

УДК 624.131.37

**ОПЫТ ВОЗВЕДЕНИЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ
НА ФУНДАМЕНТАХ В ПРОБИТЫХ СКВАЖИНАХ
И НА ОСНОВАНИЯХ, АРМИРОВАННЫХ
ГРУНТОЦЕМЕНТНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ**

Винников Ю.Л., Ларцева И.И.,

Харченко М.А., Мирошниченко И.В.

*Полтавский национальный технический университет
имени Юрия Кондратюка, г. Полтава, Украина*

Приведены результаты численного 3D-моделирования напряженно-деформированного состояния систем «ленточный ростверк – фундаменты в пробитых скважинах – замоченное лессовое основание» и «плитный фундамент – армированное по буросмесительной технологии слабое глинистое основание», которые сравниваются данными наблюдений за осадками зданиями и сооружениями.

The results of numerical 3D simulation of stressed-deformed state of systems «strip grillage – foundations in the punched holes – saturated loessial base» and «slab foundations – clay bases reinforced by boring and mixing technology» are presented. This results and dates of long-term settlement observations of buildings and structures are compared.

Фундаменты в пробитых скважинах (ФПС) отличает высокая степень использования несущей способности основания вследствие формирования в нем уплотненной зоны грунта. ФПС позволяют почти исключить земляные и опалубочные работы, уменьшить расход бетона и металла, трудоемкость работ, ускорить возведение ну-

левого цикла по сравнению с фундаментами, возводимыми с выемкой грунта и погружением в массив сборных элементов [1].

Метод ПолтНТУ [2, 3] расчета ФПС учитывает параметры их уширений и уплотненных зон в зависимости от характеристик трамбовки, материала уширения и грунта, расстояния между осями ФПС. Недостаток методов определения осадок зданий на ФПС в составе ленточных ростверков по схеме одиночных свай с уширением [3] – не учет взаимодействия зон влияния соседних ФПС, что при расстоянии между их осями $\ell_w = 3 \div 5d$ (d – диаметр поперечного сечения ствола ФПС) существенно занижает фактические осадки оснований фундаментов. Для совершенствования методики расчета осадок ФПС в составе ленточных ростверков за базовое целесообразно принять решение плоской задачи механики грунтов.

Решения геотехнических задач в осесимметричной версии метода конечных элементов (МКЭ) в физически [4] и геометрически [5] нелинейной постановке достаточно адекватно моделируют напряженно-деформированное состояние (НДС) массива при устройстве отдельных фундаментов с уплотнением грунта и их последующей работе. Но эти решения не корректно использовать для оценивания взаимодействия ФПС в составе ленточных ростверков с грунтом.

Пространственная КЭ модель системы «ленточный ростверк – ФПС – основание» («ЛР – ФПС – О») составлена для реального 9-этажного здания в Полтаве. Глубина ФПС – 2,5 м, диаметр ствола – 0,5 м, объем втрамбованного в уширение щебня – 2,0 м³ (диаметр его поперечного сечения – 1,1 м). Ленточный ростверк имеет размер поперечного сечения 500x400 мм с глубиной заложения 1,4 м. Шаг ФПС – 2000 мм. Погонная нагрузка на ростверк – 450 кН.

Грунтовые условия представлены замоченными лессовыми суглинками с модулем деформации $E = 5 - 9$ МПа. Уровень грунтовых вод – 4,6 м от поверхности земли. Размеры модели (рис. 1) в Plaxis 3D (Version 1.6) составляют: ширина 2 м; длина 16 м; глубина 15 м. При генерации КЭ сетки использована средняя глобальная крупность. Локальное сгущение КЭ сетки было выполнено возле ФПС. При этом 2D-сетка состояла из 1308 треугольных КЭ, 3269 узлов, а 3D-сетка – из 36623 КЭ, 101159 узлов и 42000 точек напряжений. Средний размер КЭ – $114,5 \cdot 10^{-3}$ м.

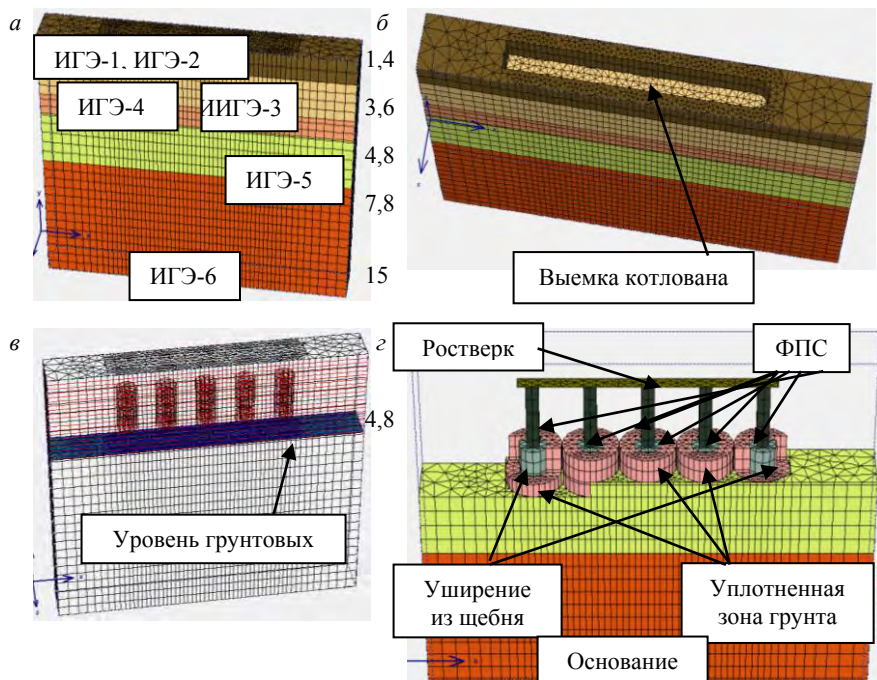


Рис. 1. КЭ модель системы «ЛР – ФПС – О»:

a – 3D КЭ сетка; *б* – на стадии выемки грунта; *в* – уровень грунтовых вод;
z – устройство ФПС и ростверка; ИГЭ-1...ИГЭ-6 – инженерно-геологические элементы, на которые разбито основание

Для имитации НДС грунтов, уширений и уплотненной зоны использована нелинейная модель с критерием прочности Мора – Кулона (МС). Заданы ее параметры: 1) дренированное, недренированное или непористое поведение грунта; 2) удельный вес в природном γ_{unsat} и в водонасыщенном состоянии γ_{sat} ; 3) коэффициенты фильтрации k_x, k_y, k_z ; 4) модуль деформации E ; 5) коэффициент Пуассона ν ; 6) угол внутреннего трения грунта ϕ ; 7) удельное сцепление c ; 8) угол дилатации $\psi = 0$. Поведение грунта – дренированное.

Свойства грунтов определены лабораторными испытаниями. Для грунтов, расположенных выше уширения, использованы испытания на прямой сдвиг предварительно уплотненных водонасыщенных образцов с обработкой результатов способом полной логарифмической перестройки; для грунтов под уширением – с обработкой данных по стандартной методике. Эти значения были исходными для определе-

ния параметров прочности уплотненной зоны. Гидростатическое давление воды учтено уровнем грунтовых вод (рис. 1, в).

Для железобетонного ствола использована упругая модель Гука (изотропной линейной упругости). Ростверк задавался как плоский элемент. Ему присвоены изотропные упругие свойства бетона.

Этапы задачи: 1) гравитационная загрузка расчетной области весом грунта и определение начального НДС массива; 2) устройство выемки под ростверк до отм. -1,400 м; 3) устройство ФПС и ростверка, равномерная загрузка. Использован расчет пластического состояния.

Рассчитанные осадки основания системы «ЛР – ФПС – О» и деформированная сетка КЭ приведены на рис. 2. На рис. 3 сравниваются графики «нагрузка F – осадка S » по результатам 2D и 3D моделирования, а также длительных геодезических наблюдений за зданиями на ФПС в составе ленточных ростверков в условиях водонасыщенных лессовых грунтов. Относительная погрешность результатов 2D и 3D моделирования и натурных наблюдений – до 15 %. Графики имеют четко выраженный криволинейный характер, т.е. грунт вокруг ФПС, их уширений и ростверков работает в пластической стадии.

Изополя распределений полных напряжений приведены на рис. 4, а, относительные касательные напряжения – на рис. 4, б, пластические точки – на рис. 4, в. Из анализа последних заметно, первоначально в пластическую стадию переходит уплотненный грунт возле уширения, потом вокруг ствола ФПС, после чего пластические зоны возникают в основании под уплотненной зоной уширения.

Сравнением результатов 2D и 3D моделирования МКЭ при использовании упруго-пластической модели и данных геодезических наблюдений за осадками зданий на ФПС установлено, что при расстоянии между их осями до $\ell_w = 5d$ в составе ленточного ростверка грунт между и вокруг ФПС работает как единый массив. Для упрощения расчета осадок их оснований корректной есть расчетная схема в виде условного ленточного фундамента шириной, равной диаметру уширения, глубиной, соответствующей его низу, и с уплотненной зоной под уширением. Модуль деформации в ней возможно принять как три величины природного грунта, а на значения модуля деформации замоченных лессов, определенные компрессионными испытаниями, не вводят повышающих коэффициентов.

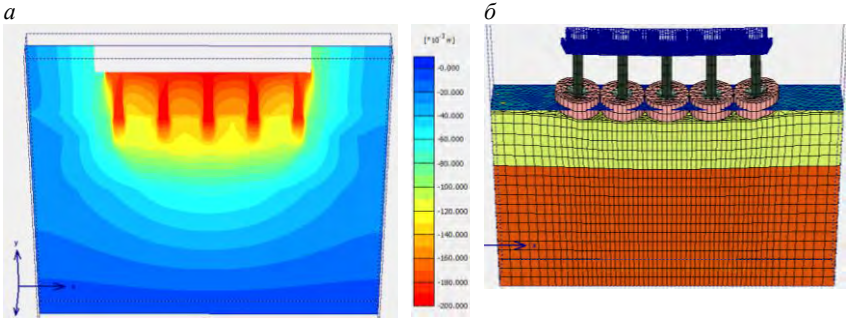


Рис. 2. Деформации системы «ЛР – ФПС – О»:
a – изополя распределения вертикальных деформаций U_y ; *б* – деформированная сетка, условно увеличенная в 5 раз

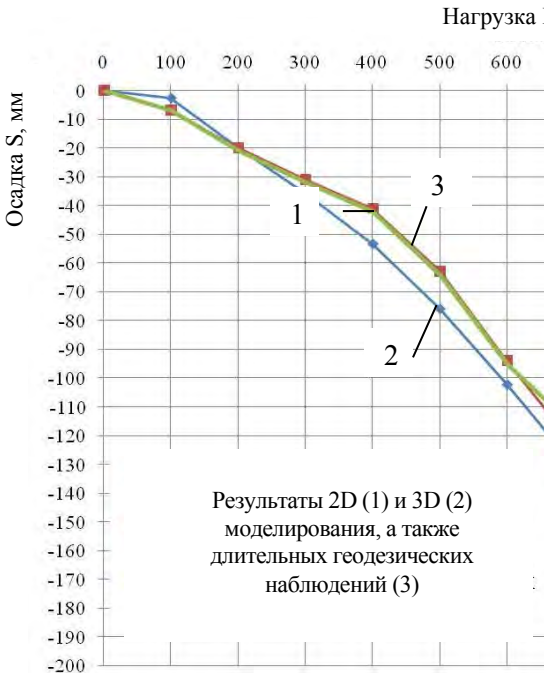


Рис. 3. Сравнение графиков «нагрузка F – осадка S » по результатам 2D (1) и 3D (2) численного моделирования МКЭ, а также длительных геодезических наблюдений (3)

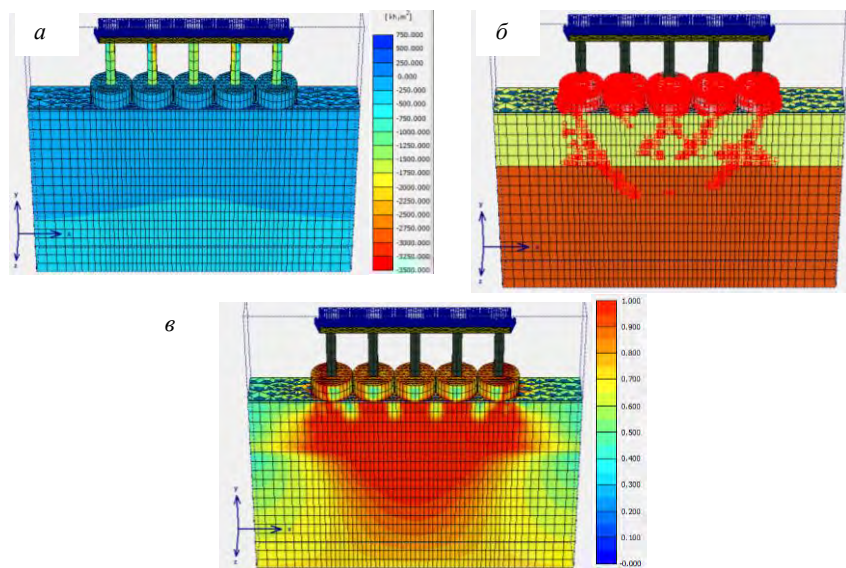


Рис. 4. Напряжения в системе «ЛР – ФПС – О»:

a – изополя полных средних напряжений в 3D КЭ сетке;

б – относительные сдвиговые напряжения; *в* – точки развития пластических деформаций в массиве вокруг ФПС

Популярен для уменьшения осадок сооружений и метод улучшения свойств слабых массивов устройством вертикальных элементов армирования по буросмесительной технологии [6, 7]. Авторы усовершенствовали методику моделирования по 3D версии МКЭ с использованием упругопластической модели изотропного упрочнения грунта (HSM) влияния параметров грунтов и элементов армирования на НДС системы «плитный фундамент – армированное основание» при циклическом режиме нагружения [8]. Расчетная область ниже подошвы плиты (зернохранилища), ограничена мощностью сжимаемой толщи, определенной методом послойного суммирования из условия $\sigma_{zp} = 0,5\sigma_{zg}$, – 15 м (рис. 5). При моделировании НДС армированного основания толщ грунтов на глубину 8 м в пределах площади плиты заменяли на грунты со средневзвешенными характеристиками армированного массива. Модули упругости определяли увеличением модулей деформации для слабых грунтов в 10, а остальных – в 5 раз. Графики рассчитанных осадок от давления на основание по моделям МС и HSM приведены на рис. 6.

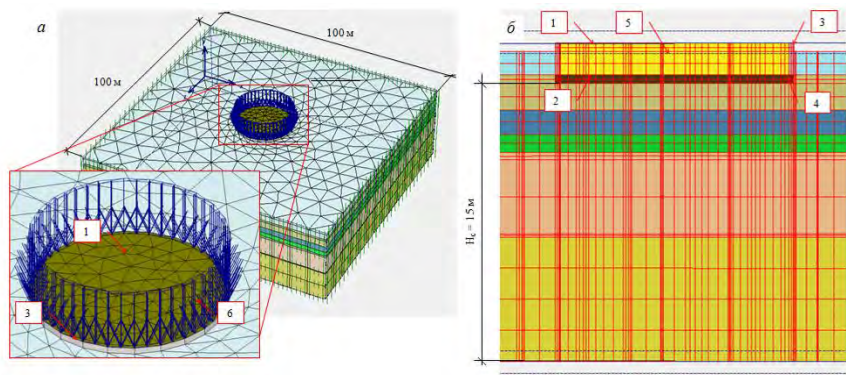


Рис. 5. Расчетная схема для моделирования НДС силоса зернохранилища: *a* – общий вид модели и сетка конечных элементов; *б* – расчетная схема в разрезе; 1 – верхняя ж/б плита; 2 – нижняя ж/б плита (дно силоса); 3 – стенка плитного фундамента; 4 – щебеночная подушка; 5 – уплотненный песок; 6 – нагрузка от веса стен силоса и надсилосных конструкций; H_c – глубина сжимаемой толщи грунтов

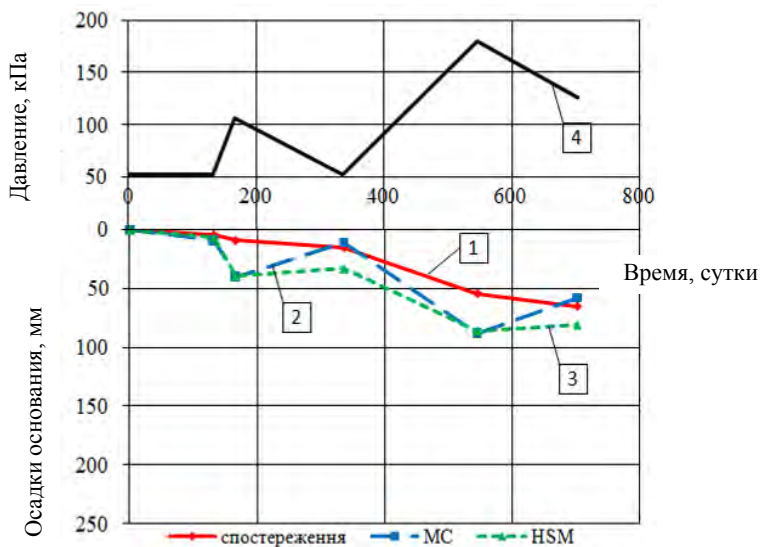


Рис. 6. Средние осадки, мм, силоса на армированном основании в зависимости от давления на основание и времени, сут, и режима его приложения по: 1 – геодезическим наблюдениям; 2 – расчетом МКЭ по модели MC; 3 – расчетом МКЭ по модели HSM; 4 – давление на основание, кПа

Адекватность применения HSM для оценки НДС армированных оснований плитных фундаментов подтверждена сравнением рассчитанных осадок с данными геодезических наблюдений. Разница рассчитанных и измеренных величин осадок – до 20–30 %.

Литература

1. Крутов, В.И. Проектирование и устройство оснований и фундаментов на просадочных грунтах / В.И. Крутов, А.С. Ковалев, В.А. Ковалев – М. : АСВ, 2012. – 560 с.
2. Определение форм и размеров уширений и зон уплотненного грунта фундаментов в пробитых скважинах / Н.Л. Зоценко [и др.] // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1989. – № 5. – С. 2–4.
3. Посібник з проектування та спорудження фундаментів у пробитих свердловинах (до СНиП 2.02.03-85)/ – К. : Державний комітет України у справах містобудування і архітектури. – 1997. – 72 с.
4. Шапиро, Д.М. Теория и расчетные модели оснований и объектов геотехники: монография / Д.М. Шапиро. – Воронеж : Научн. книга, 2012. – 164 с.
5. Винников, Ю.Л. До оцінки напружено-деформованого стану основ фундаментів у пробитих свердловинах методом математичного моделювання / Ю.Л. Винников // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. праць. – Вип. 9. – Рівне: РДТУ, 2003. – С. 394–398.
6. Методы подготовки и устройства искусственных оснований / Р.А. Мангушев [и др.]. – М.;СПб. : Изд-во АСВ, 2012. – 280 с.
7. Characteristics of manmade stiff grounds improved by drill-mixing method / M. Zotsenko [et al.] // Proc. of the 15th European conf. on soil mechanics and geotechnical engineering. – Athens, 2011 – P. 1097–1102.
8. Винников, Ю.Л. Численный расчет армированного основания в вероятностной постановке / Ю.Л. Винников, М.А. Харченко, В.И. Марченко // Численные методы расчетов в практической геотехнике : сб. статей научн.-техн. конф. – СПб. : СПбГАСУ, 2012. – С. 86–93.