

**АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО  
СОСТОЯНИЯ СВАЙНО-ПЛИТНОГО ФУНДАМЕНТА  
МНОГОЭТАЖНОГО ЗДАНИЯ С ПОМОЩЬЮ  
ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА SOFISTIK**

Самородов А.В.

Харьковский национальный университет строительства и архитектуры

Никулин В.Б.

ОДО «Жилстрой-2»

Кротов О.В., Храпатова И.В.

Харьковский национальный университет строительства и архитектуры  
г. Харьков, Украина

**АННОТАЦИЯ:** У статті проведено аналіз впливу різних моделей ґрунтової основи на напружено-деформований стан (НДС) пальово-плитного фундаменту багатоповерхової будівлі, результати якого показують істотне розходження НДС фундаменту та необхідність його врахування при реальному проектуванні.

**АННОТАЦИЯ:** В статье проведен анализ влияния различных моделей ґрунтового основания на напряженно-деформированное состояние (НДС) свайно-плитного фундамента многоэтажного здания, результаты которого показывают существенное различие НДС фундамента и необходимость его учета при реальном проектировании.

**ABSTRACT:** In the article analyzes the influence of different models of ground base to the stress-strain state (SSS) of the pile-plate foundation of the multi-storey building, whose results show a significant difference in the SSS of the foundation and the need to account for the real design.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ґрунтовое основание, свайно-плитный фундамент, линейно-деформируемая среда, модель, напряженно-деформированное состояние.

## ВВЕДЕНИЕ

В современной механике грунтов выбор расчетной модели грунтового основания, с которой взаимодействует строительный объект, является одной из основных задач моделирования и расчета взаимодействия системы «основание–фундамент–сооружение», т.к. определение контактных напряжений по подошве фундаментов позволяет выявить напряженно-деформированное состояние не только самой конструкции фундамента, но и других элементов сооружения. В случае же применения свайно-плитных фундаментов, как правило, определяются реактивные усилия, возникающие в местах сопряжения свай с плитным ростверком.

Однако, для получения достоверных результатов расчета необходимо принимать такую модель основания, которая близка к реальной грунтовой среде по двум критериям: по распределительной способности и по осадкам сооружения.

Более 200 лет назад Н.И. Фуссом была предложена простейшая линейная однопараметровая модель основания. Впоследствии разрабатывались более совершенные многопараметровые и комбинированные модели, в том числе дискретные, способные описывать различные свойства грунтовых оснований, которые, в основном, разрабатывались для инженерных расчетов конструкций, взаимодействующих с грунтовым основанием. Подробное описание различных моделей, историю их возникновения и развития можно встретить в капитальных научных трудах видных украинских ученых И.Я. Лучковского (2000 г.) [1], Ю.Л. Винникова (2004 г.) [2], С.Г. Кушнера (2008 г.) [3] и др.

## АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Так как в рамках данной статьи рассматриваются крупноразмерные свайно-плитные фундаменты с регулярным расположением свай, то, как правило, давление в уровне их заложения не превышает расчетного сопротивления грунта основания, а значит правомерно применение моделей линейно-деформируемой среды, что было предложено еще В.А. Флориным [4] и допускается существующими нормами ДБН [5].

Следует отметить, что в отличие от пионерной модели Н.И. Фусса (Фусса-Винклера) последние десятилетия широко использовалась модель полупространства (полуплоскости), практическому применению которой способствовали исследования М.И. Горбунова-Посадова, Б.Н. Жемочкина, А.П. Сеницына, Л.П. Винокурова и других ученых. Ими были составлены таблицы функций единичных осадок и разработаны численные методы решения контактных задач с использованием классических приемов строительной механики и теории упругости, ставших доступными

инженерным работникам. Однако, применение модели полупространства существенно завышает усилия общего изгиба фундаментной конструкции из-за концентрации отпора под краями, особенно, крупноразмерных фундаментов.

Таким образом, существуют две модели с принципиально противоположными распределительными свойствами – модель прямой пропорциональности Фусса-Винклера и модель полупространства (полуплоскости). Преимущества первой в простоте описания переменных свойств основания на контактной поверхности, а второй – в возможности учета взаимного влияния фундаментов и получения картины напряженно-деформированного состояния фундаментов и массива, т.к. она моделирует не только контактные условия, но и грунтовую среду.

На сегодняшний день появились мощные расчетные комплексы типа Abaqus, ANSYS, SOFISTIK и практически неограниченные возможности вычислительной техники, позволяющие моделировать систему «основание-фундамент-сооружение», в том числе сплошной грунтовый массив с различными свойствами геологических напластований, а также особыми условиями контакта грунта с конструкциями фундамента.

Цель работы - провести сравнительный численный анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) свайно-плитного фундамента многоэтажного здания при использовании различных моделей основания в виде линейно-деформируемой среды с помощью расчетного программного комплекса SOFISTIK [6].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Численные исследования были проведены согласно хоздоговора кафедры геотехники и подземных сооружений ХНУСА с ОДО «Жилстрой-2» в рамках научно-технического сопровождения объекта строительства [7].

Район строительства – г. Харьков. Ширина здания в осях – 13,5 м. Длина здания в осях – 45,6 м. Высота – 74,1 м.

Объект расчета представляет собой 21-этажное жилое здание с цокольным этажом. Конструктивная схема здания - связевая. Здание имеет монолитный железобетонный полный каркас, состоящий из безбалочных перекрытий, колонн, ядер и диафрагм жесткости. Пространственная устойчивость здания обеспечивается диафрагмами и ядрами жёсткости, связанными жёсткими дисками перекрытий. Размеры конструктивных элементов здания приняты в соответствии с проектной документацией, предоставленной ОДО «Жилстрой-2» (г. Харьков).

Фундамент – свайно-плитный. Сваи буроинъекционные диаметром 300 мм и длиной 11 м, которые объединены монолитным железобетонным плитным ростверком толщиной 900 мм. Основанием свай служат грунты

ИГЭ-7 – пески пылеватые, плотные, однородные, насыщенные водой. Физико-механические характеристики грунтов площадки строительства представлены в табл. 1.

Таблица 1

Физико-механические свойства грунтов

Характеристика грунта	Усл. обознач.	Ед. изм.	Слой				
			1 – насыпной грунт	2 – суглинок текучеplastичности	3 – глина тугопластичная	4 – песок мелкий, ср. плотности	7 – песок пылеватый, плотный
Уд. вес грунта	$\gamma$	кН/м <sup>3</sup>	16,3	18,67	16,29	18,85	19,70
Уд. вес водонас. грунта	$\gamma_{sat}$	кН/м <sup>3</sup>	-	19,05	16,68	19,23	19,74
Уд. вес частиц грунта	$\gamma_s$	кН/м <sup>3</sup>	-	26,59	24,72	26,09	26,00
Уд. вес взв. в воде грунта	$\gamma_{sb}$	кН/м <sup>3</sup>	-	9,37	6,90	9,61	10,15
Природная влажность	$W$	д.ед	-	0,24	0,41	0,23	0,21
Коэффициент пористости	$e$	д.ед	-	0,74	1,09	0,70	0,58
Уд. сцепл. грунта	$c$	кПа	-	17	17	2	5
Угол внутр. трения	$\varphi$	град.	-	16	15	30	33
Модуль деформации	$E$	МПа	-	10	6	24	25
Показатель текучести	$I_L$	д.ед	-	0,7	0,29	-	-
Число пластичности	$I_p$	д.ед	-	0,1	0,21	-	-

Расположение свай в грунтовом массиве представлено на рис. 1, а на рис. 2 схематично показано взаиморасположение свай, контура плиты

ростверка с участками сопряжения вертикальных несущих железобетонных конструкций каркаса.

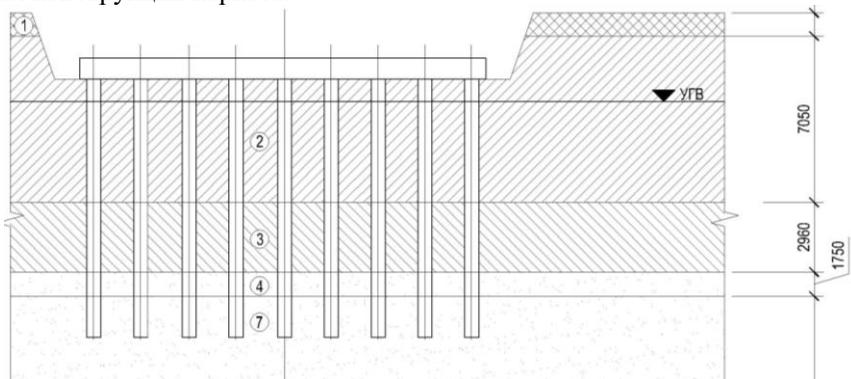


Рис. 1. Схема расположение свай на инженерно-геологическом разрезе

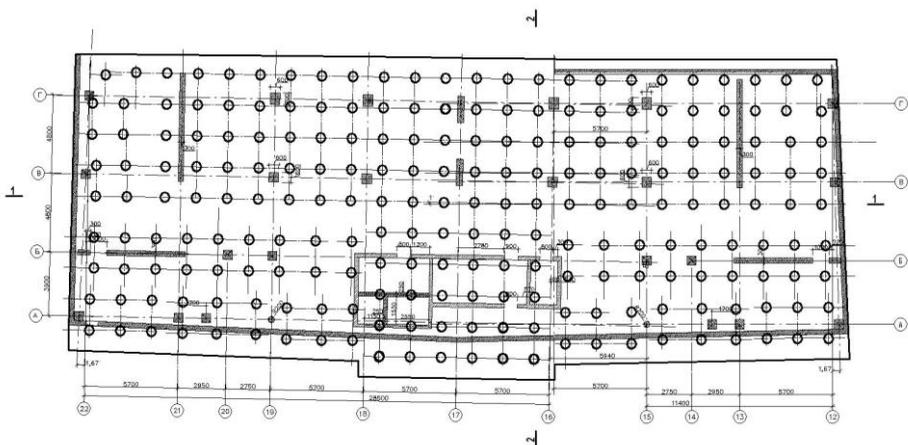


Рис. 2. Схематичное взаиморасположение свай, контура плитного ростверка и несущих элементов каркаса

Нагрузки и воздействия для расчета здания приняты согласно действующим украинским нормативным документам.

Численные расчеты системы «основание – свайно-плитный фундамент - здание» выполнены методом конечных элементов, основанном на решениях теории упругости и теории предельного равновесия, с помощью расчетного программного комплекса SOFISTIK. Анализ напряженного состояния свайного ростверка приведен для расчетного сочетания усилий при использовании различных моделей грунтового основания в виде линейно-деформируемой среды:

- **модель Фусса-Винклера ( $G_1=145000$  кН/м) (распространенная инженерная практика моделирования)**: в местах сопряжения свай с ростверком вводятся связи конечной жесткости, значения которой принимается постоянным ( $G_1=145000$  кН/м) как отношение нагрузки на одиночную сваю к ее осадке, полученное по результатам испытаний натуральных свай [8];

- **модель Фусса-Винклера ( $G_2=10400$  кН/м)**: в местах сопряжения свай с ростверком вводятся связи конечной жесткости, значения которой принимается постоянным ( $G_2=10400$  кН/м) как отношение нагрузки на сваю к осадке сплошного условного фундамента, полученную нормативными или другими методами;

- **модель с использованием суперэлементов свай (Pile)**: особенностью моделирования свайного основания в этом случае является введение параметров взаимодействия свай с грунтом, т.е. пределы сопротивления одиночных свай как по боковой поверхности, так и под нижним концом [6], при этом алгоритм расчета программы учитывает либо определение осадки одиночной сваи в полупространстве (стержень в упругой среде), либо исключение сваи из расчета в случае передачи на нее предельной нагрузки;

- **модель полупространства**: вводятся параметры модуля деформации  $E$  и коэффициента Пуассона  $\mu$  многослойного основания по инженерно-геологическим скважинам, которые автоматически интерполируются на весь грунтовый массив [6].

Общий вид модели здания на свайно-плитном фундаменте и деформируемая схема фундамента показаны на рис. 3-4.

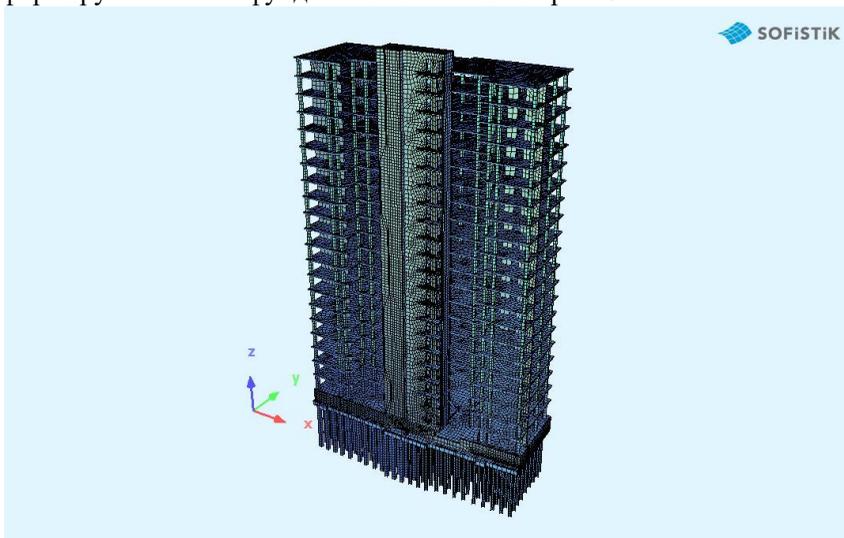


Рис. 3. Общий вид модели здания

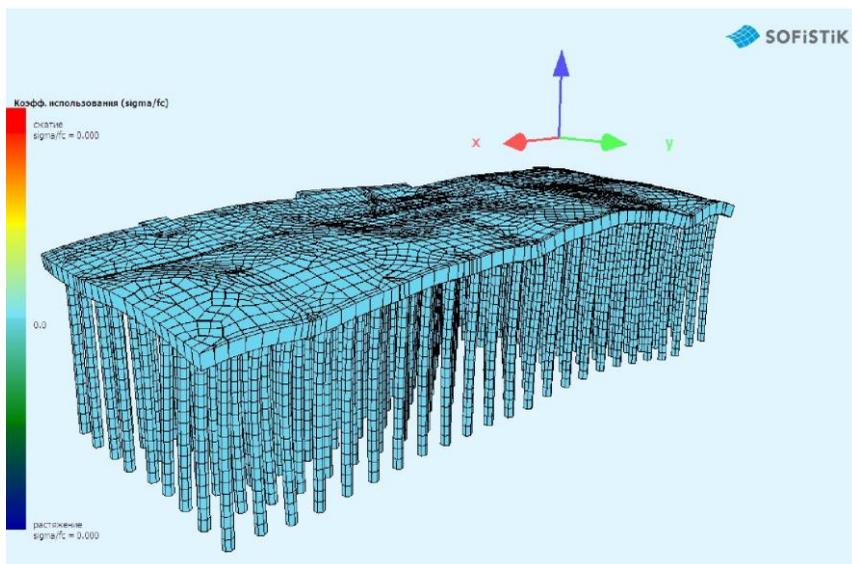


Рис. 4. Деформируемая схема фундамента

Отмечаем, что средняя реакция всех свай равна  $R_{cp} \approx 1350$  кН, при этом средние осадки фундамента  $s_{cp}$  для разных моделей составили:

- $s_{cp} \approx 1,0$  см - модель Фусса-Винклера ( $G_1 = 145000$  кН/м);
- $s_{cp} \approx 13,0$  см - модель Фусса-Винклера ( $G_2 = 10400$  кН/м);
- $s_{cp} \approx 1,0$  см - модель Pile;
- $s_{cp} \approx 9,0$  см - модель полупространства.

Равные величины средних осадок ( $s_{cp} \approx 1,0$  см) с использованием моделей Фусса-Винклера ( $G_1 = 145000$  кН/м) и Pile косвенно показывают правильность моделирования, т.к. в этих двух случаях предполагается отсутствие взаимного влияния свай в массиве грунта при линейной зависимости их деформирования для данного уровня нагружения.

На основании результатов расчета на рис. 5-8 показаны диаграммы реакций и эпюры моментных усилий вдоль принятых линий 1-1 и 2-2 (рис. 2) при использовании различных моделей основания.

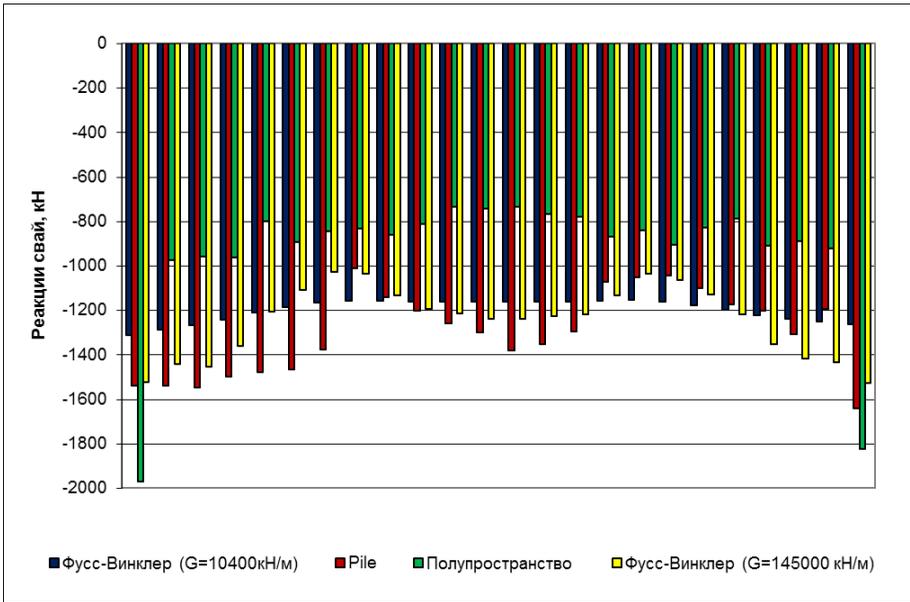


Рис. 5. Сравнение значений реакций свай вдоль линии 1–1

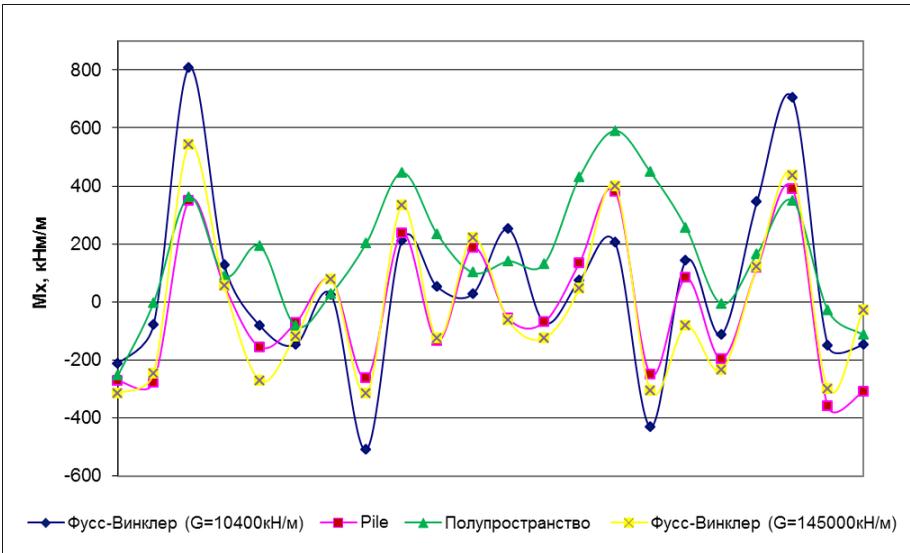


Рис. 6. Сравнение значений изгибающих моментов  $M_x$  в сечении плиты вдоль линии 1–1

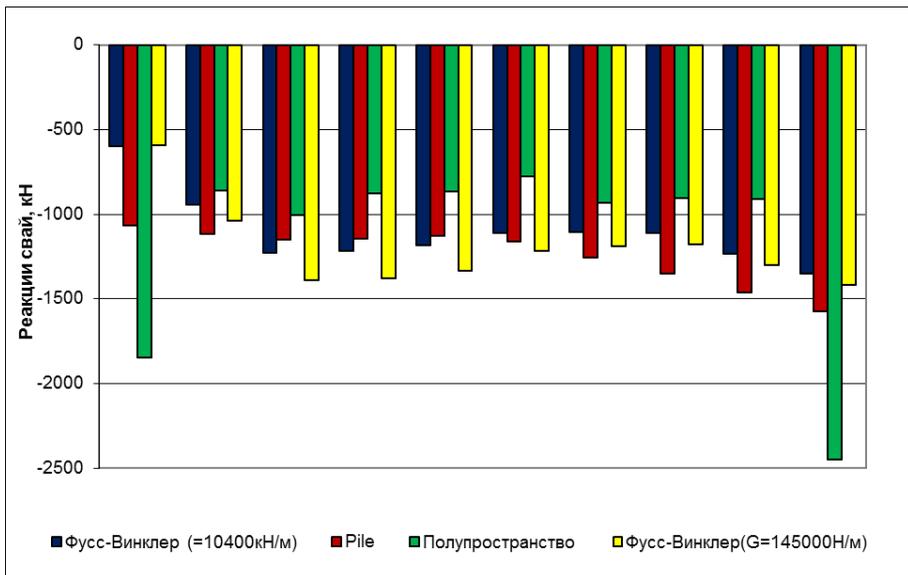


Рис. 7. Сравнение значений реакций свай вдоль линии 2–2 (направление «слева-направо» соответствует направлению «сверху-вниз» на рис. 2)

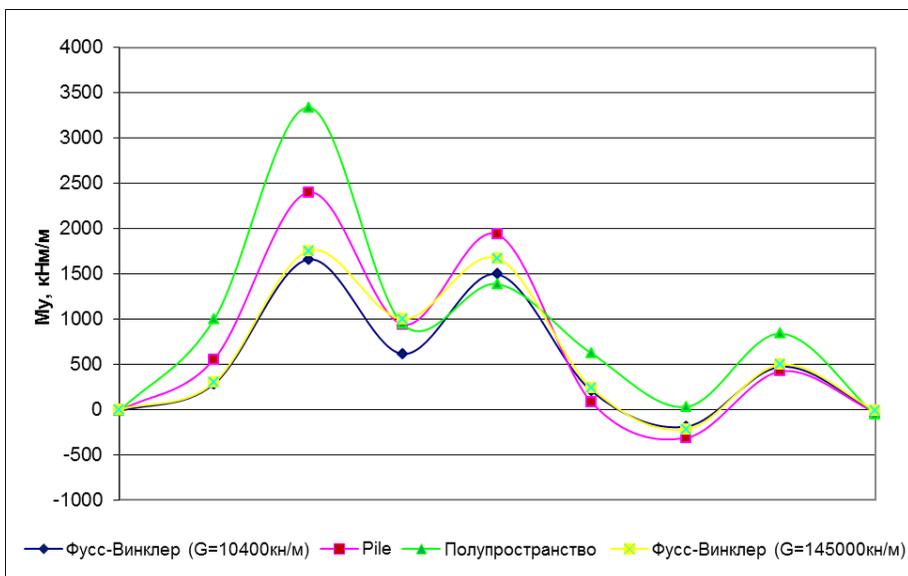


Рис. 8. Сравнение значений изгибающих моментов  $M_y$  в сечении плиты вдоль линии 2–2

## ВЫВОДЫ

1. В статье проанализировано напряженно-деформированное состояние (НДС) свайно-плитного фундамента многоэтажного здания при использовании различных моделей основания в виде линейно-деформируемой среды с помощью расчетного программного комплекса SOFISTIK.

2. Модели «Фусса-Винклера ( $G_1=145000\text{кН/м}$ )» и «Pile» являются неадекватными для определения осадок ( $s_{cp}\approx 1,0$  см) крупноразмерных свайно-плитных фундаментов с относительно частным расположением свай из-за отсутствия их взаимного влияния.

3. Применение различных моделей грунтового основания показывает не только различие в распределении реакций в сваях, но и различное положение растягивающих усилий в ростверке для рассмотренного сечения вдоль линии 1-1 (рис. 6).

4. При реальном проектировании следует принимать армирование крупноразмерных ростверков свайно-плитных фундаментов исходя из различных вариантов распределения максимальных усилий в зависимости от применения различных моделей основания.

5. На наш взгляд, оптимизация проектных решений свайно-плитных фундаментов при использовании тех или иных моделей основания должна осуществляться не столько с учетом моделирования нелинейных свойств грунтовых оснований или их взаимодействия с отдельными элементами, что широко предлагается известными расчетными комплексами, сколько с проведением инструментального геотехнического мониторинга объектов строительства для адекватного моделирования взаимодействия системы «основание-фундамент-сооружение».

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лучковский И.Я. Взаимодействие конструкций с основанием / И.Я. Лучковский. – Харків: ХДАГХ (Бібліотека журналу ІТЕ), 2000. – Том 3. – 264 с.
2. Винников Ю.Л. Моделирование процесів ущільнення ґрунту при віссиметричному напружено – деформованому стані основ: дис. ... докт. техн. наук : спец. 05.23.02 / Винников Юрій Леонідович. – Київ, 2005. – 468 с.
3. Кушнер С.Г. Расчет деформаций оснований зданий и сооружений / С.Г. Кушнер. – Запорожье, 2008. – 496 с.
4. Флорин В.А. Основы механики грунтов. Т. 1 / Флорин В.А. - Л.-М.: Стройиздат. 1959. – С. 120-128.
5. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування: ДБН В.2.1-10-2009. - [Чинні від 2009-07-01]. - К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 104 с.

6. [www.sofistik.com](http://www.sofistik.com); [www.sofistik.ru](http://www.sofistik.ru)
7. Отчет о НИР: «Анализ напряженно-деформированного состояния элементов несущих конструкций объекта «Жилой комплекс по ул. Клочковской, 117. 1-ая очередь строительства. 2-ой пусковой комплекс» / А.В. Самородов, О.В. Кротов. – Харьков: ХНУСА, 2016. – 48 с.
8. Научно-технический отчет: дослідження несучої здатності двох буроін'єкційних паль вертикальним статичним навантаженням на ділянці будівництва «Житловий комплекс по вул. Клочківській, 117 у м. Харкові. 1-а черга будівництва. 2-й пусковий комплекс» / ЧП «Регионспецстрой»; руководитель и отв. исп.: А.В. Самородов – Харьков, 2015. – 37 с.

## REFERENCES

1. Luchkovskiy I.J. The interaction of structures with base / I.Y. Luchkovskiy. - Kharkiv: KDAGH (Biblioteka ITE Journal), 2000. – Vol. 3. – 264 p.
2. Vynnykov Y.L. Modeling of soil compaction with axisymmetrical stress - deformed state bases: Dis. ... Doctor. Sc. Sciences specials. 05.23.02 / Vynnykov Yuri Leonidovich. - Kyiv, 2005. - 468 p.
3. Kushner S.G. Calculation of deformation bases of buildings and structures / Kouchner S.G. - Zaporozhye, 2008. - 496 p.
4. Florin V.A. The Fundamentals of Soil Mechanics. T. 1, L.-M. Stroyizdat. 1959. - P. 120-128.
5. DBN V.2.1-10-2009. Bases and foundations of buildings. K. : Minregyonstroy Ukraine, 2009. - 104 p.
6. [www.sofistik.com](http://www.sofistik.com); [www.sofistik.ru](http://www.sofistik.ru)
7. Research report: "Analysis of stress-strain state of the elements of bearing structures of the" residential complex on the street. Klochkovskaya, 117. The first phase of construction. 2nd starting complex "/ A.V. Samorodov, O.V. Krotov. - Kharkov: KhNUCEA, 2016. - 48 p.
8. Scientific and Technical report: On-site two root piles bearing capacity research with vertical static load at "residential complex on the street. Klochkovskaya, 117 m. Kharkiv. The first phase of construction. 2nd starting complex "/ PE" Regyonspetsstroy "; A.V. Samorodov - Kharkov, 2015. - 37 p.

Статья поступила в редакцию 27.07.2016 г.