УДК 624.131

© В. В. Конюшков, канд. техн. наук, доцент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: v.konyushkov@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-4-106-114

© V. V. Konyushkov, PhD in Sci. Tech, Associate Professor
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: v.konyushkov@yandex.ru

АНАЛИЗ МЕТОДОВ АНАЛИТИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ ОСАДОК ФУНДАМЕНТОВ ВО ВРЕМЕНИ

ANALYSIS OF METHODS FOR ANALYTICAL CALCULATION OF FOUNDATION SETTLEMENT IN TIME

В настоящее время существует три основных метода расчета осадок фундаментов: метод линейно деформируемого слоя (метод проф. К. Е. Егорова), метод послойного суммирования (основной метод СП 22.13330.2016) и метод одномерного компрессионного сжатия (частный случай метода эквивалентного слоя проф. Н. А. Цытовича). Все вышеназванные методы расчета осадок основаны на линейной зависимости деформаций от напряжений. Принципиальные отличия этих методов расчета заключаются в учете природных напряжений грунтов от собственного веса, способе определения сжимаемой толщи грунтов и определении распределения напряжений по глубине от внешнего давления. В практике проектирования оснований и фундаментов наиболее распространенным и авторитетным считается метод послойного суммирования. Следует отметить, что каждый метод был в свое время разработан для решения конкретных задач, однако на сегодняшний день не каждый инженер знает границы применимости того или иного метода расчета осадок. В данной статье выполнены расчеты развития нелинейной осадки фундамента во времени различными методами, проведено сравнение с фактическими деформациями по результатам длительного мониторинга за осадками известного в Санкт-Петербурге здания и даны рекомендации по применимости рассмотренных методов.

Ключевые слова: аналитические методы расчетов осадок фундаментов, конечная нелинейная осадка, прогноз развития осадки во времени.

Currently, there exist three main methods for calculating foundation settlement: the method of linearly compressible layer (introduced by Prof. K. E. Egorov), the method of layer-by-layer summation (described in SP 22.13330.2016), and the method of one-dimension virgin compression (a special case of the equivalent layer method introduced by Prof. N. A. Tsytovich). All the above-mentioned methods for calculating foundation settlement are based on the linear dependence of deformations on stresses. The principal differences between these methods are in taking the account of natural soil stress from its own weight, the technique of assessing the compressible soil strata and evaluating the distribution of stress in depth from external pressure. In the practice of bases and foundations design, the layer-by-layer summation method is considered to be the most highly reputable and widely used. It should be noted that each method was initially developed to solve some specific problem. However, not every engineer at present knows the limits of a particular method application for calculating foundation deformation. The article presents calculations of the non-linear settlement development in the foundation performed by various methods. Comparison with actual deformations is made based on the results of long-term monitoring of foundation settlement of a well-known building in Saint Petersburg, and recommendations are offered regarding the applicability of the discussed methods.

Keywords: analytical methods for calculating foundation settlement, finite nonlinear settlement, forecast of settlement development over time.

В данной работе рассматриваются результаты длительного мониторинга за осадками известного в Санкт-Петербурге здания — гостиницы «Россия», расположенной по адресу: Санкт-Петербург, пл. Чернышевского, д. 11 [1–3].

Историческая справка по зданию¹

Проблема достоверного расчета конечной осадки фундаментов во времени является актуальной задачей и в настоящее время. Для точной оценки развития осадки во времени необходимо изучать примеры из практики и сопоставлять их с существующими методами расчетов. В качестве одного из таких примеров рассмотрим здание, построенное в Ленинграде в 1962 г. в ходе застройки Московского проспекта. Конструктивная схема здания — смешанная, из сетки колонн и наружных стен. В плане здание представляет собой пять прямоугольников: центрального основного десятиэтажного корпуса и четырех двухэтажных пристроек, расположенных по его углам. Здание имеет развитую подземную часть (подвал и технический этаж) глубиной 3,75 м. Размеры основного корпуса в плане 105×14,5 м, высота — 41 м. Размеры четырех пристроек 28×9 м и 38×9 м, высота — 8 м. Фундаментная плита под основной корпус выполнена размерами в плане 110×19,5 м, толщиной 0,75 м. Глубина заложения плиты составляет 4,5 м от планировочной отметки рельефа. Проектировщиком был выбран вариант фундаментной плиты на естественном основании. В процессе строительства здания проблемы возникли сразу и выражались в резком развитии деформаций всех

фундаментов. К моменту завершения строительства четыре пристройки находились в аварийном состоянии из-за неравномерных деформаций и их пришлось со временем демонтировать и заново восстанавливать. Эксплуатация основного корпуса здания продолжается до настоящего времени².

Инженерно-геологические изыскания для проектирования фундаментов

Достаточность и достоверность инженерно-геологических изысканий являются одним из самых важнейших условий для выбора правильного конструктивного решения при проектировании фундаментов. К сожалению, иногда проведенные инженерные изыскания не отвечают необходимым и достаточным требованиям для проектирования фундаментов [4–8].

В табл. 1 приведены нормативные и расчетные характеристики грунтов для геологического разреза I–I. На рис. 1 приведен инженерно-геологический разрез I–I.

Из рис. 1 видно, что площадку слагают:

- ИГЭ-1, насыпные грунты ($tg IV$);
- ИГЭ-2, суглинки мягкопластичные ($lg IV$);
- ИГЭ-3, суглинки тугопластичные ($g III lz$);
- ИГЭ-4, полутвердые глины (vkt_2).

Грунты в основании фундаментов являются сильнодеформируемыми с модулем деформации 6500 кПа. Общая мощность сильнодеформируемых грунтов составляет 20,8 м.

В табл. 2 приведены нормативные и расчетные характеристики грунтов для геологического

¹ Сотников С. Н. Строительство и реконструкция фундаментов зданий и сооружений на слабых грунтах: дис. ... д-ра техн. наук. Л., 1986. 440 с.

² Техническое обследование здания гостиницы «Россия», расположенного по адресу: Санкт-Петербург, пл. Чернышевского, д. 11 / НИИ «Центр Геотехнологий», СПбГАСУ. СПб., 2004.

Таблица 1

Нормативные и расчетные характеристики грунтов для геологического разреза I–I

№ ИГЭ	Геологический индекс	Послойное наименование грунтов	Предельное состояние	Удельный вес γ , кН/м ³	Показатель консистенции	Показатели прочности		Модуль деформации E_0 , кПа
					I_L	ϕ , град	c , кПа	
1	$tg IV$	Насыпные грунты	–	17,5	–	–	–	–
2	$lg III$	Суглинки легкие пылеватые мягкопластичные	I	18,8	0,74	11	4	6500
			II	19,3		12	5	
3	$g III lz$	Суглинки тяжелые пылеватые тугопластичные	I	20,5	0,34	12	5	6500
			II	20,7		12	6	
4	$V kt_2$	Глины пылеватые полутвердые	I	20,8	0,13	17	13	20 000
			II	21,0		21	29

Рис. 1. Геологический разрез I–I

го разреза II–II. На рис. 2 приведен инженерно-геологический разрез II–II.

Из рис. 2 видно, что площадку слагают:

- ИГЭ-1, насыпные грунты (*tg IV*);
- ИГЭ-2,3, суглинки текучепластичные и мягкопластичные (*lg IV*);
- ИГЭ-4, суглинки тугопластичные (*g III lz*);
- ИГЭ-5, полутвердые глины (*V kt₂*).

Грунты в основании фундаментов являются сильнодеформируемыми с модулем деформации 5000 кПа. Общая мощность сильнодеформируемых грунтов составляет 20,6 м.

Вышеприведенные разрезы и характеристики грунтов на данной площадке были предоставлены двумя различными организациями. При сравнении свойств грунтов и геологических раз-

Таблица 2

Расчетные характеристики грунтов для геологического разреза II–II

№ ИГЭ	Геологический индекс	Послойное наименование грунтов	Предельное состояние	Удельный вес γ , кН/м ³	Показатель консистенции I_L	Показатели прочности		Модуль деформации E_0 , кПа
						ϕ , град	c , кПа	
1	<i>tg IV</i>	Насыпные грунты	–	17,5	–	–	–	–
2	<i>lg III</i>	Суглинки тяжелые пылеватые текучепластичные	I	17,9	0,94	7	3	5000
			II	18,2		7	5	
3	<i>lg III</i>	Суглинки легкие пылеватые мягкопластичные	I	18,8	0,74	11	4	6500
			II	19,3		12	5	
4	<i>g III lz</i>	Суглинки легкие пылеватые тугопластичные	I	20,5	0,34	12	5	9500
			II	20,7		12	8	
5	<i>V kt₂</i>	Глины пылеватые полутвердые	I	20,8	0,13	17	13	20 000
			II	21,0		21	29

Рис. 2. Геологический разрез II–II

резов было установлено, что мощности сильно-деформируемых грунтов совпадают, но отличается количество инженерно-геологических элементов и их характеристики. Далее с помощью выполненных расчетов будет показано влияние этих отличий на величину конечной нелинейной осадки фундаментов.

Сравнительные расчеты конечной осадки фундаментов различными методами

Метод линейно деформируемого слоя (метод проф. К. Е. Егорова)

Метод линейно деформируемого слоя предназначен для расчета осадки фундаментной плиты на естественном основании с шириной более 10 м и модулем деформации в основании более 10 000 кПа. Осадка рассчитывается по формуле [9]

$$S = \frac{P_{II} b k_c}{k_m} \sum_{i=1}^n \frac{k_i - k_{i-1}}{E_{0i}}, \quad (1)$$

где P_{II} — среднее давление под подошвой фундамента, кПа; b — ширина подошвы фундамента, м; k_c — коэффициент, зависящий от отношения сжимаемой толщи к ширине подошвы фундамента; $k_m = 1,0$ — коэффициент, зависящий от ширины подошвы фундамента и модуля общей

деформации грунтов в основании; k_i и k_{i-1} — коэффициенты, зависящие от соотношения сторон фундамента и относительной глубины, на которой расположены подошва и кровля i -го слоя соответственно; E_{0i} — модуль общей деформации i -го слоя грунта, кПа.

Метод послойного суммирования (метод линейно деформируемого полупространства)

Метод послойного суммирования применяется для расчета осадки всех типов фундаментов (при котлованах глубиной менее 5 м) по формуле [9]

$$S = \beta \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{zp,i} h_i}{E_{0i}}, \quad (2)$$

где β — безразмерный коэффициент, принимаемый равным 0,8; $\sigma_{zp,i}$ — среднее значение вертикального напряжения в i -м слое грунта по вертикали, кПа; h_i — толщина i -го слоя, м; E_{0i} — модуль общей деформации i -го слоя грунта по ветви первичного нагружения, кПа.

Метод одномерного компрессионного сжатия (частный случай метода эквивалентного слоя проф. Н. А. Цытовича)

Профессор Н. А. Цытович предложил для расчета осадок метод эквивалентного слоя с различными частными случаями, учитывающими

ширину подошвы фундамента, площадь загрузки, слоистое напластование грунтов, прогноз развития осадки во времени и т. д. Осадку фундаментной плиты с большой площадью загрузки и сильнодеформируемыми грунтами в основании можно приравнять к случаю сплошной нагрузки без возможности бокового расширения грунта (метод одномерного компрессионного сжатия) и рассчитать по формуле [9]

$$S = \frac{P_{II} H \beta}{E_{0i}}, \quad (3)$$

где P_{II} — среднее давление под подошвой фундамента, кПа; H — сжимаемая толща грунтов, м; β — безразмерный коэффициент, учитывающий невозможность бокового (поперечного) расширения грунта, зависящий от коэффициента Пуассона; E_{0i} — модуль общей деформации грунта, кПа.

В табл. 3 приведены результаты расчетов осадки фундаментной плиты различными методами по двум геологическим разрезам. Как видно из табл. 3, полученные осадки значительно отличаются в зависимости от метода расчета и принимаемого геологического разреза. Следует учесть, что давление под подошвой фундаментной плиты превышает расчетное сопротивление грунта ($P_{II} > R$), что говорит о необходимости расчета осадки, значительно превышающей пределы линейной зависимости между давлением и расчетным сопротивлением.

Методы определения конечной нелинейной осадки

Конечную нелинейную осадку основания S_p при давлении под подошвой фундамента P_{II} , превышающем расчетное сопротивление грунта основания R , можно рассчитать по указаниям СП 23.13330.2018 по формуле

$$S_p = SK_p, \quad (4)$$

где S — осадка, рассчитанная стандартными методами, мм; K_p — коэффициент нелинейности, принимаемый по графику на рис. 3.

Конечную нелинейную осадку основания S_p можно также определить по формуле из Пособия по проектированию оснований зданий и сооружений или по рекомендациям из монографии [10]:

$$S_p = S \left[1 + \frac{(P_{пр} - R)(P_{II} - R)}{(R - \sigma_{zg0})(P_{пр} - P_{II})} \right], \quad (5)$$

где S — линейная осадка основания, вычисляемая стандартными методами, мм; $P_{пр}$ — предельное сопротивление грунта основания, определяемое как отношение силы предельного сопротивления основания к приведенной площади подошвы фундамента $N_u/b'l'$, кПа; R — расчетное сопротивление грунта в основании фундамента, кПа; P_{II} — среднее давление под подошвой фундамента, превышающее R , кПа; σ_{zg0} — природное напряжение от собственного веса грунта на уровне подошвы фундамента, кПа.

В табл. 4 приведены результаты расчета конечной нелинейной осадки по двум геологическим разрезам и двум методам (в качестве конечных линейных осадок приняты максимальные значения, полученные по двум геологическим разрезам).

Как видно из табл. 4, значения конечных нелинейных осадок также имеют значительные отличия.

Сравнение прогноза развития нелинейной осадки во времени с результатами мониторинга за деформациями фундаментов

Для прогноза скорости развития нелинейной осадки во времени выберем максимальные полученные значения осадок 510 мм (по геологическому разрезу I–I) и 370 мм (по геологическому разрезу II–II). Зная величину конечной осадки, можно рассчитать ее развитие во времени по формуле [9]

$$S_t = US_p, \quad (6)$$

где U — степень уплотнения (степень консолидации от 0,1 до 0,95); S_p — величина конечной осадки, мм.

Время развития деформаций грунта определяется по формуле

$$t = \frac{4H^2}{\pi^2 c_v} N, \quad (7)$$

где H — мощность сжимаемой толщи, м; N — параметр, учитывающий одностороннюю фильтрацию; c_v — коэффициент консолидации, м²/год, равный

$$c_v = \frac{k_f}{m_{vm} \gamma_w}, \quad (8)$$

где k_f — коэффициент фильтрации грунта, м/год; m_{vm} — коэффициент относительной сжимаемости грунта, 1/кПа; γ_w — удельный вес воды, кН/м³.

Таблица 3

Результаты расчетов осадки различными методами по двум геологическим разрезам

Геологический разрез	Значения осадок, мм		
	Метод линейно деформируемого слоя (проф. К. Е. Егорова)	Метод послойного суммирования (линейно деформируемого полупространства)	Метод одномерного компрессионного сжатия (проф. Н. А. Цытовича)
I	200	270	380
II	210	190	280

Рис. 3. График для определения коэффициента нелинейности осадки по указаниям СП 23.13330.2018

На рис. 4 приведен график развития осадки во времени. Кривые 1, 2 построены по результатам геодезического мониторинга за осадками фундамента на период с 1963 по 2019 г. Кривые 3, 4 построены по результатам выполненных расчетов. Как видно из рис. 4, скорости развития фактических кривых 1, 2 значительно отличаются от расчетной кривой 4, но имеют близкие численные значения с кривой 3. На рис. 5 приведена схема здания с эпюрами развития осадок во времени, мм, по результатам геодезического мониторинга с 1963 по 2019 г.

Заключение

На основании вышеприведенных результатов исследования можно сделать следующие выводы:

1. Метод линейно деформируемого слоя (метод проф. К. Е. Егорова) следует применять для расчета осадки плиты на естественном основании со среднедеформируемыми грунтами (модуль деформации более 10 МПа). Для сильнодеформируемых грунтов метод дает большую погрешность из-за ограничения глубины сжимаемой толщи.

2. Метод послойного суммирования дает приемлемую погрешность в расчетах осадки при следующих условиях:

- давление под подошвой фундамента меньше расчетного сопротивления грунта;
- расчетная осадка фундамента меньше предельно допустимой, устанавливаемой СП 22.13330.2016;
- неравномерности осадок не превышают предельно допустимых значений, регламентированных СП 22.13330.2016;
- модуль деформации несущих и подстилающих грунтов в основании фундаментов более 10 МПа;
- сжимаемая толща грунтов четко выражена в геологических условиях площадки;
- нет дополнительных факторов влияния природного и техногенного характера на вариатив-

Таблица 4

Результаты расчетов конечной нелинейной осадки по методу СП 23.13330.2018 и по методу из Пособия по проектированию оснований зданий и сооружений

Геологический разрез	Значение конечной нелинейной осадки по методу СП 23.13330.2018, мм	Значение конечной нелинейной осадки по методу из Пособия, мм
I	456	510
II	364	370

ные изменения давления, напряжения, свойств грунтов и т. д.

3. Метод одномерного компрессионного сжатия (частный случай метода эквивалентного слоя проф. Н. А. Цытовича) рекомендуется применять при следующих условиях:

- давление по подошве фундамента превышает расчетное сопротивление грунта в его основании;
- значения модулей общей деформации несущих и подстилающих слоев грунтов под подошвой фундаментов менее 10 МПа;
- известно точное значение глубины сжимаемой толщи грунтов;
- для прогноза длительного развития осадки во времени.

4. Нормативные методы расчетов конечной нелинейной осадки (из СП 23.13330.2018 и Пособия по проектированию оснований зданий и сооружений) являются приближенными решениями и по сути дают лишь очередные коэффициенты пропорциональности для условного перерасчета линейной осадки в нелинейную. В связи с этим нелинейную работу основания рекомендуется учитывать в особых случаях, например для объектов пониженного уровня ответствен-

сти, на объектах реконструкции, где нелинейная работа основания фундаментов уже заложена исторически, при соответствующем научно-техническом обосновании на объектах со сложной категорией инженерно-геологических условий и уникальными конструктивными решениями зданий или сооружений и т. д.

5. Существующие методы прогноза осадки во времени сильно привязаны к величине конечной нелинейной осадки, что дает значительную погрешность, так как по сути все регламентируемые методы основаны на линейной зависимости деформаций от напряжений. Наиболее значимыми параметрами, влияющими на развитие осадки во времени, являются: давление от веса здания, деформируемость грунтов (модули общей деформации в пределах активной сжимаемой толщи грунтов) и коэффициент фильтрации грунтов. При этом если давление и деформируемость грунтов относятся к стандартным и достаточно точным характеристикам, то значения коэффициента фильтрации могут отличаться в 10–1000 раз. Связано это с тем, что коэффициент фильтрации — эмпирическая величина, которая определяется только в полевых условиях, так как зависит от гидрогеологических условий площад-

Рис. 4. График развития осадки во времени:

1, 2 — осадки крайних точек напротив центра тяжести фундаментной плиты основного корпуса по результатам мониторинга; 3 — расчетная аналитическая кривая развития осадки во времени по геологическому разрезу I–I; 4 — расчетная аналитическая кривая развития осадки во времени по геологическому разрезу II–II

Рис. 5. Схема здания с эпюрами развития осадок во времени, мм, по результатам геодезического мониторинга с 1963 по 2019 г.*

* Чесноков А. С. Прогноз деформаций здания гостиницы «Россия» по результатам полевых наблюдений: выпускная квалификационная работа. СПб.: СПбГАСУ, 2019. 81 с.

ки, скорости и величины прикладываемых давлений, нейтрального и эффективного напряжений в грунте и т. д.

6. Исходя из рассмотренного примера и, к сожалению, далеко не единственного здания с такой ситуацией в Санкт-Петербурге, проектировщикам, разрабатывающим конструктивные решения фундаментов для нового строительства, можно дать следующую важную рекомендацию: не принимать конструктивные решения фундаментов, при которых расчетная осадка пусть и незначительно, но превышает регламентируемую величину, так как в этом случае возможны следующие риски:

- ошибки в расчетах в сторону перегрузки основания фундаментов;

- превышение относительной неравномерности осадок;
- длительное развитие осадки во времени.

Библиографический список

1. Мангушев Р. А., Осокин А. И., Сотников С. Н. Геотехника Санкт-Петербурга. Опыт строительства на слабых грунтах. М.: АСВ, 2018. 386 с.
2. Лушников В. В., Ярдяков А. С. Анализ расчетов осадок в нелинейной стадии работы грунта // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2014. № 2. С. 44–55.
3. Лушников В. В., Кириллов В. М., Конюшков В. В. Адаптивное управление параметров фундаментов и оснований // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 5 (76). С. 119–124.

4. Шашкин А. Г. Проектирование зданий и подземных сооружений в сложных инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга. М.: Гео-маркетинг, 2014. 352 с.

5. Конюшков В. В., Веселов А. А., Белый А. А. Инженерное основание и благоустройство территории на зольных грунтах для расширения контейнерного терминала морского порта в Санкт-Петербурге // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 3 (62). С. 70–76.

6. Мангушев Р. А., Конюшков В. В., Сапин Д. А. Инженерно-геотехнические изыскания при реконструкции и новом строительстве в условиях плотной городской застройки // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 5. С. 76–83.

7. Мангушев Р. А., Сахаров И. И., Конюшков В. В., Ланько С. В. Сравнительный анализ численного моделирования системы «здание–фундамент–основание» в программных комплексах SCAD и PLAXIS // Вестник гражданских инженеров. 2010. № 3 (24). С. 96–101.

8. Мангушев Р. А., Никифорова Н. С., Конюшков В. В., Осокин А. И., Сапин Д. А. Проектирование и устройство подземных сооружений в открытых котлованах. М.: АСВ, 2013. 254 с.

9. Ильичев В. А., Мангушев Р. А. и др. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения. М.: АСВ, 2016. 1031 с.

10. Малышев М. В., Болдырев Г. Г. Механика грунтов. Основания и фундаменты (в вопросах и ответах). М.: АСВ, 2004. 319 с.

References

1. Mangushev R. A., Osokin A. I., Sotnikov S. N. *Geotekhnika Sankt-Peterburga. Opyt stroitel'stva na slabykh gruntakh* [Geo-engineering in Saint Petersburg. Experience of construction on weak soils]. Moscow, ASV Publ., 2018, 386 p.

2. Lushnikov V. V., Yardyakov A. S. *Analiz raschetov osadok v nelineynoy stadii raboty grunta* [Analysis of the settlement calculations in non-linear stage of soil performance]. *Vestnik PNIPU. Stroitel'stvo i arkhitektura – Analysis of the settlement calculations in non-linear stage of soil*, 2014, no. 2, pp. 44–55.

3. Lushnikov V. V., Kirillov V. M., Konyushkov V. V. *Adaptivnoe upravlenie parametrov fundamentov i*

osnovaniy [Adaptive control of parameters of foundations and bases]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2019, no. 5 (76), pp. 119–124.

4. Shashkin A. G. *Proektirovaniye zdaniy i podzemnykh sooruzheniy v slozhnykh inzhenerno-geologicheskikh usloviyakh Sankt-Peterburga* [Design of buildings and underground structures in complex engineering and geological conditions of St. Petersburg]. Moscow, Geomarketing Publ., 2014, 352 p.

5. Konyushkov V. V., Veselov A. A., Beliy A. A. *Inzhenernoye osnovaniye i blagoustroystvo territorii na zol'nykh gruntakh dlya rasshireniya konteynernogo terminala morskogo porta v Sankt-Peterburge* [Engineering development and landscaping of the territory on the ash soils for extension of the container terminal at the sea port in Saint Petersburg]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 3 (62), pp. 70–76.

6. Mangushev R. A., Konyushkov V. V., Sapin D. A. *Inzhenerno-geotekhnicheskie izyskaniya pri rekonstruktsii i novom stroitel'stve v usloviyakh plotnoy gorodskoy zastroyki* [Geotechnical surveys during reconstruction and new construction in dense urban development]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and civil construction*, 2016, no. 5, pp. 76–83.

7. Mangushev R. A., Sakharov I. I., Konyushkov V. V., Lan'ko S. V. *Sravnitel'niy analiz chislennoy modelirovaniya sistemy «zdanie–fundament–osnovaniye» v programmnykh kompleksakh SCAD i PLAXIS* [Comparative analysis of computational modeling of the system “building–foundation–base” in the software packages SCAD and PLAXIS]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2010, no. 3 (24), pp. 96–101.

8. Mangushev R. A., et al. *Proektirovaniye i ustroystvo podzemnykh sooruzheniy v otkrytykh kotlovanakh* [Design and construction of underground structures in open pits]. Moscow, ASV Publ., 2013, 254 p.

9. Il'ichev V. A., et al. *Spravochnik geotekhnika. Osnovaniya, fundamenty i podzemnye sooruzheniya* [Handbook of geotechnical engineering specialist. Bases, foundations, and underground structures]. Moscow, ASV Publ., 2016, 1031 p.

10. Malyshev M. V., Boldyrev G. G. *Mekhanika gruntov. Osnovaniya i fundamenty (v voprosakh i otvetakh)* [Soil mechanics. Bases and foundations (in questions and answers)]. Moscow, ASV Publ., 2004, 319 p.