

В. И. ИСАЕВ
А. В. МАЛЬЦЕВ
А. А. КАРПОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА «ПЛАВАЮЩЕГО» ФУНДАМЕНТА ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОСАДКИ НА МОДЕЛИ ФУНДАМЕНТНОЙ ПЛИТЫ

RESEARCH OF THE “FLOATING” BASE METHOD FOR SEDIMENTATION ON THE
MODEL OF THE FOUNDATION PLATE

Предлагается применение одномерной задачи теории компрессионного уплотнения грунтов для расчета осадок фундаментных плит большой площади. Произведен анализ существующих методов определения глубины сжимаемой толщи. Предложены авторские методики определения глубины сжимаемой толщи и осадки фундамента. Разработан испытательный стенд (лоток) и выполнено лабораторное испытание. Представлены результаты экспериментального исследования глубины сжимаемой толщи под плитными фундаментами. Произведен анализ экспериментальных данных. Подтвержден ранее предложенный авторами метод расчета глубины сжимаемой толщи.

Ключевые слова: плитный фундамент, сжимаемая толщина, расчет осадки, модель фундамента, испытательный стенд

При определении осадки фундаментов важную роль играет величина слоя грунта, формирующая осадку. Этот слой получил название сжимаемая толщина. При этом сжимаемая толщина грунта имеет две границы: одну четкую – это подошва фундамента и другую «размытую», нахождение которой представляет известные трудности. Теоретически, нижняя граница сжимаемой толщи находится на той глубине, где отсутствует давление на нижележащие слои грунта от сооружения, которое называется дополнительным давлением.

В существующих методах расчета осадок фундаментов сжимаемая толщина задается заранее, например:

- в методе послойного суммирования назначается глубина, ниже которой не учитывается влияние давления от сооружения;
- в методе эквивалентного слоя мощность сжимаемой толщи принята равной двойному значению эквивалентного слоя, который напрямую зависит от размеров фундамента;
- в методе одномерного компрессионного сжатия предлагается за мощность сжимаемой

In the article, the authors propose the application of a one-dimensional problem of the theory of compression compaction of soils for the calculation of sediments of Foundation slabs of large area. The authors analyzed the existing methods for determining the depth of the compressible thickness. The author suggests an original technique to determine the depth of compressible strata and settling of the Foundation. A test bench (tray) was developed and a laboratory test was performed. The results of an experimental study of the depth of compressible thickness under slab foundations are presented. The analysis of experimental data is made. The method of calculation of compressible thickness depth, previously proposed by the authors, is confirmed.

Keywords: slab foundation, compressible thickness, sediment calculation, foundation model, test bench

толщи принимать расстояние до несжимаемого слоя (скалы);

- в методе линейно-деформируемого слоя конечной толщины мощность сжимаемого слоя назначается заранее.

При этом в методе компрессионного сжатия грунтов предполагается расположение скалы на небольшой глубине; тогда распространение напряжений принимается равномерным по высоте сжимаемой толщи.

Следует отметить, что во всех методах величина осадки определяется как произведение площади эпюры уплотняющего давления и механической характеристики грунта, например:

$$S = P \cdot h \cdot m_v,$$

где $P \cdot h$ – площадь эпюры уплотняющего давления.

Если предположить, что «скала» удалена от поверхности приложения нагрузки на такое расстояние, где давление от сооружения на «скалу» ощущаться не будет, т. е. обнулится, тогда это расстояние можно называть сжимающей толщиной. Распределение напряжения по глубине сжимаемой толщи примет вид

треугольника, и формула осадки запишется по-другому, а именно:

$$S = 1/2 \cdot P \cdot h \cdot m_v.$$

Вышеописанное состояние в грунте может возникнуть в том случае, если давление от сооружения будет уравновешено весом столба грунта, т. е. $P = \gamma \cdot z$, – это и будет выражать принцип «плавающего» фундамента, откуда легко находится граница, ниже которой не будет осадки грунтов.

По результатам последних исследований [1–5] сделан вывод о том, что критерий установления глубины сжимаемой толщи принят условно и не отражает фактического распространения деформации грунта по глубине основания. В результате этого при расчете получают завышенные глубины сжимаемой толщи, а абсолютные значения замеренных перемещений грунта по глубине основания оказываются меньше расчетных.

Такого же мнения придерживаются и авторы статьи, в качестве альтернативы предлагая авторскую методику определения глубины сжимаемой толщи и расчета осадки фундамента, в основе которой лежит применение принципа «плавающего фундамента», когда для определения мощности сжимаемого грунта принято условие равенства давления от сооружения величине природного давления.

Для утверждения возможности применения концепции «плавающего фундамента» ниже приводятся мнения Н.А. Цытовича и С.Г. Кушнера [7, 8] о том, что общая осадка фундаментов мало зависит от их жесткости. Н.А. Цытович утверждает следующее: «жесткость фундамента практически не влияет на мощность сжимаемой толщи». По мнению С.Г. Кушнера, «по мере увеличения ширины плиты прирост глубины сжимаемой толщи становится практически мало зависящим от ширины плиты».

В своей работе Н.А. Цытович пишет, что «величина активной зоны сжатия зависит от величины напряжений (вероятно уплотняющих), от уплотненности грунтов и т. д.». Об этом пишет и С.Г. Кушнер, отмечая, что «мощность сжимаемой толщи является одним из факторов, влияющих на осадку, и зависит от давления под подошвой фундамента и его распределения по глубине, от состояния и свойств грунта, от размеров приращения давления на основание по сравнению с природными».

Ниже предлагается расчетная схема определения границы сжимаемой толщи (рис. 1), основанная на предположении [6, 7], что вес сооружения уравновешивается весом вынужто-го грунта. На горизонте а-а давление от сооруже-

жения будет равно весу сжатого грунта $abba$ и грунтовая толща ab будет испытывать сжатие от дополнительного давления P .

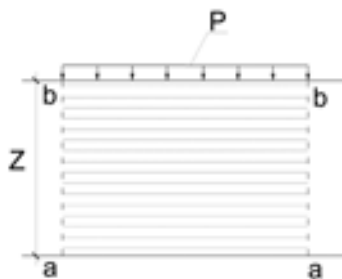


Рис. 1. Схема к расчету величины сжимаемой толщи грунта

На горизонте а-а можно записать равенство

$$P = \gamma \cdot z,$$

отсюда

$$z = P/\gamma,$$

т. е. можно сказать, что z – это сжимаемая толща.

После откопки котлована сжимаемая толща уменьшается (рис. 2), что записывается уравнением

$$H_c = z - \gamma \cdot d.$$

Ниже границы а-а уплотняющее давление отсутствует, грунты не будут испытывать сжатия, это состояние можно записать как $P_0 = 0$, тогда при наличии глубины заложения эпюра уплотняющих давлений будет иметь форму треугольника.

Принцип линейной деформируемости грунтов сохраняется, что учитывается использованием модуля общих деформаций.

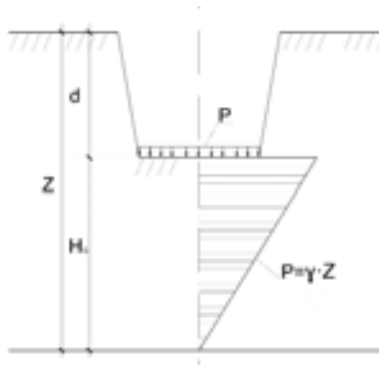


Рис. 2. Схема распределения уплотняющих давлений по глубине

Далее используем формулу задачи компрессионного уплотнения, где осадка равна площади уплотняющего давления и обратно пропорциональна модулю деформации грунта.

$$S = \frac{1}{2} \cdot P \cdot H_c \cdot \frac{\beta_0}{E_0},$$

где $\frac{1}{2} \cdot P \cdot H_c$ – площадь треугольника или площадь уплотняющего давления;

H_c – активная зона сжатия, расстояние от подошвы фундамента до горизонта а-а;

P – уплотняющее давление;

E – модуль общей деформации грунтов основания.

Вышеописанным приемом авторами решена задача перехода от более сложной задачи линейно-деформируемого полупространства к более простой задаче слоя конечной мощности.

Ниже предлагается сравнительный количественный анализ расчетов по различным методикам на примерах № 2,3,4 из книги В.И. Мулина [10]. Исходя из решения задачи по методу послойного суммирования, мощность сжимаемой толщи равна 10,2 м при соотношении напряжений $\sigma_{zpi} = 0,2\sigma_{zgi}$.

Осадка составила $S = 2,5$ см.

Используя условия задачи согласно СП 22.13330.2016, а именно $P_0 = P$ и $\sigma_{zpi} = 0,5\sigma_{zgi}$, получим мощность сжимаемой толщи 10,2 м, заметим, что это чистое совпадение.

Осадка равна $S = 7,0$ см.

Далее для этой же трубы рассмотрим расчет по методу эквивалентного слоя.

Мощность эквивалентного слоя составит $h_s = 39,5$ м, средний коэффициент сжимаемости $m_v = 0,0019$ см²/кг, осадка при $P_0 = 63$ кПа составит $S = 4,7$ см. Однако, если принять $P_0 = P$, то осадка будет иметь значение $S = 13,2$ см.

В примере № 4 использован метод линейно-деформированного слоя конечной толщины, согласно которому осадка составит $S = 5,4$ см, а мощность сжимаемой толщи 14,4 м.

Для сравнения выполняем расчет, используя принцип «плавающего» фундамента. Мощность сжимаемой толщи составит 3,4 м, а осадка $S = 1,3$ см.

Можно сожалеть о том, что В.И. Мулин не привел в своей работе данные фактических измерений осадки фундамента под трубу.

Как видно из вышеприведенных расчетов, разброс результатов значительный, при этом, на наш взгляд, более близким к действительности является результат расчета по методу линейно-деформируемого полупространства с соотношением $\sigma_{zpi} = 0,2\sigma_{zgi}$. Кроме того, физически может испытывать деформации только слой с меньшим модулем деформации,

что и доказывается в методе «плавающего» фундамента.

Ниже приводятся сравнительные данные по расчету осадки плиты жилого 10-этажного дома, расположенного по адресу: г. Самара, ул. Братьев Коростелевых, д.117, сданного в эксплуатацию в 2010 г. Фундамент здания представляет собой плиту шириной 18,0 м. Грунтом основания служит суглинок мощностью 12,5 м, удельный вес 1,98 г/см³, модуль деформации $E = 10$ МПа, глубина заложения подошвы фундамента 4,0 м. Фактическое давление под плитой составляет 176,0 кПа.

Для сравнения использованы данные, полученные методом линейно-деформируемого слоя конечной толщины. Мощность сжимаемой толщи составляет $H_c = 10,42$ м.

Осадка плиты определена по формуле

$$S = \frac{P \cdot b \cdot k_c}{k_m} \sum_{i=1}^n \frac{k_i - k_{i-1}}{E_i}, S = 6,86 \text{ см.}$$

По методу плавающего фундамента сжимаемая толща составляет $H_c = 4,9$ м.

$$S = \frac{1}{2} \cdot P \cdot H_c \cdot \frac{\beta_0}{E_0}, S = 3,45 \text{ см.}$$

Сжимаемая толща, определенная по методу послойного суммирования, равна $H_c = 7,2$ м, осадка вычисляется по формуле

$$S = 0,8 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2_i}, S = 9,0 \text{ см.}$$

Фактически замеренная осадка плиты равна 3,23 см.

Для подтверждения вышепредставленных теоретических выкладок авторов проведено лабораторное исследование по нахождению глубины под моделью фундаментной плиты, где грунтовая марка не получит осадку при заранее заданной нагрузке на плиту.

Цель испытаний на модели фундаментной плиты заключается в том, что, при известном удельном весе грунта, назначается глубина сжимаемой толщи, далее находится соответствующая этой величине сжимаемой толщи нагрузка на плиту, отдельными ступенями доводится нагрузка на плиту до заранее заданного значения и проверяется отсутствие перемещений на заданной глубине, тем самым фиксируется граница сжимаемой толщи. Исследование сжимаемости грунтов основания под моделью фундаментной плиты проводится в лаборатории кафедры инженерной геологии, оснований и фундаментов Академии строительства и архитектуры Самарского государственного технического университета.

Для исследования был использован испытательный стенд (круглый в плане грунтовый лоток) с реперной системой. Схема устройства

лотка приведена на рис. 3. Общий вид лотка представлен на рис. 4. Внутренний диаметр лотка – 440 мм, высота – 500 мм. В качестве модели плиты служит металлический диск толщиной 10 мм с отверстием для погружения грунтовой марки; диаметр диска равен 410 мм. В качестве грунта использовалась искусственная смесь мелкого песка и технического вазелина в соотношении 10:1 соответственно. Физико-механические показатели грунтовой смеси следующие: удельный вес – от 1,65 до 1,7 г/м³; влажность – 10 %; модуль деформации – переменный, от 4,0 до 7,0 МПа.

Осадка плиты замерялась с помощью индикаторов часового типа с точностью до 0,01 мм. Индикаторы устанавливались на две противоположные стороны плиты. Деформация грунтового основания фиксировалась по центру плиты с помощью грунтовой марки. Мощность сжимаемого слоя назначалась в 30, 20, 10 и 5 см.

При удельном весе грунта 16,5 – 17,5 кН/м³ соответственно определялась нагрузка на плиту по формуле

$$N = P \cdot A,$$

где A – площадь плиты, $A = 0,132 \text{ м}^2$.

Удельное давление на грунт рассчитывалось по формуле

$$P = \gamma \cdot z_i,$$

где γ – удельный вес грунта, кН/м³;

z_i – заданная глубина сжимаемой толщи.

Эксперимент заключался в постановке глубинной марки на заранее заданной границе сжимаемой толщи, в загрузке лотка грунтом с послойным уплотнением, в определении методом режущего кольца удельного веса грунта, в приложении отдельными ступенями нагрузки на плиту. Каждую ступень выдерживали до полного затухания осадки плиты от предыдущей ступени. Осадка фиксировалась по показаниям индикаторов. Испытание плиты проводилось с трехкратным повторением при каждой назначенной мощности сжимаемой толщи.

Результаты испытаний по усредненным показателям представлены в таблице.

В представленных в таблице данных видно, что при нагрузке на плиту, равной весу взятого грунта $P = \gamma \cdot z$ на заданной глубине H_c (5,0; 10,0; 20,0; 30,0 см) (т. е. на границе сжимаемой толщи), деформации грунта отсутствуют.

Анализируя полученные результаты, можно сделать общий **вывод**, что принцип «плавающего» фундамента при расчете осадки фундаментных плит полностью подтвержден проведенными испытаниями на модели плиты.

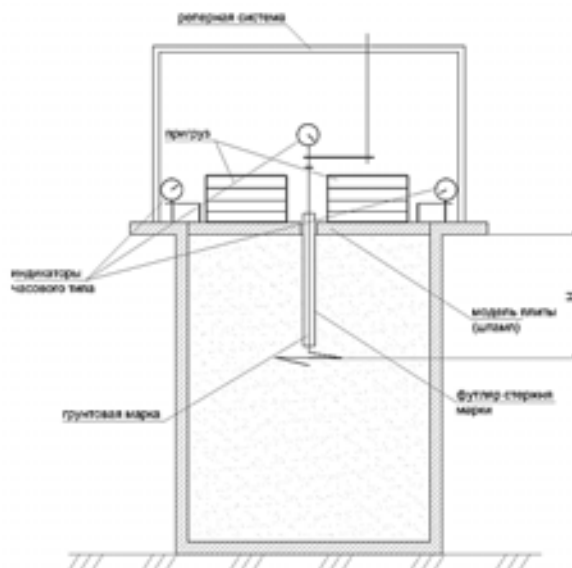


Рис. 3. Схема устройства испытательного стенда



Рис. 4. Общий вид испытательного стенда

Идея, положенная в основу нахождения нижней границы сжимаемой площади через фактическое давление и свойства грунтов, доказана полученными результатами. При этом зависимость мощности сжимаемой толщи от соотношения среднего давления и плотности универсальная, и в практических целях можно заранее назначить мощность сжимаемой толщи

Результаты испытаний по усредненным показателям

Граница сжимаемой толщи, см	Удельный вес грунта, кН/м³	Необходимое давление, кПа	Необходимая нагрузка на плиту, кН	Степень нагрузки, кН	Нагрузка, кН	Средняя осадка плиты, мм	Осадка марки, мм
Испытание плиты при сжимаемой толще 5 см							
5,0	16,5	0,825	0,11	0,08	0,08	0,15	0
				0,08	0,16	0,40	0
				0,08	0,24	0,76	0,03
				0,08	0,32	1,43	0,15
Испытание плиты при сжимаемой толще 10 см							
10,0	17,0	1,700	0,224	0,04	0,04	0,015	0
				0,04	0,08	0,025	0
				0,04	0,12	0,045	0
				0,04	0,16	0,075	0
				0,04	0,20	0,09	0
				0,04	0,24	0,13	0
				0,04	0,28	0,21	0,02
Испытание плиты при сжимаемой толще 20 см							
20,0	16,9	3,38	0,446	0,04	0,04	0	0
				0,04	0,08	0,02	0
				0,04	0,12	0,035	0
				0,04	0,16	0,045	0
				0,04	0,20	0,06	0
				0,04	0,24	0,07	0
				0,04	0,28	0,09	0
				0,04	0,32	0,11	0
				0,04	0,36	0,13	0
				0,04	0,40	0,15	0
				0,04	0,44	0,21	0
				0,04	0,48	0,23	0
				0,04	0,52	0,28	0
Испытание плиты при сжимаемой толще 30 см							
30,0	16,5	4,95	0,653	0,04	0,04	0,16	0
				0,04	0,08	0,43	0
				0,04	0,12	0,64	0
				0,04	0,16	0,9	0
				0,04	0,20	1,3	0
				0,04	0,24	1,7	0
				0,04	0,28	2,1	0
				0,04	0,32	2,6	0
				0,04	0,36	3,1	0
				0,04	0,40	3,5	0
				0,04	0,44	4,0	0
				0,04	0,48	4,3	0
				0,04	0,52	4,5	0
				0,04	0,56	4,8	0
				0,04	0,60	5,1	0
				0,04	0,64	5,6	0
				0,04	0,68	6,0	0,04
				0,04	0,72	6,4	0,075

и получить допускаемую нагрузку на плиту; кроме того, можно заранее ограничивать нагрузку на плиту по величине допустимой осадки и фактического модуля деформации.

Вышеуказанная зависимость также удобна для проведения исследования работы плитных фундаментов в лабораторных условиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Голубков В.Н., Догадайло А.И., Дуденко Ю.И. Исследование деформаций грунта в основании штампа большой площади // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1984. № 5. С. 18–21.
2. Догадайло А.И., Дуденко Ю.И. Исследование характера формирования объемной деформации грунта в основании штампов разной площади // Будівельні конструкції: Міжвід. наук.-техн. зб. 2004. № 61. С. 67–74.
3. Егоров К.Е. О деформации основания конечной толщины // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1961. № 1. С. 4–6.
4. Коновалов П.А. Основания и фундаменты реконструируемых зданий. Изд. 4-е. М., 2000. 385 с.
5. Тугаенко Ю.Ф. Принципы определения осадки фундамента в пределах ее нелинейной зависимости от давления // Збірник наукових праць (галузеve машинобудування, будівництва). 2012. № 4(34). С. 268–273.
6. Isaev V., Maltsev A., Karpov A. Calculating Methodology of large Base slabs: compressible strata capacity and foundation settlement/ 27th Russian-Polish-Slovak Seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering (27rsp), tfoce 2018.
7. Isaev V., Maltsev A., Karpov A.. Theoretical basics of applying the one dimensional problem of soils compression seal theory to large foundation plates calculation // MATEC Web of Conferences 86 / 5th International Scientific Conference "Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education. 2016.
8. Кушнер С.Г. Расчет деформаций оснований зданий и сооружений. Киев: Издательско-полиграфич. объединение «Запорожье», 2008. 490 с.
9. Цытович Н.А. Механика грунтов. Полный курс. Изд. 5-е. М., 2014. 638 с.
10. Мулин В.И. Механика грунтов для инженеров-строителей. М.: Стройиздат, 1978. 120 с.

Об авторах:

ИСАЕВ Вениамин Иванович

кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геологии, оснований и фундаментов Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

REFERENCES

1. Golubkov V. N., Dogadailo, A. I. Dudenko Y. I. Study of the deformations of the soil at the base of the stamp is the large square. *Osnovaniya, fundamenty i mehanika gruntov* [Foundation, foundations and soil mechanics], 1984, no. 5, pp. 18-21. (in Russian)
2. Guadaylo A. I., Dudenko Y. I. Study of the nature of the formation of bulk deformation of the soil at the base of stamps of different areas. *Budiveln'ni konstruktsii: Mizhvidomchij naukovo-tehnichnij zbirnik*. [Building structures: Interdepartmental scientific and technical collection], 2004, no. 61, pp. 67-74. (in Ukrainian)
3. Egorov K. E. On deformation of the base of finite thickness. *Osnovaniya, fundamenty i mehanika gruntov* [Foundation, foundations and soil mechanics], 1961, no. 1, pp. 4-6. (in Russian)
4. Konovalov P. A. *Osnovaniya i fundamenty rekonstruiemykh zdaniy. Izdanie 4-e* [Bases and foundations of reconstructed buildings. Edition 4-e]. Moscow, VNIINT-PI, publishing house "Paper Gallery", 2000. 385 p.
5. Tugaenko Y. F. Principles for the calculation of the Foundation within its nonlinear dependence on pressure. *Zbirnik naukovih prac' (galuzeve mashinobuduvannja, budivnictvo)* [Collection of scientific papers (industrial engineering, construction)], 2012, no. 4 (34). pp. 268-273. (in Ukrainian)
6. Isaev V., Maltsev A., Karpov A. Calculating Methodology of large Base slabs: compressible strata capacity and foundation settlement. MATEC Web of Conferences, 2018, no. 196, 03002. DOI: 10.1051/mateconf/201819603002.
7. Isaev V., Maltsev A., Karpov A. Theoretical basics of applying the one dimensional problem of soils compression seal theory to large foundation plates calculation. MATEC Web of Conferences, 2016, no. 86, 02021. DOI: 10.1051/mateconf/20168603001.
8. Kushner S. G. *Raschet deformacij osnovanij zdaniy i sooruzhenij* [Calculation of deformations of foundations of buildings and structures]. Association "Zaporozhye", 2008. 490 p.
9. Tsytoich N. A. *Mehanika gruntov. Polnyj kurs. Izdanie 5-e* [Soil Mechanics. Full course. Edition 5th]. Moscow, 2014. 638 p.
10. Mulin V. I. *Mehanika gruntov dlja inzhenerov-stroitelej* [Soil Mechanics for civil engineers]. Moscow, Stroyizdat, 1978. 120 p.

ISAEV Veniamin I.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Geology and Foundation Engineering Chair Samara State Technical University Academy of Architecture and Civil Engineering 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244

МАЛЬЦЕВ Андрей Валентинович

кандидат технических наук, заведующий кафедрой инженерной геологии, оснований и фундаментов Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

MALTSEV Andrey V.

PhD in Engineering Science, Head of the Geology and Foundation Engineering Chair Samara State Technical University Academy of Architecture and Civil Engineering 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244

КАРПОВ Андрей Анатольевич

учебный мастер кафедры инженерной геологии, оснований и фундаментов Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

KARPOV Andrey A.

Laboratory Instructor of the Geology and Foundation Engineering Chair Samara State Technical University Academy of Architecture and Civil Engineering 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244

Для цитирования: Исаев В.И., Мальцев А.В., Карпов А.А. Исследование метода «плавающего» фундамента по определению осадки на модели фундаментной плиты // Градостроительство и архитектура. Т. 10, № 1. С. 9–15. DOI: 10.17673/Vestnik.2020.01.2.

For citation: Isaev V.I., Maltsev A.V., Karpov A.A. Research of the “floating” base method for sedimentation on the model of the foundation plate. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2020, Vol. 10, no. 1, Pp. 9–15. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2020.01.2.

Уважаемые читатели!

Научно-технический центр «Геотехника» с лабораторией «Механика грунтов» приглашает к сотрудничеству.

Основные направления деятельности Центра:

- инженерные изыскания
- обследования зданий и сооружений
- судебная экспертиза
- консультационные услуги

Руководитель Мальцев Андрей Валентинович

Контакты:

443001, Россия, г. Самара, Молодогвардейская, 194, корпус 13 (АСА СамГТУ), каб. 0304 Б
тел. (846) 339-14-69
E-mail: geotechnika@ya.ru