



УДК 624.159.4

Мирсаяпов И.Т. – доктор технических наук, профессор

E-mail: mirsayapov@kgasu.ru

Нуриева Д.М. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: danm_n@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

Численные исследования осадок оснований глубоких фундаментов высотных зданий

Аннотация

В работе проведены результаты численных исследований осадок основания фундамента высотного здания. При моделировании здания рассматривалась единая система «здание – фундамент – грунт», в которой податливые свойства грунта учитывались с помощью коэффициентов постели. При вычислении коэффициентов были использованы методы Винклера и Пастернака с учетом изменения модулей объемных и сдвиговых деформаций при режимном нагружении в соответствии с моделью, разработанной И.Т. Мирсаяповым и И.В. Королевой. Расчетные значения осадок были сопоставлены с реальными, полученными в процессе мониторинга здания, проводимого научно-исследовательским институтом оснований и подземных сооружений (НИИОСП) им. Н.М. Герсеванова.

Ключевые слова: осадка, модуль деформации, плитный фундамент, крен, высотное здание, коэффициенты постели, «стена в грунте».

В современных условиях грунтовые основания фундаментов зданий и сооружений подвергаются воздействию разного рода статических и динамических нагрузок при их различных сочетаниях. Существующие методы расчета оснований по деформациям разработаны для случая однократного кратковременного статического нагружения с постоянными параметрами на весь период эксплуатации. В реальных же условиях строительства и эксплуатации нагрузки на грунтовое основание прикладываются поэтапно по мере возведения здания или сооружения. При этом этапы активного нагружения в период строительства переходят в этапы длительной выдержки под нагрузкой. В связи с этим возникает необходимость усовершенствования методики расчета осадок оснований фундаментов при режимных длительных статических нагружениях. Эта задача особенно актуальна для высотных зданий с развитой подземной частью, с основаниями сложенными глинистыми грунтами, напряженно-деформированное состояние которых меняется во времени и зависит от истории предшествующего нагружения. В связи с этим были проведены численные исследования осадок основания фундамента высотного здания с использованием различных расчетных моделей, в том числе модифицированной модели Пастернака на основе расчетной модели грунта при трехосном режимном нагружении [1-3]. Характеристики высотного здания и грунтового основания были представлены организаторами круглого стола К4 «Анализ инженерных кейсов. Расчет фундамента высотного здания» в рамках Международного форума высотного и уникального строительства 100+FORUM RUSSIA, проходившего 23-25 сентября 2015 г. в г. Екатеринбурге [4].

Исследуемое здание имеет каркасно-стенную систему, выполнено из монолитного железобетона и обладает следующими параметрами: общая высота 144,9 м (39 этажей); количество подземных этажей – 4; глубина заложения фундамента – 15,15 м; площадь плитного фундамента – 1377 м²; колонны, внутренние и наружные стены подземной части выполнены с применением бетона класса В40, плиты перекрытий – В30, лестничные площадки и марши – В25; здание имеет распределительный технический этаж с плитой перекрытия толщиной 2100 мм, обеспечивающий передачу нагрузки с надземной части на подземную; толщина фундаментной плиты – 2000 мм. Выше подошвы фундамента залегают насыпные грунты (НС), суглинки мягкопластичные (ИГЭ-2); супеси пластичные (ИГЭ-3); пески мелкие средней плотности, рыхлые (ИГЭ-4, ИГЭ-4а); пески гравелистые

средней плотности (ИГЭ-5). Основанием фундамента служат пылеватые плотные пески (ИГЭ-6) и юрские глины (ИГЭ-7, ИГЭ-8, ИГЭ-9). По данным инженерно-геологических изысканий они имеют следующие характеристики (при $\alpha = 0,85$).

Таблица 1

Характеристики грунтов основания фундамента

№ ИГЭ	Наименование грунта	γ , т/м ³	E, МПа	j , град	C, кПа
ИГЭ-6	Пески пылеватые плотные	2,03	32	36	4
ИГЭ-7	Глина полутвердая	1,96	23	23	67
ИГЭ-8	Суглинок тугопластичный	1,94	22	26	43
ИГЭ-9	Глина твердая	1,72	25	19	86

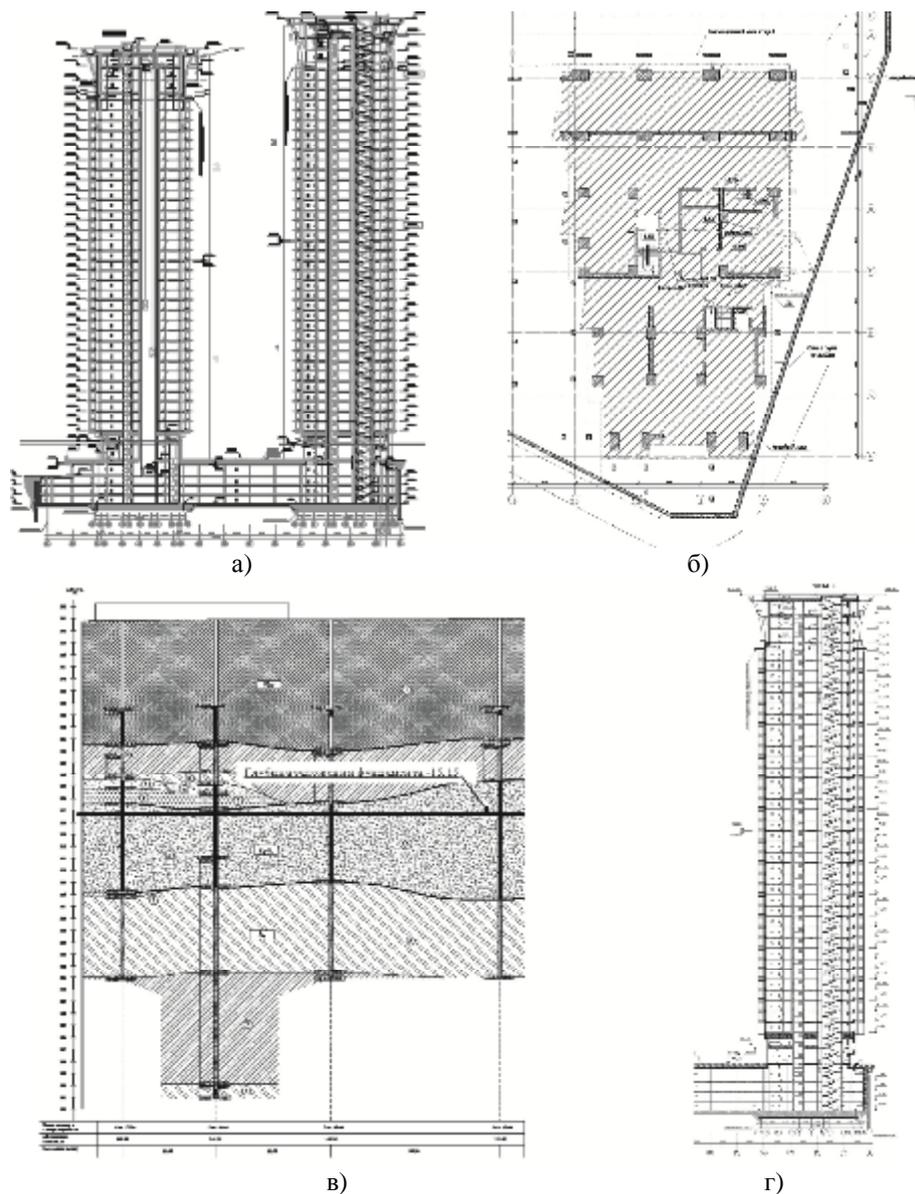


Рис. 1.

а) высотные здания жилого комплекса; б) контур исследуемого здания;
в) характерный геологический разрез площадки строительства; г) разрез здания

Учитывая то, что через 35 месяцев с начала строительства нагрузка от здания составила 75 % от полной, в расчете были приняты следующие нагрузки: нормативная нагрузка на типовой верхний этаж с учетом веса несущих конструкций 13,65 кПа; нормативная нагрузка на подземный этаж с учетом веса несущих конструкций

14,35 кПа; общий вес здания без учета веса фундамента 82620 т; среднее давление по подошве фундамента без учета его веса 60 т/м^2 ; среднее давление под подошвой фундамента с учетом веса фундамента и пола $64,59 \text{ т/м}^2$. Давление ветра не учитывалось.

При исследовании осадок здания были рассмотрены следующие расчетные модели:

1. Плитный фундамент в виде штампа;
2. Пространственная модель каркаса, включающая в себя только подземные, 1 надземный, технический (распределительный) этажи и фундамент на упругом основании, заданном в виде коэффициентов постели;
3. Пространственная модель полного здания с фундаментом на упругом основании, заданном в виде коэффициентов постели.

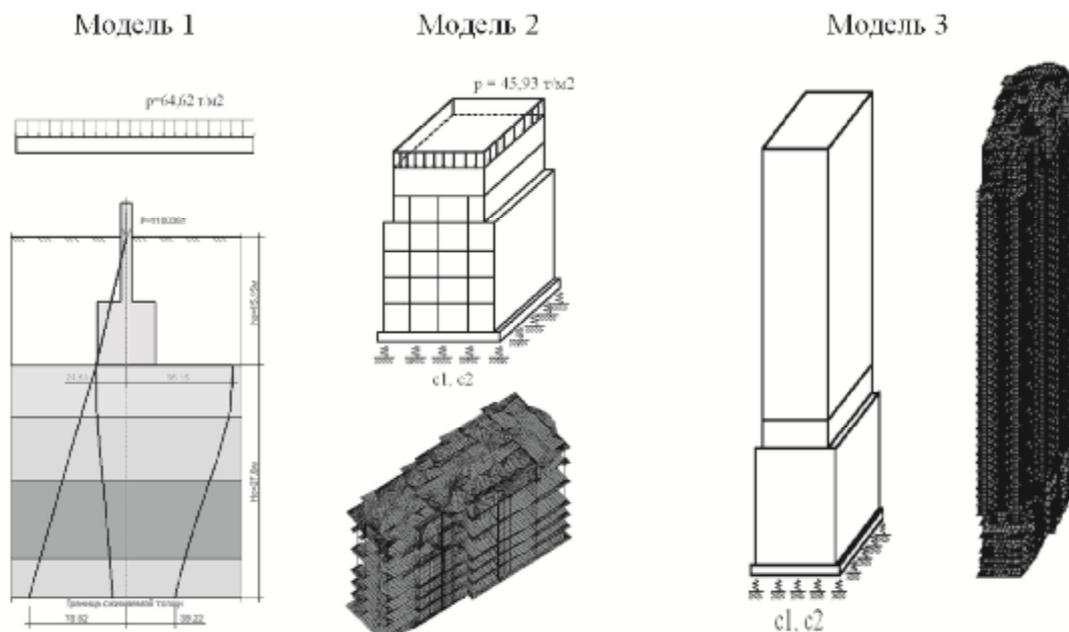


Рис. 2. Рассмотренные расчетные модели

В 1-ой модели расчет фундамента производился как для штампа, нагруженного равномерно распределенной нагрузкой $64,62 \text{ т/м}^2$, методом послойного суммирования по схеме линейно-деформируемого полупространства, регламентированного сводом правил СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений». Во 2-ой и 3-й схемах расчет осадки производился с использованием программного комплекса ЛИРА-САПР 2014, реализующего метод конечных элементов. При этом в структуре программы были созданы пространственные модели всего здания (или его части), в которой колонны моделировались балочными стержневыми элементами, плиты перекрытия (покрытия) элементами оболочки, фундамент и плита перекрытия распределительного этажа – элементами толстой оболочки. Во 2-ой модели рассматривалась только нижняя часть каркаса (включая первый и распределительный этажи), в которой нагрузка от верхней части здания передавалась в виде равномерно распределенного давления $p = 45,93 \text{ т/м}^2$, действующего на распределительную плиту технического этажа толщиной 2100 мм на отметке 9.600. В 3-ей модели был создан полный каркас здания, позволяющий автоматически передать нагрузки с верхних этажей на нижние. Данные модели были созданы для оценки влияние жесткости надземной части здания на осадку фундамента. Податливые свойства грунта в обеих моделях учитывались с помощью коэффициентов постели c_1 и c_2 , вычисленных по методам Пастернака, Винклера и модифицированному методу Пастернака. Поскольку напластование грунтов основания в пределах строительной площадки равномерно, коэффициенты были приняты постоянными по всей площади подошвы фундамента.

Как известно, метод Пастернака [5] описывает работу грунта с помощью коэффициента сжатия c_1 , связывающего интенсивность вертикального отпора грунта с его осадкой, и коэффициента сдвига c_2 , характеризующего вертикальные силы сдвига,

возникающие в сыпучих и малосвязных грунтах вследствие зацепления и внутреннего трения между его частицами. Эти коэффициенты определялись по формулам:

$$c_1 = \frac{E_{zp}}{H_c(1-2m_{bp})}, \quad c_2 = \frac{c_1 \times H_c(1-2m_{bp})}{6(1+m_{bp})}, \quad (1)$$

где средний модуль деформации и коэффициент Пуассона в пределах сжимаемой толщи:

$$E_{zp} = \frac{0.8 \sum_{i=1}^n s_{zp,i} \times h_i}{s}, \quad m_{bp} = \frac{\sum_{i=1}^n \eta_i \times h_i}{H_c}. \quad (2)$$

При использовании модифицированного метода Пастернака [6] коэффициенты постели, определялись также по формулам (1), однако для определения среднего модуля деформации вводился поправочный коэффициент u к величине модуля деформации i -го подслоя. Этот коэффициент изменялся по закону квадратной параболы от $u = 1$ на уровне подошвы фундамента до $u = 12$ на уровне уже вычисленной границы сжимаемой толщи и определялся по формуле: $u = \frac{11z^2}{H_c^2} + 1$. При этом модуль деформаций: $E_{zp} = H_c \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{u_i E_i}$.

При использовании метода Винклера [6-8] применялся только коэффициент сжатия:

$$c_1 = \frac{P}{s}. \quad (3)$$

В формулах (2, 3) s – средняя осадка фундамента; в данных исследованиях вычислялась методом послойного суммирования на основе СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений».

Расчеты каждой модели (рис. 2) проводились в двух вариантах. В одном варианте при вычислении коэффициентов постели задавались модули деформации грунтов основания E , принятые на основании данных инженерно-геологических изысканий (табл. 1). В другом – значения $E1$, полученные на основе модели грунта при трехосном режимном нагружении с учетом пространственного напряженно-деформированного состояния грунта в каждой точке основания, этапности нагружения и изменения реологических свойств грунтов, включая ползучесть, разуплотнение и уплотнение при длительном действии нагрузки в соответствии с рекомендациями [1-3]. Коэффициенты постели представлены в табл. 2, результаты расчетов осадок фундамента – в табл. 3-5.

При определении $E1$ уравнение изменения модулей деформаций грунта представлялись в виде:

$$K_v(t,t) = \frac{Ds_v(t,t)}{De_v(t,t)}; \quad (4)$$

$$G_v(t,t) = \frac{Ds_i(t,t)}{3De_i(t,t)}; \quad (5)$$

где $K_v(t,t)$, $G_v(t,t)$ – объемные модули сжатия и сдвига грунта, соответственно;

$Ds_v(t,t)$ – приращения средних напряжений;

$Ds_i(t,t)$ – приращения интенсивности напряжений;

$De_v(t,t)$ – приращения объемных деформаций;

$De_i(t,t)$ – приращение интенсивности деформаций;

t – время, соответствующее моменту наблюдения;

t – время, соответствующее началу приложения нагрузки.

Таблица 2

Расчетные коэффициенты постели

Метод расчета	E		E1	
	c1, т/м ³	c2, т/м	c1, т/м ³	c2, т/м
Пастернака	207,4	10177,1	248,9	12212,5
Винклера	233,8	–	280,5	–
Пастернака модифицированный	405,7	19906,4	486,8	21897,1

Таблица 3

Результаты расчет осадки на основе СП 22.13330.2011 методом послойного суммирования по схеме линейно деформируемого полупространства. Модель 1 (штамп)

Модули деформации грунтов	Средняя осадка, S , мм	Мощность сжимаемой толщи H_c , м
E	276	23,4
E1	230	23,4

Таблица 4

Значения осадок и крена фундамента при различных методах вычисления коэффициентов постели. Модель 2 (учтена жесткость подземной части)

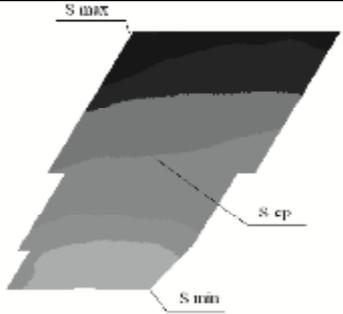
Модули деформации грунта	Осадка фундамента, мм			Крен i	Перемещения фундаментной плиты	
	S_{max}	S_{min}	S_{cp}			
Метод Пастернака						
E	328	297	312	0,000539		
E1	273	247	260	0,000452		
Метод Винклера						
E	291	263	277	0,000487		
E1	243	219	231	0,000417		
Метод Пастернака модифицированный						
E	169	151	160	0,000312		
E1	141	126	133	0,000260		

Таблица 5

Значения осадок и крена фундамента при различных методах вычисления коэффициентов постели. Модель 3 (учтена жесткость полного каркаса)

Модули деформации грунта	Осадка фундамента, мм			Крен i	Деформированное состояние каркаса	
	S_{max}	S_{min}	S_{cp}			
Метод Пастернака						
E	334	280	307	0,00093		
E1	275	247	261	0,00484		
Метод Винклера						
E	298	259	278	0,00067		
E1	249	216	232	0,00057		
Метод Пастернака модифицированный						
E	169	151	160	0,00312		
E1	141	126	133	0,0026		

Анализ результатов расчета показал, что значения средних осадок, полученных с использованием метода Винклера, максимально приближены к значениям, полученным методом послойного суммирования, регламентированного сводом правил СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений» (различие не более 0,5 %). Метод Пастернака дает завышенные значения. Анализ также показал, что для получения расчетных осадок, отражающих реальную картину деформирования основания фундаментов, требуется в расчетных моделях учитывать жесткость здания. При этом нет необходимости учитывать влияние жесткости всей конструкции. Достаточно учесть работу нижних подземных этажей. Как видно из таблиц, средние и максимальные осадки, полученные с использованием моделей 2 и 3, очень близки. Поэтому в дальнейших исследованиях в целях упрощения использовалась модель 2, включающая в себя только фундамент, подземные, первый надземный и второй технический распределительный этажи (рис. 2) с применением модифицированного метода Пастернака.

Вблизи исследуемого здания существует ограждающая конструкция в виде монолитной железобетонной «стены в грунте» толщиной 0,8 м и глубиной 35 м, обеспечивающая устойчивость стен котлована в период производства работ нулевого

цикла (рис. 1б). Учитывая, что грунты ниже подошвы фундамента в зоне примыкания «стены в грунте» находятся в стесненных условиях и подвергаются большому боковому давлению в процессе приложения вертикальных нагрузок от здания, можно предполагать, что параметры сжимаемости грунтов будут переменными. В расчете это было учтено путем введения различных коэффициентов постели под основной площадью фундамента и зоной влияния стены (рис. 3 а, б). При этом использовалась вышеизложенная модель грунта при трехосном нагружении с учетом изменения горизонтальных напряжений S_x и S_y из-за влияния ограждающей стенки котлована. Полученные результаты расчета отображены в табл. 6 и на рис. 3. Анализ результатов показал, что при учете работы «стены в грунте» картина деформирования фундаментной плиты качественно меняется. При этом наблюдается хорошая сходимость расчетных результатов с данными геотехнического мониторинга, проводимого НИИОСП им. Н.М. Герсеванова [4]. На июль 2015 года (35 месяцев с момента строительства) реальная средняя осадка здания составила 132 мм, максимальная осадка – 157 мм, крен 0,00059. То есть отклонение расчетных значений от экспериментальных по средней осадке составила не более 1 %, по максимальной – не более 10 %.

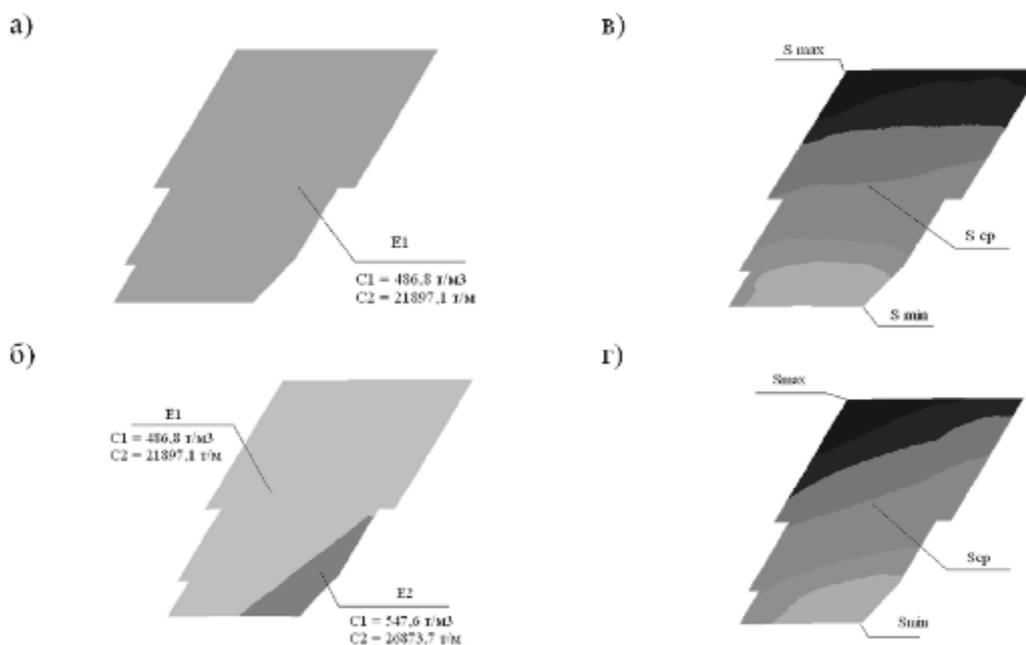


Рис. 3.

- а) расчетное распределение коэффициентов постели без учета «стены в грунте»
- б) то же с учетом «стены в грунте»
- в, г) характерная картина вертикальных перемещений фундаментной плиты и основания без учета и с учетом влияния «стены в грунте»

Таблица 6

Сопоставление расчетных и экспериментальных значений осадок фундамента здания

Методы расчета	Модуль деформаций грунтов	S_{max} , мм	S_{min} , мм	$S_{ср}$, мм
Данные мониторинга	–	157	–	132
Методика СП 22.13330.2011 (штамп)	Е	–	–	276 (+109 %)
	Е1	–	–	230 (+75 %)
Предлагаемый метод без учета влияния «стены в грунте»	Е1	141 (-10,2 %)	126	133 (+0,75 %)
Предлагаемый метод с учетом влияния «стены в грунте»	Е1	143 (-9 %)	121	132 (0 %)

*Примечание: в скобках дано отклонение результатов расчета от данных мониторинга;

Е – заложенные в расчет модули деформации грунтов основания фундамента, полученные на основе данных инженерно – геологических изысканий;

Е1 – модули деформации грунтов, полученные на основе модели грунта при трехосном режимном нагружении.

Проведенные численные исследования позволили сделать выводы:

1. Выполненные численные исследования осадок основания фундамента высотного здания на основе предложенной модели позволили получить результаты расчета, имеющие хорошую сходимость с данными мониторинга. Отклонение расчетной средней осадки от реальной составило не более 1 %.

2. Расчет плитного фундамента методом послойного суммирования по схеме линейно-деформируемого полупространства (СП 22.13330.2011) как для штампа (без учета жесткости каркаса) показал завышенные значения средней осадки. Превышение составило 75 % относительно реальных значений.

3. Для получения результатов расчета осадок плитных фундаментов высотных зданий, хорошо согласующихся с реальной картиной деформирования грунтового основания необходимо учитывать жесткость надземных конструкций, а также влияние ограждающих конструкций глубокого котлована. Расчет может производиться с использованием программных комплексов, реализующих метод конечных элементов, позволяющих создавать пространственные модели зданий. При этом расчетная модель здания может включать в себя как всю конструкцию в целом, так и только ее нижнюю (подземную) часть. В расчетных моделях фундамент может рассматриваться как плита на упругом основании. Для учета податливых свойств грунта наиболее оптимальным является использование модифицированного метода Пастернака с учетом изменения модулей объемных и сдвиговых деформаций на основе расчетной модели грунта при трехосном режимном нагружении.

Список библиографических ссылок

1. Мирсаяпов И.Т., Королева И.В. Расчетная модель длительного нелинейного деформирования глинистых грунтов при сложном напряженном состоянии // Известия КГАСУ, 2011, № 2 (16). – С. 121-128.
2. Мирсаяпов И.Т., Королева И.В. Особенности деформирования глинистых грунтов при режимном нагружении // Известия КГАСУ, 2012, № 4 (22). – С. 193-198.
3. Mirsayapov I.T., Koroleva I.V. Bearing capacity and deformation of the base of deep foundations' ground bases // Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground: Proc. intern. symp., Seoul, Korea, 25-27 August 2014. – Lieden: Balkema, 2014. – P. 401-404.
4. Материалы Международного форума высотного и уникального строительства 100+FORUM RUSSIA, 23-25 сентября 2015 г. – Екатеринбург. URL: <http://www.forum-100.ru> (дата обращения: 08.09.2015).
5. Пастернак П.Л. Основы нового метода расчета на упругом основании при помощи двух коэффициентов постели. – М.: Госстройиздат, 1954. – 56 с.
6. Городецкий А.С., Евзеров И.Д. Компьютерные модели конструкций. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2009. – 360 с.
7. Горбунов-Посадов М.И., Маликова Т.А., Соломин В.И. Расчет конструкций на упругом основании. – М.: Стройиздат, 1984. – 627 с.
8. Корнев Б.Г., Черниговская Е.И. Расчет плит на упругом основании. – М.: Стройиздат, 1984. – 356 с.

Mirsayapov I.T. – doctor of technical sciences, professor

E-mail: mirsayapov@kgasu.ru

Nurieva D.M. – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: danm_n@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Numerical investigations of sediment high-rise building

Resume

Implementation of numerical studies of sediment carried out in relation to the foundation of one of the tall buildings of a residential complex in Moscow. The calculations were performed using the software package LIRA-SAPR 2014. Spatial model of a skeleton represented by a single system «building – base – ground» in which malleable properties of the soil were taken into account by applying the bed, calculated methods of Pasternak, and Winkler modified method Pasternak calculation model with the inclusion of soil under triaxial loading regime, reflecting the peculiarities of soil deformation during the phased construction of the building. The results were compared with monitoring data and showed good agreement with the actual deformation of the base and foundation of the test building. The deviation of the mean sediment using a modified method of Pasternak was not more than 1 %. An analysis of the calculation results showed the need to incorporate in the calculation of sediment bases and foundations of high-rise buildings the stiffness of their above-ground structures, as well as the effect of walling deep pit.

Keywords: sediment deformation modulus, slab foundation, roll, high-rise building, the coefficients of the bed, «slurry wall».

Reference list

1. Mirsayapov I.T., Koroleva I.V. Designed model of long nonlinear deformation of clay soil in a complex stress state // *Izvestiya KGASU*, 2011, № 2 (16). – P. 121-128.
2. Mirsayapov I.T., Koroleva I.V. Features of deformation of clay soils during loading of regime // *Izvestiya KGASU*, 2012, № 4 (22). – P. 193-198.
3. Mirsayapov I.T., Koroleva I.V. Bearing capacity and deformation of the base of deep foundations' ground bases // *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground: Proc. intern. symp., Seoul, Korea, 25-27 August 2014.* – Lieden: Balkema, 2014. – P. 401-404.
4. Proceedings of the International Forum and the unique high-rise building 100 + FORUM RUSSIA, 23-25 September, 2015. – Ekaterinburg. URL: www.forum-100.ru (reference date: 08.09.2015).
5. Pasternak PL The new method is based on an elastic foundation under Pomo soup - bed two factors – M.: Gosstoyizdat, 1954. – 56 p.
6. Gorodetsky A.S., Evzerov I.D. Computer models of constructions. – M.: Publishing Association building universities, 2009. – 360 p.
7. Gorbunov-Possadov M.I., Malikova T.A., Solomin V.I. Calculation of structures on elastic foundation. – M.: Stroyizdat, 1984. – 627 p.
8. Korenev B.G., Chernigovskaya Ye.I. Calculation of slabs on an elastic foundation. – M.: Stroyizdat, 1984. – 356 p.