (d) and $S/H_3 = f(\xi/\xi_0)$ (e) at $2b/H_3 = 4$ and $q/\gamma H_3 = 12$

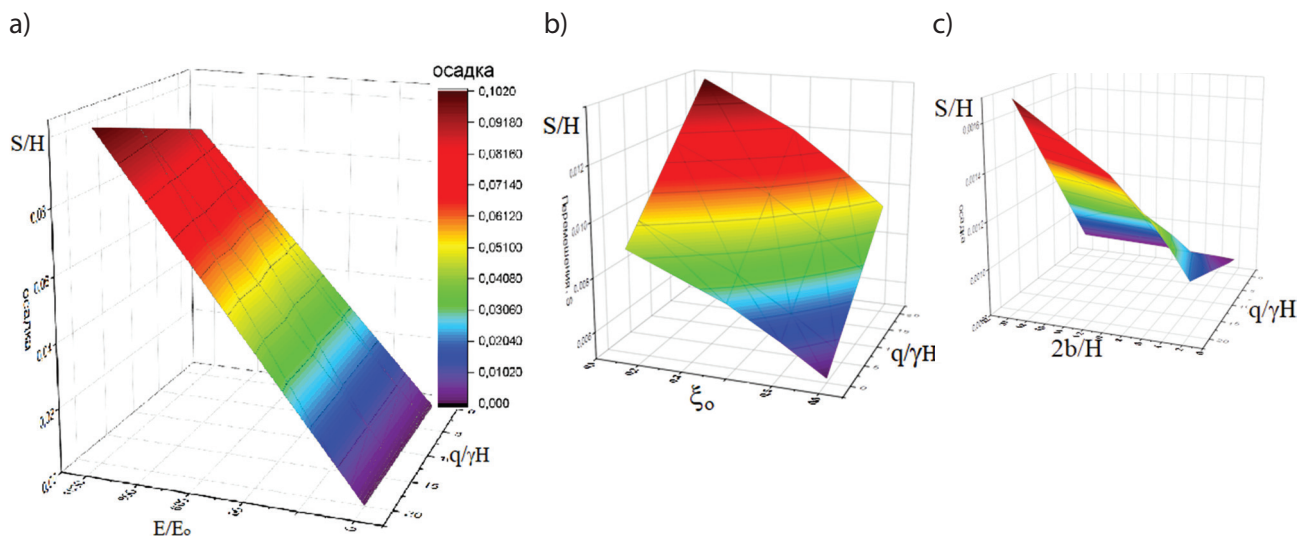


Рис. 3. Функциональные поверхности вида $S/H_3 = f(E/E_0; q/\gamma H_3)$ при $2b/H_3 = 2$ (a); $S = f(\xi_0; q/\gamma H_3)$ при $2b/H_3 = 10$ и $E/E_0 = 100$ (b); $S = f(2b/H_3; q/\gamma H_3)$ при $\xi_0 = 0.15$ и $E/E_0 = 10$ (c)
 Fig. 3. Functional surfaces of the form $S/H_3 = f(E/E_0; q/\gamma H_3)$ at $2b/H_3 = 2$ (a); $S = f(\xi_0; q/\gamma H_3)$ at $2b/H_3 = 10$ and $E/E_0 = 100$ (b); $S = f(2b/H_3; q/\gamma H_3)$ at $\xi_0 = 0.15$ and $E/E_0 = 10$ (c)

ции зависимостей $S/H_3 = f(2b/H_3)$ и $S/H_3 = f(\xi_0)$ являются кривыми линиями, которые практически со 100%-ной достоверностью аппроксимируются полиномами второй степени, а кривые вида $S/H_3 = f(\xi_0/\xi_0)$ с достоверностью 94 % аппроксимируются логарифмической функцией.

На рис. 3 приведены функциональные поверхности, позволяющие оценить одновременное влияние на величины осадок двух переменных расчетных параметров. Поверхность $S/H_3 = f(E/E_0; q/\gamma H_3)$ (рис. 3a) представляет собой плоскость, что вполне ожидаемо, если иметь в виду прямолинейные графики, представленные на рис. 2a, b. Поверхности $S = f(\xi_0; q/\gamma H_3)$ и $S = f(2b/H_3; q/\gamma H_3)$ (рис. 3b, c) – выпуклые, причем вторая из них имеет переменную по знаку кривизну. Ответ на вопрос, почему эти поверхности не являются плоскими, заключается в том, что графические зависимости $S/H_3 = f(2b/H_3)$, $S/H_3 = f(\xi_0)$, $S/H_3 = f(\xi_0/\xi_0)$ не являются линейными.

Резюмируя, можно утверждать, что все без исключения расчетные параметры оказывают существенное влияние на осадки плитного фундамента, и игнорирование хотя бы одного из них может привести к значительным ошибкам.

Практическое использование полученных результатов. Целью настоящей работы является получение базы данных, с помощью которой можно на начальной стадии проектирования оценить величину осадки плитного фундамента конечной жесткости без привлечения мощных вычислительных устройств. Под такой базой данных будем понимать численные значения коэффициентов линейных аппроксимаций зависимостей вида $S/H = f(\xi_0)$. Почему мы говорим о линейных аппроксимациях, хотя на рис. 2d показано, что эти графические зависимости с достоверностью почти 100% аппроксимируются полиномом второй степени?

На рис. 4 приведены примеры аппроксимации графических зависимостей вида $S/H = f(\xi_0)$ при помощи полиномов первой и второй степеней. Анализ аппроксимирующих уравнений и показателей достоверности аппроксимации показывает, что достоверности этих аппроксимаций отличаются друг от друга максимум на 0.015 или 1.5 %. Принятие в виде аппроксимирующей функции полинома первой степени позволяет уменьшить требуемый объем базы данных в 1.5 раза практически без снижения точности определения осадок.

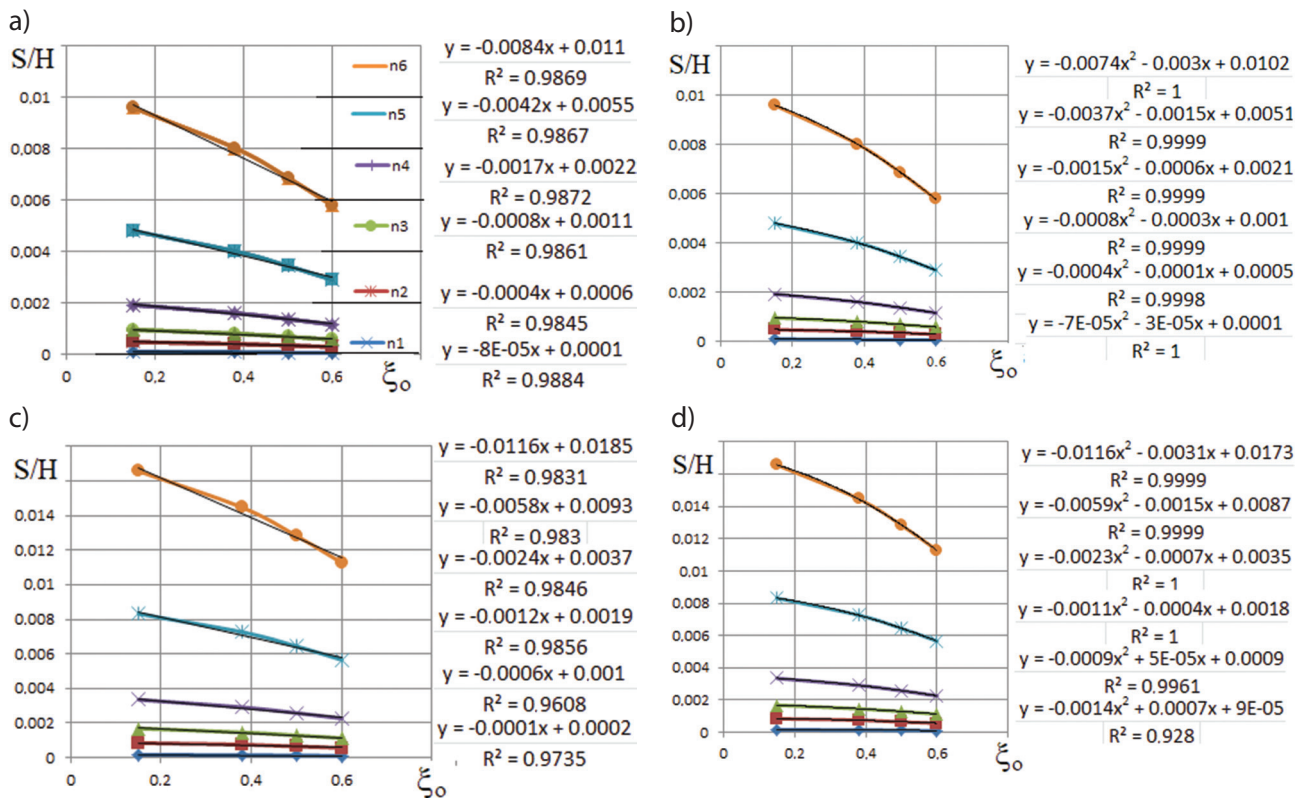


Рис. 4. Аппроксимация кривых вида $S/H = f(\xi_0)$ полиномом первой (a, c) и второй (b, d) степени при $q/\gamma H = 12$ и $2b/H = 2$ (a, b), $q/\gamma H = 20$ и $2b/H = 20$ (c, d)
 Fig. 4. Approximation of curves of the form $S/H = f(\xi_0)$ by a polynomial of the first (a, c) and second (b, d) degree at $q/\gamma H = 12$ and $2b/H = 2$ (a, b), $q/\gamma H = 20$ and $2b/H = 20$ (c, d)

В таблице 2 приведены безразмерные коэффициенты a и b , используя которые, осадки протяженного плитного фундамента конечной жесткости для любых возможных сочетаний численных значений переменных расчетных параметров можно определить по формуле:

$$S/H = a\xi_0 + b. \quad (3)$$

Рассмотрим пример.

Дано: грунтовое основание сложено песком средней крупности, имеющим следующие физи-

ко-механические свойства: $\gamma = 19.3 \text{ кН/м}^3$; $\varphi = 35^\circ$, $E_0 = 37 \text{ МПа}$. Плитный фундамент имеет ширину $2b = 3$ и 15 м , толщина плиты и глубина ее заложения $H = 1 \text{ м}$, материал фундамента бетон марки В15 с модулем упругости $E = 24000 \text{ МПа}$ и коэффициентом Пуассона $\nu = 0.2$ (СП 63.13330.2018²). Коэффициент бокового давления грунта $\xi_0 = 0.271$ определен по формуле В. А. Флорина [23], как это рекомендовано в работах [24–28]:

$$\xi_0 = \text{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right). \quad (4)$$

² Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения = Concrete and reinforced concrete structures. General provisions : СП 63.13330.2018 : утв. Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 19 декабря 2018 г. № 832/п : введ. 20.06.2019. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/554403082?ysclid=lmuaob6wbm87891170> (дата обращения: 03.09.2023).

Таблица 2

Table 2

Численные значения коэффициентов a и b линейной аппроксимации
 графических зависимостей вида $S/H = f(\xi_j)$
 Numerical values of linear approximation coefficients a and b of graphical dependencies
 of the form $S/H = f(\xi_j)$

$q/\gamma H$	E/E_0 $2b/H$	1	5	10	20	50	100	1000	
		Кoeffициент a							
0	2	-0.00008	-0.0004	-0.0008	-0.0016	-0.0041	-0.0081	-0.0810	
	4	-0.00008	-0.0004	-0.0008	-0.0016	-0.0041	-0.0081	-0.0809	
	6	-0.00008	-0.0004	-0.0008	-0.0016	-0.0041	-0.0082	-0.0810	
	10	-0.00008	-0.0004	-0.0008	-0.0017	-0.0041	-0.0082	-0.0818	
	20	-0.00008	-0.0004	-0.0008	-0.0017	-0.0041	-0.0083	-0.0830	
	3	2	-0.00008	-0.0004	-0.0008	-0.0015	-0.0041	-0.0082	-0.0816
		4	-0.00008	-0.0004	-0.0008	-0.0017	-0.0041	-0.0081	-0.0821
		6	-0.00008	-0.0004	-0.0008	-0.0017	-0.0042	-0.0084	-0.0841
		10	-0.00008	-0.0004	-0.0009	-0.0017	-0.0042	-0.0084	-0.0847
		20	-0.00009	-0.0004	-0.0009	-0.0018	-0.0044	-0.0088	-0.0882
	12	2	-0.00008	-0.0004	-0.0008	-0.0017	-0.0042	-0.0084	-0.0836
		4	-0.00009	-0.0004	-0.0009	-0.0017	-0.0043	-0.0086	-0.0858
		6	-0.00009	-0.0004	-0.0009	-0.0018	-0.0044	-0.0088	-0.0881
		10	-0.00010	-0.0005	-0.0009	-0.0019	-0.0046	-0.0092	-0.0931
		20	-0.00010	-0.0005	-0.0011	-0.0021	-0.0052	-0.0103	-0.1038
	20	2	-0.00009	-0.0004	-0.0009	-0.0017	-0.0043	-0.0086	-0.0854
		4	-0.00009	-0.0005	-0.0009	-0.0018	-0.0045	-0.0090	-0.0882
		6	-0.00010	-0.0005	-0.0009	-0.0019	-0.0046	-0.0093	-0.0928
		10	-0.00010	-0.0005	-0.0010	-0.0020	-0.0050	-0.0099	-0.1007
		20	-0.00030	-0.0006	-0.0012	-0.0024	-0.0058	-0.0116	-0.1177
Кoeffициент b									
0	2	0.0001	0.0005	0.0020	0.0020	0.0050	0.0101	0.1003	
	4	0.0001	0.0005	0.0020	0.0020	0.0051	0.0101	0.1008	
	6	0.0001	0.0005	0.0020	0.0020	0.0051	0.0102	0.1013	
	10	0.0001	0.0005	0.0021	0.0021	0.0051	0.0102	0.1021	
	20	0.0001	0.0005	0.0021	0.0021	0.0052	0.0104	0.1036	
	3	2	0.0001	0.0005	0.0020	0.0020	0.0051	0.0103	0.1026
		4	0.0001	0.0005	0.0021	0.0021	0.0053	0.0105	0.1048
		6	0.0001	0.0005	0.0021	0.0021	0.0052	0.0104	0.1072
		10	0.0001	0.0006	0.0022	0.0022	0.0055	0.0110	0.1095
		20	0.0001	0.0006	0.0023	0.0023	0.0058	0.0116	0.1151
	12	2	0.0001	0.0006	0.0022	0.0022	0.0055	0.0110	0.1097
		4	0.0001	0.0006	0.0024	0.0024	0.0059	0.0117	0.1167
		6	0.0001	0.0006	0.0025	0.0025	0.0062	0.0123	0.1224
		10	0.0001	0.0007	0.0027	0.0027	0.0067	0.0134	0.1318
		20	0.0002	0.0008	0.0031	0.0031	0.0077	0.0153	0.1496
	20	2	0.0001	0.0006	0.0023	0.0023	0.0058	0.0116	0.1159
		4	0.0001	0.0007	0.0026	0.0026	0.0064	0.0128	0.1270
		6	0.0001	0.0007	0.0028	0.0028	0.0069	0.0138	0.1365
		10	0.0002	0.0008	0.0031	0.0031	0.0078	0.0155	0.1517
		20	0.0002	0.001	0.0037	0.0037	0.0093	0.0185	0.1802

Интенсивность равномерно распределенной нагрузки $q/\gamma H = 5$ и $q/\gamma H = 12$ соответственно для фундаментов шириной 3 и 15 м.

Определить: осадки середины протяженных плитных фундаментов шириной 3 и 15 м.

Для того чтобы воспользоваться формулой (3), необходимо на основании данных таблицы 2 определить методом линейной интерполяции численные значения коэффициентов a и b , соответствующих численным значениям расчетных параметров, заданных выше.

Исходные коэффициенты для интерполяционного процесса выделены подчеркиванием в таблице 2. Последовательно выполняя операции интерполяции, получим искомые коэффициенты для протяженной фундаментной плиты шириной 3 м: $a_3 = -0.054148$; $b_3 = 0.686831$, и для плиты шириной 15 м: $a_{15} = -0.063857$; $b_{15} = 0.091424$.

Подставляя эти значения в формулу (3) и имея в виду, что $\xi_o = 0.271$, получим: $S_3/H = 0.054009$ и $S_{15}/H = 0.074118$.

Для контроля достоверности полученных результатов составлены расчетные схемы МКЭ для обозначенных выше вариантов, и при помощи компьютерной программы [19] проведены вычисления осадок. В результате оказалось, что полученные значения контрольных осадок соответственно равны $S/H_3^{\text{конт}} = 0.061295$ и $S/H_{15}^{\text{конт}} = 0.089048$, то есть отличаются на 13.45 и 22.08 % от численных значений осадок, полученных при помощи таблицы 2 и метода линейной интерполяции.

На рис. 5 приведены скриншоты экрана компьютера с результатами вычислений при помощи компьютерной программы [19] для фундамента шириной $2b = 3$ м (рис. 5а) и $2b = 15$ м (рис. 5б).

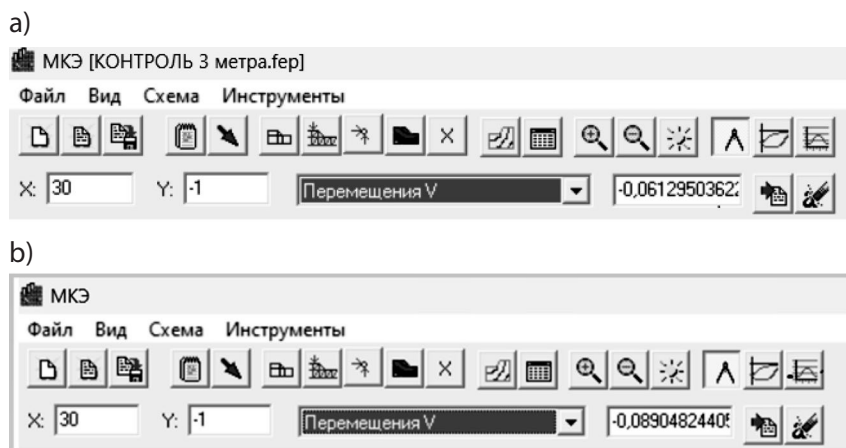


Рис. 5. Скриншоты с результатами вычислений при помощи FEA для фундамента шириной $2b = 3$ м (а) и $2b = 15$ м (б)

Fig. 5. Screenshots with the results of calculations using FEA for foundation of $2b = 3$ m (a) and $2b = 15$ m (b)

Использование предложенной базы данных (таблица 2) и алгоритма вычисления осадок позволяют получить результаты, которые с достаточной для инженерных целей точностью совпадают с результатами, получаемыми непосредственно при помощи компьютерных программ.

Выводы

Анализируя результаты численного исследования процесса осадок протяженного плитного

фундамента, выполненного на основе применения МКЭ, можно сделать следующие выводы:

1. Осадки протяженного плитного фундамента конечной жесткости зависят от большого количества факторов, как то: интенсивности внешнего воздействия, отношения ширины фундамента к глубине его заложения и отношения модулей деформации материала фундамента и грунта основания, коэффициента бокового давления грунта и так далее. Игнорирование хотя бы одного из них может

привести к значительным ошибкам. Поэтому расчеты осадок следует выполнять на основе численных методов с тщательной обработкой граничных условий.

2. Предложена база данных, которая позволяет на ранней стадии проектирования быстро оценить величину осадки таких фундаментов.
3. Контрольный расчет, выполненный при помощи компьютерной программы FEA, по-

казал, что величины контрольных осадок отличаются на 13.45 и 22.08 % от соответствующих значений, полученных на основе предложенной базы данных и метода линейной интерполяции. Это позволяет рекомендовать полученные результаты для предварительной оценки протяженных плитных фундаментов при реальном проектировании.

Библиографический список

1. Matvienko, J. O. Formula of the design resistance of soil for plate foundations / J. O. Matvienko, V. P. Dyba, M. P. Matvienko. – DOI 10.15593/2224-9826/2021.3.04. – Текст : непосредственный // Construction and Geotechnics. – 2020. – Vol. 12, No. 3. – P. 37–45.
2. Компьютерное моделирование осадок жесткого штампа на однородном весоном основании / Л. А. Бартоломей, О. А. Богомолова, В. Д. Гейдт, А. В. Гейдт. – DOI 10.15593/2224-9826/2022.2.01. – Текст : непосредственный // Construction and Geotechnics. – 2022. – Т. 13, № 2. – С. 5–17.
3. Компьютерное моделирование осадок штампа на однородном основании с учетом жесткости надфундаментной конструкции / Л. А. Бартоломей, О. А. Богомолова, В. Д. Гейдт, А. В. Гейдт. – Текст : непосредственный // Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении : Материалы научно-технической конференции, Новочеркасск, 28–30 сентября 2022 года. – Новочеркасск : ООО «Лик», 2022. – С. 124–138.
4. Скворцов, К. Д. Оптимизация формулы расчетного сопротивления грунта / К. Д. Скворцов, А. И. Осокин. – DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-5-117-122. – Текст : непосредственный // Вестник гражданских инженеров. – 2020. – № 5 (82). – С. 117–122.
5. Сопоставление результатов расчета несущей способности двухслойного основания заглубленного ленточного фундамента различными способами / А. Н. Богомолов, О. А. Богомолова, А. И. Вайнгольц, О. В. Ермаков. – Текст : непосредственный // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2014. – № 2. – С. 106–116.
6. Van Baars, S. Numerical check of the Meyerhof bearing capacity equation for shallow foundations / Stefan Van Baars. – DOI 10.1007/s41062-017-0116-1. – Текст : непосредственный // Innovative Infrastructure Solutions. – 2017. – Vol. 3, No. 1 – P. 1–13.
7. Пилягин, А. В. Определение расчетного сопротивления оснований при различных схемах загрузки / А. В. Пилягин. – Текст : непосредственный // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1998. – № 4-5. – С. 28–31.
8. Пилягин, А. В. К вопросу определения расчетного сопротивления оснований при различных схемах загрузки / Пилягин А. В. – Текст : непосредственный // Известия Казанской государственной архитектурно-строительной академии. – 2004. – № 1 (2). – С. 43–44.
9. Prandtl, L. Über die Härte plastischer Körper / L. Prandtl. – Текст : непосредственный // Nachrichten von der Königl. Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen. Mathematisch-physikalische Klasse. – 1920. – K. 1. – P. 74–85.
10. Reissner, H. J. Zum Erddruckproblem / H. J. Reissner ; Biezeno, C. B. and Burgers, J. M. (eds.). – Текст : непосредственный // Proceedings of the 1st International Congress for Applied Mechanics. – Delft, the Netherlands. – 1924. – P. 295–311.

11. Гольдштейн, М. Н. Расчеты осадок и прочности оснований зданий и сооружений / М. Н. Гольдштейн, С. Г. Кушнер, М. И. Шевченко. – Текст : непосредственный // Киев : Будівельник, 1977. – 208 с.
12. Van Baars, S. Failure mechanisms and corresponding shape factors of shallow foundations / S. Van Baars. – Текст : непосредственный // 4th Int. Conf. on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Nicosia, 2016. – Nicosia, North Cyprus, 2016. – P. 551–558.
13. Van Baars, S. The influence of superposition and eccentric loading on the bearing capacity of shallow foundations / S. Van Baars. – Текст : непосредственный // Journal of Computations and Materials in Civil Engineering. – 2016. – Vol. 1, No. 3. – P. 121–131.
14. Vesić, A. S. Analysis of ultimate loads of shallow foundations / A. S. Vesić. – Текст : непосредственный // Journal of the soil mechanics and foundations division. – 1973. – Vol. 99. – P. 45–71.
15. Vesić, A. S. Bearing capacity of shallow foundations / A. S. Vesić. – Текст : непосредственный // Foundation Engineering Handbook / H. F. Winterkorn, H. Y. Fan (eds.). – New York ; Cincinnati ; Atlanta ; Dallas ; San Francisco ; London ; Toronto ; Melbourne : Van Nostrand Reinhold Company, 1975. – P. 121–147.
16. Zhu, M. Shape Factors for Limit Loads on Square and Rectangular Footings / M. Zhu, R. L. Michalowski. – DOI 10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:2(223). – Текст : непосредственный // Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering. – 2005. – No. 131. – P. 223–231.
17. Предложения о подходе к расчету оснований сооружений / А. Н. Богомолов, А. Н. Ушаков, О. А. Богомолова, С. И. Шиян. – Текст : непосредственный // Юбилейная конференция, посвященная 80-летию кафедры механики грунтов, оснований и фундаментов, 110-летию со дня рождения Н. А. Цытовича, 100-летию со дня рождения С. С. Вялова, Москва, 30 сентября – 01 октября 2010 года. – Москва : Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2010. – С. 147–151.
18. Численное определение величины расчетного сопротивления основания под штампом конечной жесткости с учетом жесткости надфундаментной конструкции / Л. А. Бартоломей, О. А. Богомолова, В. Д. Гейдт, А. В. Гейдт. – DOI 10.15593/2224-9826/2023.2.07. – Текст : непосредственный // Construction and Geotechnics. – 2023. – Т. 14, № 2. – С. 92–104.
19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015617889 Российская Федерация. FEA : № 2015614310 : заявл. 25.05.2015 : опублик. 23.07.2015 / А. Н. Богомолов, О. А. Богомолова, А. В. Редин, А. Н. Ушаков ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет» (ВолГАСУ). – Текст : непосредственный.
20. Zienkiewicz, O. C. The finite element method in engineering science / O. C. Zienkiewicz. – London : McGraw-Hill, 1971. – 531 p. – Текст : непосредственный.
21. Метод конечных элементов в статике сооружений / Я. Шмельтер, М. Дацко, С. Добровичский, М. Вечорек ; пер. с польского М. В. Предтеченского; под ред. В. Н. Сидорова. – Москва : Стройиздат, 1986. – 220 с. – Текст : непосредственный.
22. Назначение размеров расчетных схем при компьютерном моделировании напряженного состояния основания плитного фундамента на основе метода конечных элементов / Л. А. Бартоломей, О. А. Богомолова, В. Д. Гейдт, А. В. Гейдт. – Текст : непосредственный // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2023. – № 2 (91). – С. 5–17.
23. Флорин, В. А. Основы механики грунтов: в 2 т. / В. А. Флорин. – Ленинград : Госстройиздат, 1959–1961. Т. 1: Общие зависимости и напряженное состояние оснований сооружений. – 1959. – 357 с. – Текст : непосредственный.
24. Коэффициент бокового давления грунта как одна из величин, определяющих несущую способность однородного основания ленточного фундамента / А. Н. Богомолов, С. А. Калиновский,

- О. А. Богомолова, А. В. Прокопенко. – Текст : непосредственный // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2013. – № 31-2 (50). – С. 251–257.
25. Богомолов, А. Н. К вопросу о минимальных значениях коэффициента бокового давления грунтов / А. Н. Богомолов, О. А. Вихарева, С. И. Шиян. – Текст : непосредственный // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2007. – № 7 (26). – С. 6–10.
26. Ляшенко, П. А. Метод определения коэффициента бокового давления грунтов / П. А. Ляшенко, В. В. Денисенко. – Текст : непосредственный // Актуальные проблемы строительного и дорожного комплексов : Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию Института строительства и архитектуры ПГТУ, Йошкар-Ола, 15 мая 2019 года. – Йошкар-Ола : Поволжский государственный технологический университет, 2019. – С. 85–90.
27. Рекомендации по методам определения коэффициентов бокового давления и поперечного расширения глинистых грунтов / НИИ оснований и подзем. сооружений им. Н. М. Герсеванова. – Москва : НИИОСП, 1978. – 30 с. – Текст : непосредственный.
28. Нуждин, Л. В. Практический метод расчета осадок фундаментов с учетом деформационной анизотропии грунтов основания / Л. В. Нуждин, О. А. Коробова, М. Л. Нуждин. – Текст : непосредственный // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2014. – № 4. – С. 245–263.

References

1. Matvienko, J. O., Dyba, V. P., & Matvienko, M. P. (2020). Formula of the design resistance of soil for plate foundations. *Construction and Geotechnics*, 12(3), pp. 37-45. (In English). DOI 10.15593/2224-9826/2021.3.04.
2. Bartolomey, L. A., Bogomolova, O. A., Geidt, V. D., & Geidt, A. V. (2022). Computer simulation of rigid plate settlement on a homogeneous weight base. *Construction and Geotechnics*, 13(2), pp. 5-17. (In Russian). DOI 10.15593/2224-9826/2022.2.01.
3. Bartolomey, L. A., Bogomolova, O. A., Geidt, V. D., & Geidt, A. V. (2022). Computer simulation of the stamp sediment on a homogeneous base taking into account the rigidity of the foundation structure. *Mekhanika gruntov v geotekhnike i fundamentostroenii : Materialy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*, Novocherkassk, September, 28–30. Novocherkassk, ООО "Lik" Publ., pp. 144-138. (In Russian).
4. Skvortsov, K. D., & Osokin, A. I. (2020). Optimization of the formula of the design resistance of soil. *Bulletin of civil engineers*, (5(82)), pp. 117-122. (In Russian). DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-5-117-122.
5. Bogomolov, A. N., Bogomolova, O. A., Vaingolts, A. I., & Yermakov, O. V. (2014). The comparison of the results of calculation of the bearing capacity of two-layer basis of deep strip foundations in different ways. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, (2), 106-116. (In Russian).
6. Van Baars, S. (2017). Numerical check of the Meyerhof bearing capacity equation for shallow foundations. *Innovative Infrastructure Solutions*, 3(1), pp. 1-13. (In English). DOI 10.1007/s41062-017-0116-1.
7. Pilyagin, A. V. (1998). Opredelenie raschetnogo soprotivleniya osnovaniy pri razlichnykh skhemakh zagruzheniya. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, (4-5), pp. 28-31. (In Russian).
8. Pilyagin, A. V. (2004). K voprosu opredeleniya raschetnogo soprotivleniya osnovaniy pri razlichnykh skhemakh zagruzheniya. *Izvestiya Kazanskoy gosudarstvennoy arkhitekturno-stroitel'noy akademii*, (1(2)), pp. 43-44. (In Russian).

9. Prandtl, L. (1920). About the hardness of plastic bodies [Über die Härte plastischer Körper]. News from the Royal society of scientists in Göttingen. Maths and physics class [Nachrichten von der Königl. Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen. Mathematisch-physikalische Klasse], (1), pp. 74-85. (In German).
10. Reissner, H. J. (1924). The Earth pressure problem [Zum Erddruckproblem]. Proceedings of the 1st International Congress for Applied Mechanics. Biezeno, C. B., & Burgers, J. M. (eds.). Delft, the Netherlands, pp. 295-311. (In German).
11. Gol'dshteyn, M. N., Kushner, S. G., & Shevchenko, M. I. (1977). Rascheti osadok i prochnosti osnovaniy zdaniy i sooruzheniy. Kyiv, Budivel'nik Publ., 208 p. (In Russian).
12. Van Baars, S. (2016). Failure mechanisms and corresponding shape factors of shallow foundations. 4th Int. Conf. on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Nicosia, 2016. Nicosia, North Cyprus, Publ. Near East University, pp. 551-558. (In English).
13. Van Baars, S. (2016). The influence of superposition and eccentric loading on the bearing capacity of shallow foundations. Journal of Computations and Materials in Civil Engineering, 1(3), pp. 121-131. (In English).
14. Vesić, A. S. (1973). Analysis of ultimate loads of shallow foundations. Journal of the soil mechanics and foundations division, 99, pp. 45-71. (In English).
15. Vesić, A. S. (1975). Bearing capacity of shallow foundations. Foundation Engineering Handbook. H. F. Winterkorn, H. Y. Fan (eds.). New York, Cincinnati, Atlanta, Dallas, San Francisco, London, Toronto, Melbourne, Publ. Van Nostrand Reinhold Company, pp. 121-147. (In English).
16. Zhu, M., & Michalowski, R. L. (2005). Shape factors for limit loads on square and rectangular footings. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, (131), pp. 223-231. DOI 10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:2(223). (In English).
17. Bogomolov, A. N., Ushakov, A. N., Bogomolova, O. A., & Shiyan, S. I. (2010). Predlozheniya o podhode k raschetu osnovaniy sooruzheniy. Jubilejnaya konferenciya, posvjashhennaya 80-letiju kafedry mehaniki gruntov, osnovaniy i fundamentov, 110-letiju so dnja rozhdeniya N. A. Cytovicha, 100-letiju so dnja rozhdeniya S. S. Vjalova, Moscow, September, 30 – October, 01. Moscow, Moscow State University of Civil Engineering Publ., pp. 147-151. (In Russian).
18. Bartolomey, L. A., Bogomolova, O. A., Geidt, V. D., & Geidt, A. V. (2023). Numerical determination of the value of the calculated resistance of the base under the stamp of final stiffness, taking into account the rigidity over the foundation structure. Construction and Geotechnics, 14(2), pp. 92-104. (In Russian). DOI 10.15593/2224-9826/2023.2.07.
19. Bogomolov, A. N., Bogomolova, O. A., Redin, A. V., & Ushakov, A. N. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM № 2015617889 Rossijskaja Federaciya. FEA. Applied: 25.05.2015. Published: 23.07.201. (In Russian).
20. Zienkiewicz, O. C. (1971). The finite element method in engineering science. London, Publ. McGraw-Hill, 531 p. (In English).
21. Shmel'ter, Ja., Dacko, M., Dobrochinskij, S., & Vechorek, M. (1986). Metod konechnyh jelementov v statike sooruzhenij. Moscow, Stroyizdat Publ., 220 p. (In Russian).
22. Bartolomey, L. A., Bogomolova, O. A., Geidt, V. D., & Geidt, A. V. (2023). 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 arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura, (2(91)), pp. 5-17. (In Russian).
23. Florin, V. A. (1959). Obshchie zavisimosti i napryazhennoe sostoyanie osnovaniy sooruzheniy, Vol. 1. Leningrad, Gosstroyizdat Publ., 357 p. (In Russian).

24. Bogomolov, A. N., Kalinovskiy, S. A., Bogomolova, O. A., & Prokopenko, A. V. (2013). Coefficient of lateral earth pressure as one of values that determine bearing capacity of entire base of strip foundation. Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura, (31-2(50)), pp. 251-257. (In Russian).
25. Bogomolov, A. N., Vikhareva, O. A., & Shiyan, S. I. (2007). On the issue of minimal coefficient values of lateral earth pressure. Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura, (7(26)), pp. 6-10. (In Russian).
26. Lyashenko, P. A., & Denisenko, V. V. (2019). Metod opredeleniya koeffitsienta bokovogo davleniya gruntov. Aktual'nye problemy stroitel'nogo i dorozhnogo kompleksov : Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchenoy 50-letiyu Instituta stroitel'stva i arkhitektury PGTU, Yoshkar-Ola, May, 15. Yoshkar-Ola : Volga state university of technology, pp. 85-90. (In Russian).
27. Rekomendatsii po metodam opredeleniya koeffitsientov bokovogo davleniya i poperechnogo rasshireniya glinistykh gruntov. Gersevanov Research Institute of Bases and Underground Structures (NIIOSP). Moscow, NIIOSP Publ., 30p. (In Russian).
28. Nuzhdin, L. V., Korobova, O. A., & Nuzhdin, M. L. (2014). Prakticheskiy metod rascheta osadok fundamentov s uchetom deformatsionnoy anizotropii gruntov osnovaniya. Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura, (4), pp. 245-263. (In Russian).

Сведения об авторах

Бартоломей Леонид Адольфович, д-р техн. наук, профессор кафедры строительного производства, Тюменский индустриальный университет, ORCID: 0000-0001-8092-6476

Богомолова Оксана Александровна, канд. техн. наук, доцент кафедры математических и естественно-научных дисциплин, Волгоградский государственный технический университет, e-mail: boazaritcyn@mail.ru, ORCID: 0000-0003-1163-6285

Гейдт Лариса Викторовна, старший преподаватель кафедры строительного производства, Тюменский индустриальный университет, e-mail: gejdttlv@tyuiu.ru, ORCID: 0000-0002-1616-454X

Гейдт Андрей Владимирович, аспирант кафедры строительного производства, Тюменский индустриальный университет, e-mail: andreygeydt@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2649-6927

Information about the authors

Leonid A. Bartolomey, Doctor in Engineering, Professor at the Department of Building Production, Industrial University of Tyumen, ORCID: 0000-0001-8092-6476

Oksana A. Bogomolova, Candidate in Engineering, Associate Professor at the Department of Mathematical and Natural Science Disciplines, Volgograd State Technical University, e-mail: boazaritcyn@mail.ru, ORCID: 0000-0003-1163-6285

Larisa V. Geidt, Senior Lecturer at the Department of Building Production, Industrial University of Tyumen, e-mail: gejdttlv@tyuiu.ru, ORCID: 0000-0002-1616-454X

Andrei V. Geidt, Postgraduate Student at the Department of Building Production, Industrial University of Tyumen, e-mail: andreygeydt@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2649-6927

*Получена 23 августа 2023 г., одобрена 18 сентября 2023 г., принята к публикации 28 сентября 2023 г.
Received 23 August 2023, Approved 18 September 2023, Accepted for publication 28 September 2023*