

УДК 624.15

DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2019-11-3-10>

С.Н. БОТАЛОВ, инженер (geosoft@maliningroup.com), Р.Г. КУЛИКОВ, канд. физ.-мат. наук,
И.А. САЛМИН, рук. проектного отдела

ООО «Строительная компания «ИнжПроектСтрой» (614000, г. Пермь, Комсомольский пр., 34)

Определение осадок фундаментной плиты в GeoPlate Pro

Рассматривается задача определения осадки деформируемой фундаментной плиты на упругом основании. Применяется подход, основанный на методе послойного суммирования, позволяющий за счет использования численных процедур существенно расширить методику с целью учета влияния геометрии и жесткостных параметров плиты, особенностей нагружения и неоднородности геологического строения основания. Для описания поведения основания используется модель упругого полупространства. Обобщено решение Буссинеска на случай неравномерного распределения контактных напряжений и произвольной геометрии области воздействия. Контактное давление определяется с помощью итерационного алгоритма Шварца. Деформационное поведение плиты моделируется с использованием метода конечных элементов. Проведено исследование влияния жесткости фундаментной плиты на распределение осадок. Приведен пример проектирования. Рассмотрено влияние мероприятий по укреплению основания на величины осадок плиты. Приведены результаты численных исследований осадок фундамента на укрепленном основании, выполненные в GeoPlate Pro и Midas 2018 в предположении использования упругой модели поведения грунта. Продемонстрирована близость результатов, полученных в GeoPlate Pro, с результатами конечно-элементного моделирования в трехмерной постановке. Произведено сопоставление результатов расчета с данными мониторинга. Сделан вывод о необходимости учета жесткости здания и характера распределения силовых воздействий на фундаментную плиту при оценке осадок фундамента.

Ключевые слова: осадка фундамента, послойное суммирование, контактное давление, алгоритм Шварца, численное моделирование.

Для цитирования: Боталов С.Н., Куликов Р.Г., Салмин И.А. Определение осадок фундаментной плиты в GeoPlate Pro // Жилищное строительство. 2019. № 11. С. 3–10. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2019-11-3-10>

S.N. BOTALOV, Engineer (geosoft@maliningroup.com); R.G. KULIKOV, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics),
I.A. SALMIN, Head of Design Department
LLC "Stroitel'naya Kompaniya "InzhProektStroy" (34, Komsomlsky Prospect, Perm, 614000, Russian Federation)

Determination of Foundation Plate Settlement in GeoPlate Pro

The problem of determining the settlement of a deformable foundation plate on an elastic base is considered. The approach based on the method of layer-by-layer summation is applied, which makes it possible to significantly expand the technique due to the use of numerical procedures in order to take into account the influence of the geometry and stiffness parameters of the plate, loading features and heterogeneity of the geological structure of the base. The elastic half-space model is used to describe the behavior of the base. The Boussinesq solution is generalized to the case of non-uniform distribution of contact stresses and arbitrary geometry of the field of influence. The contact pressure is determined using an iterative Schwartz algorithm. The deformation behavior of the plate is modeled using the finite element method. The influence of the foundation plate stiffness on the sediment distribution is studied. An example of design is given. The influence of measures to strengthen the base on the sizes of the plate settlement is considered. The results of numerical studies of foundation sediment on a reinforced base, performed in GeoPlate Pro and Midas 2018 under the assumption of using an elastic model of soil behavior, are presented. The similarity of the results obtained in GeoPlate Pro with the results of finite element modeling in three-dimensional formulation is demonstrated. Comparison of calculation results with monitoring data is made. It is concluded that it is necessary to take into account the rigidity of the building and the nature of the distribution of force effects on the foundation plate when assessing the sediment of the foundation.

Keywords: foundation sediment, layer-by-layer summation, contact pressure, Schwartz algorithm, numerical modeling.

For citation: Botalov S.N., Kulikov R.G., Salmin I.A. Determination of foundation plate settlement in GeoPlate Pro. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2019. No. 11, pp. 3–10. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2019-11-3-10>

Определение осадки фундамента является одной из основных задач, с которой сталкиваются инженеры при проектировании зданий и сооружений. Качественное и количественное описание деформирова-

ния грунтового основания осложняется присутствием множества факторов, к которым можно отнести неоднозначность информации о геологическом строении грунтового массива, неоднородность и анизотропию

жесткостных характеристик грунтов в рассматриваемом объеме, выраженное неупругое поведение среды основания при высоких нагрузках и т. д.

Предельная осадка основания фундаментов объектов нового строительства представлена в СП 22.1333.2011 (приложение Д), и проектировщик, выбирая конструктивную схему фундамента или мероприятия по укреплению основания, должен добиться обеспечения требований нормативного документа. Не менее важным фактором является неоднородность осадок, обусловленная сложным пространственным строением грунтового основания, неравномерным характером распределения нагрузок на фундамент, а также формой фундамента. Существенная неравномерность осадок приводит к возникновению значительного крена сооружения, что особенно существенно для зданий большой этажности, возводимых в настоящее время.

Отдельной задачей, имеющей также большое значение, является определение влияния возводимого здания на прилегающую территорию, существующую застройку и коммуникации.

Проблема разработки методик, позволяющих с достаточной степенью достоверности определять осадку грунтового основания в результате воздействия сооружения, ни в коей мере не утратила свою актуальность. Более того, постоянное развитие и появление новых технологий конструирования фундаментов, а также технологий укрепления грунтов оснований предъявляют требования к разработке новых расчетных методик.

Среди существующих методик определения осадок основания условно можно выделить две основные группы. К первой группе можно отнести подходы, основанные на использовании фундаментальных решений задач о силовом воздействии на полупространство. В рамках данного направления разрабатывается большое количество расчетных методик, начиная от чисто аналитических подходов, предоставляющих инженеру-проектировщику готовый набор соотношений, и заканчивая численно-аналитическими методиками, требующими реализации в виде программных продуктов. Ко второй группе относятся численные методики, основанные на использовании пространственной дискретизации грунтового основания с последующим численным анализом, например использование метода конечных элементов. Построенные на базе различных систем определяющих соотношений и допущений, различные методики будут приводить к получению различных результатов при решении одной и той же задачи.

В настоящее время публикуется большое количество работ, посвященных сопоставлению результатов, полученных с использованием различных под-

ходов. В [1] рассматривается определение осадок фундамента двухэтажного здания. Результаты, полученные с использованием вычислительного комплекса PLAXIS, сопоставлены с данными аналитического расчета по действующим нормативным документам. Показано удовлетворительное соответствие результатов и сделан вывод о возможности использования данного программного комплекса для проектирования малонагруженных ленточных фундаментов. В [2] рассматривается задача об осадке фундамента сложной формы. При этом предлагается численно-аналитический метод, построенный на базе известного фундаментального решения. Результаты решения тестовой задачи сопоставляются с результатами аналогичных расчетов в ПК SCAD. Работа [3] посвящена численному исследованию осадок оснований высотных зданий. При этом предлагается при рассмотрении системы здание – фундамент – грунт податливые свойства грунта учитывать с помощью коэффициентов постели. Определение величин коэффициентов проведено методами Винклера и Пастернака. Расчетные значения осадок сопоставлены с результатами мониторинга.

В [3, 4] предлагаются подходы, позволяющие учитывать упругопластическое поведение основания разделения эпюры вертикального нормального напряжения от внешней нагрузки на упругую и упругопластическую составляющие. Представлено сопоставление аналитических результатов с экспериментальными данными. В [5] приведено сопоставление результатов расчетов осадки мачты освещения, полученных на основе нормативного документа СП 22.13330.2011, с результатами расчета в PLAXIS 2D. Показана эффективность использования данного программного комплекса для расчета фундамента на слабых грунтах.

Существенным остается вопрос учета сложных моделей механического поведения грунтового основания. В [6] предлагается подход, позволяющий учесть деформационную анизотропию грунтов. Работа [7] посвящена учету реологических явлений, протекающих в грунтовых основаниях при постоянной нагрузке. Произведено сопоставление инженерных и численных методов и сравнение результатов с материалами длительных натуральных наблюдений. В [8] путем численного моделирования в программно-вычислительном комплексе PLAXIS 3D проведено сопоставление результатов расчетов с использованием различных упругопластических моделей. Продемонстрирована чувствительность результатов к выбору механической модели поведения для глинистых грунтов. В [9] приведен анализ фактических осадок построенных объектов. На основании наблюдаемых данных отмечается нелинейный характер

кривых осадок и сделано заключение о роли горизонтальных перемещений в общей деформации основания.

Таким образом, можно отметить высокий интерес исследователей к разработке методик и соответствующих инструментов, позволяющих с достаточной точностью и невысокими трудозатратами проводить исследование поведения грунтового основания с учетом сложной геометрии фундамента, нетривиального геологического строения грунта, сложных моделей механического поведения. Очевидна необходимость применения информационных технологий и программных комплексов с целью решения поставленных задач.

Определение осадок фундамента в соответствии с СП 22.13330.2011

В настоящее время в практике проектирования фундаментных конструкций применяется метод послойного суммирования, включенный в СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01–83*».

В соответствии с пп. 5.6.31–5.6.41 нормативного документа осадка основания вычисляется по следующим соотношениям:

$$\begin{cases} s = \beta \sum_{i=1}^n \frac{(\sigma_{zp,i} - \sigma_{zy,i})h_i}{E_i} + \beta \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{zy,i}h_i}{E_{e,i}}, & p > \sigma_{zg,0} \\ s = \beta \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{zp,i}h_i}{E_{e,i}} & p \leq \sigma_{zg,0}, \end{cases}$$

где n – количество слоев, на которые разбита сжимаемая толща; h_i – толщина слоя; $E_i, E_{e,i}$ – модули деформации грунта по ветвям первичного и вторичного нагружения; $\sigma_{zp,i}, \sigma_{zy,i}$ – вертикальное напряжение от внешней нагрузки и веса вынутаго грунта в i -м слое; β – коэффициент, учитывающий степень боковой стесненности грунта при вертикальном сжатии, принимаемый равным 0,8; p – среднее давление под подошвой грунта; $\sigma_{zg,0}$ – вертикальное напряжение от собственного веса грунта на уровне подошвы фундамента. Глубина сжимаемой толщи в общем случае определяется из условия $\sigma_{zp} = 0,5\sigma_{zg}$ либо корректируется для ряда частных случаев.

Методика, изложенная в СП, предоставляет собой сильно упрощенную модель реального объекта. Во-первых, не учитывается неравномерность давления на грунт, возникающая вследствие контактного взаимодействия фундаментной плиты и основания. Предполагается, что основание нагружено равномерно распределенной нагрузкой. Во-вторых, не учитывается конкретная форма фундаментной плиты в плане. Необходимо выполнение перехода к некото-

рой простейшей форме фундамента с приведенными размерами. В-третьих, не учитывается жесткость фундаментной плиты, оказывающая существенное влияние на перераспределение контактного давления на основание. В-четвертых, не учитывается изменение геологического строения грунтового массива в плане.

Основные ограничения методики, изложенной в СП, связаны с использованием решений, полученных для определения осадки упругого полупространства при действии постоянной нагрузки в областях простейшей формы (круг, прямоугольник). Использовать полученные результаты для оценки осадки плиты конечной или абсолютной жесткости не совсем корректно. Также следует отметить невозможность определения относительной разности осадок, обусловленной неоднородностью строения грунтового основания в плане, переменностью внешнего нагружения и формой фундамента.

Тем не менее, опираясь на основные идеи подхода, имеется возможность с использованием вычислительных технологий существенно усложнить постановку задачи по определению осадок плиты на неоднородном грунтовом основании.

Методика определения осадок фундаментной плиты в GeoPlate Pro

Необходимость учета всех упомянутых факторов приводит нас к известной постановке [10], включающей дифференциальное уравнение изгиба плиты и операторное уравнение, описывающее отклик грунтового основания на приложенную нагрузку:

$$\begin{cases} D\Delta^2 w = p - q \\ L(q) = w \end{cases}, \quad (1)$$

где D – изгибная жесткость плиты; w – функция осадок; p – внешняя нагрузка; q – реакция (отпор) грунта (контактное давление); L – оператор, связывающий контактное давление на грунт с осадками поверхности, т. е. определяющий некоторую модель поведения грунтового основания.

Решение рассматриваемой задачи может быть получено с помощью итерационного алгоритма Шварца [10], предполагающего разделение исходной постановки на две связанные задачи. Система (1) может быть сведена к решению уравнения:

$$D\Delta^2 w + kw = p, \quad (2)$$

где k – коэффициент постели, зависящий от координат, уточняемый в результате итерационного процесса.

На начальном этапе, задав значение k , из решения (2) определяют осадки плиты w . По полученным

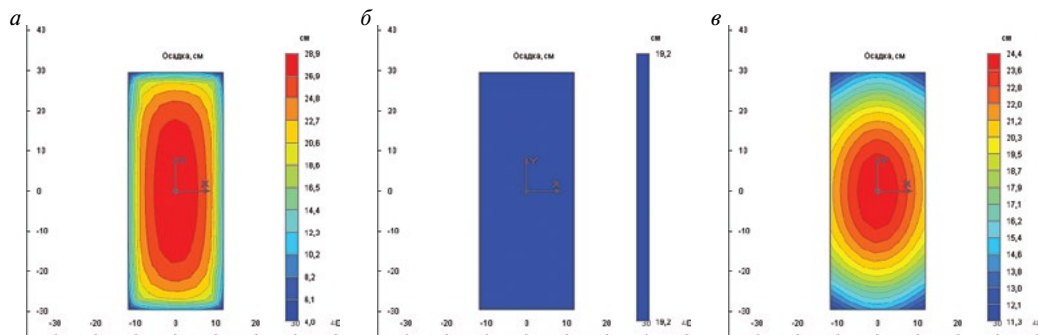


Рис. 1. Поля осадок для трех случаев жесткости фундаментной плиты: а – воздействие нагрузки непосредственно на грунт; б – абсолютно жесткая плита; в – плита конечной жесткости

значениям w при выбранном k вычисляется контактное давление q . Разрешая операторное уравнение $L(q)=w$, определяют осадки w при заданном контактном давлении и пересчитываются коэффициенты постели. Далее вновь решается уравнение (2) с учетом уточненного поля коэффициента постели. Итерационный процесс продолжается до достижения сходимости, оцениваемой по некоторому критерию. В качестве такого критерия можно принять условие близости на соседних итерациях полей коэффициента постели, осадок или контактного давления.

При рассмотрении задачи (1) наиболее существенным представляется вопрос выбора модели основания. В методике, реализованной в приложении GeoPlate Pro, используется модель, основанная на использовании классического решения задачи Буссинеска о действии сосредоточенной силы на упругое полупространство [11].

При анализе задач о действии распределенной нагрузки в некоторой области производится обобщение решения Буссинеска, основанное на суммировании множества решений, соответствующих случаям действия нагрузки в малых областях. С учетом предельного перехода получены интегральные соотношения, аналитическое вычисление которых возможно лишь в простейших случаях. Стоит отметить, что для областей произвольной формы и неравномерного нагружения широко известных решений не получено.

В общем случае величина вертикальной компоненты тензора напряжений σ_z в произвольной точке с координатами (x_0, y_0, z_0) при действии в области A переменной нагрузки $p(x, y)$ вычисляется в виде:

$$\sigma_z(x_0, y_0, z_0) = \frac{3}{2\pi} \iint_A \frac{p(x, y) (z - z_0)^3}{((x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2)^{5/2}} dx dy.$$

Используя описанный подход, возможно построение численных методик определения напряженно-деформированного состояния грунтового массива при наличии неравномерных нагрузок, действующих в областях произвольной формы.

Так как в общем случае характер распределения функции давления неизвестен, необходимо использовать некоторые приемы аппроксимации. Наиболее общим является подход, основанный на триангуляции области контакта с использованием интерполяции функции давления в пределах треугольного элемента. Таким образом функция однозначно определяется совокупностью своих значений в узлах сетки, а качество аппроксимации зависит от густоты сетки.

Вычисление определенных интегралов по области нагружения может быть выполнено численно с использованием квадратурных формул [12].

Основываясь на данных о распределении напряжений, можно определить глубину сжимаемой толщи и величину осадки с использованием метода послойного суммирования. Таким образом на каждом шаге итерационного алгоритма Шварца уточняется поле коэффициента постели.

Решение задачи моделирования деформационного поведения плиты (2) производится с использованием метода конечных элементов. Для дискретизации области используется треугольный трехузловой конечный элемент с эрмитовой аппроксимацией [12]. В качестве узловых неизвестных выступают прогиб и два угла поворота относительно координатных осей в плоскости плиты. Используются кубические функции формы.

Наиболее существенным представляется вопрос о влиянии жесткости фундаментной плиты на перераспределение контактных напряжений и, как следствие, на величину осадки.

Рассмотрим прямоугольную фундаментную плиту с размерами 23,5 и 59 м, заглубленную на 3,6 м. Среднее давление под плитой составляет 364 кПа.

Вычисленная в соответствии с СП 22.13330.2011 величина осадки для рассматриваемого грунтового напластования составила 288,3 мм, глубина сжимаемой толщи 19,24 м.

Проведем расчеты в GeoPlate Pro для различных вариантов жесткости плиты, нагруженной равномерным давлением 364 кПа.

На рис. 1 представлены поля осадок для трех различных вариантов жесткости плиты.

Первый вариант соответствует случаю нулевой жесткости плиты, иными словами, рассматривается воздействие равномерной нагрузки непосредственно на грунт. Величина осадки в центральной точке прямоугольной области близка к значению, полученному по СП 22.13330.2011.

Во втором варианте рассматривается осадка абсолютно жесткой плиты. По отношению к предыдущему случаю максимальные осадки уменьшились на 34%.

Последний вариант соответствовал случаю конечной жесткости плиты. При этом плита полагалась изотропным упругим телом с модулем упругости 30 ГПа. Толщина плиты принималась равной 1200 мм. Максимальная величина осадки в данном случае на 16% меньше, чем в случае непосредственного воздействия нагрузки на грунт, и на 27% превышает величину, соответствующую случаю недеформируемой плиты.

Таким образом, на основе полученных результатов, можно сделать вывод о существенном влиянии учета жесткости плиты и характера контактных напряжений на величины осадок. Результаты, полученные для случаев нулевой и бесконечной жесткостей, можно рассматривать как верхнюю и нижнюю оценки реального значения осадки. В зависимости от вели-

чины изгибной жесткости и габаритов плиты реальное решение будет смещаться к одной или другой границе интервала.

Пример проектирования

Рассматривается задача, связанная с усилением грунтового основания жилого 25-этажного дома со встроенными помещениями общественного назначения в г. Перми.

Состав и физико-механические характеристики инженерно-геологических элементов, формирующих основание, приведены в табл. 1.

Пространственное геологическое строение грунтового массива определяется информацией о последовательности и мощности грунтовых слоев в семи скважинах (рис. 2). Фундаментная плита считается изотропным телом с модулем упругости 30 ГПа и коэффициентом Пуассона 0,3. Толщина плиты постоянна и составляет 1200 мм. Габаритные размеры плиты 28,7 и 62 м. Плита заложена на глубине 3,6 м. Согласно исходным данным полагается, что плита нагружена равномерным давлением интенсивностью 364 кПа.

На начальном этапе с использованием программы GeoPlate Pro было получено решение задачи об осадке фундаментной плиты на естественном ос-

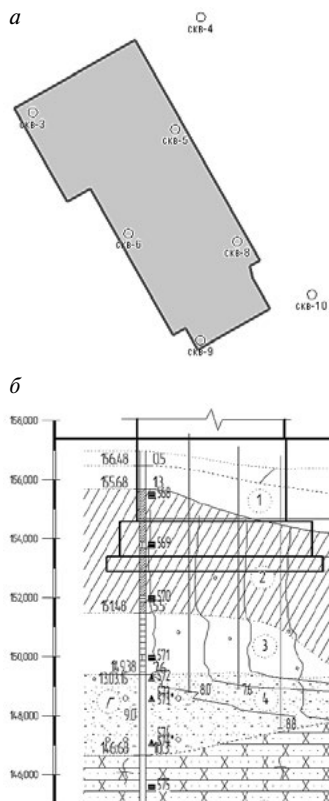


Рис. 2. Форма плиты и схема расположения скважин (а); инженерно-геологическое строение скважины № 3 (б)

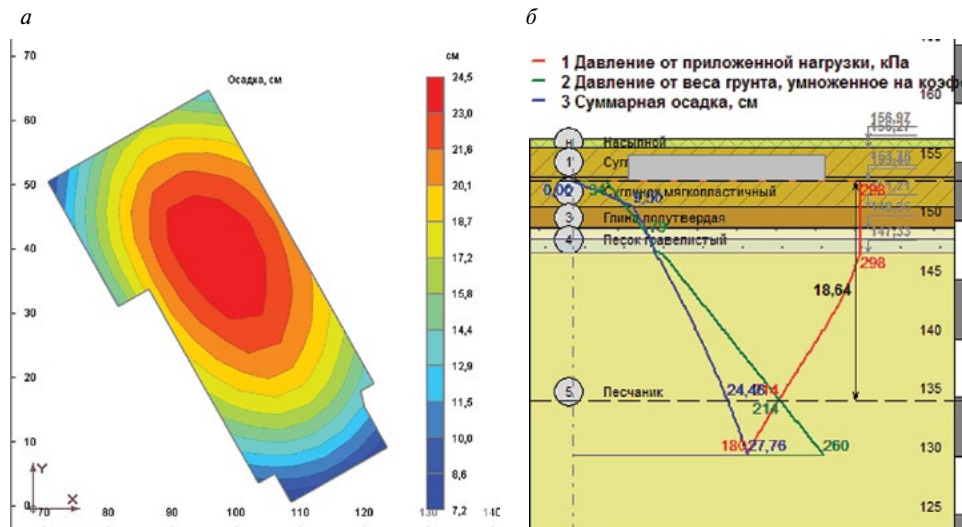


Рис. 3. Результаты расчета в GeoPlate Pro для случая неукрепленного основания: а – поля осадок; б – эпюры напряжений и осадок по глубине

Таблица 1
Расчетные значения физико-механических характеристик грунтов основания

Номер ИГЭ	Наименование	Удельный вес, кН/м ³	Модуль деформации, МПа
ИГЭ 1	Суглинок тяжелый, пылеватый, тугопластичный, с прослоями полутвердого	18,91	9
ИГЭ 2	Суглинок тяжелый, пылеватый, мягкопластичный	18,82	4,5
ИГЭ 3	Глина легкая, пылеватая, полутвердая, с прослоями тугопластичной	19,01	18
ИГЭ 4	Песок гравелистый с прослоями гравийного грунта с песчаным заполнителем	19,11	26,4
ИГЭ 5	Песчаник сильноветревший с прослоями аргиллита сильноветревшего	19,5	19

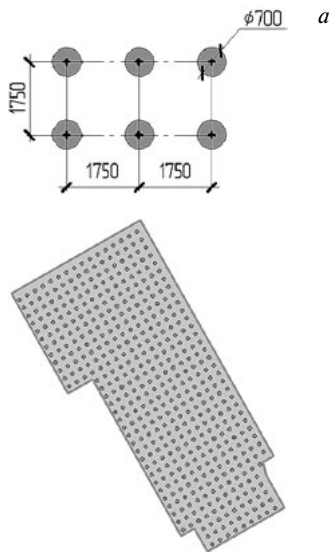


Рис. 4. Схема установки грунтоцементных колонн

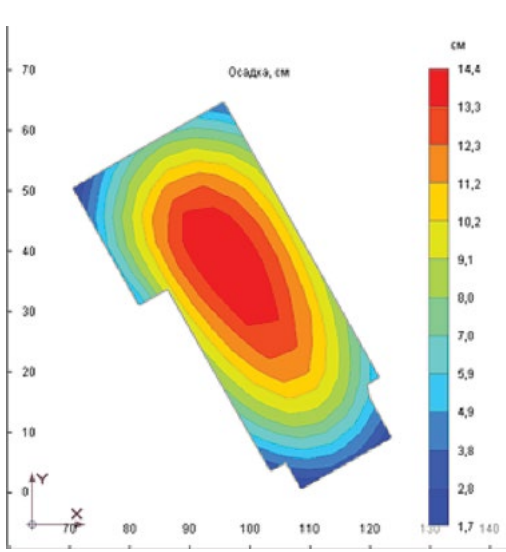
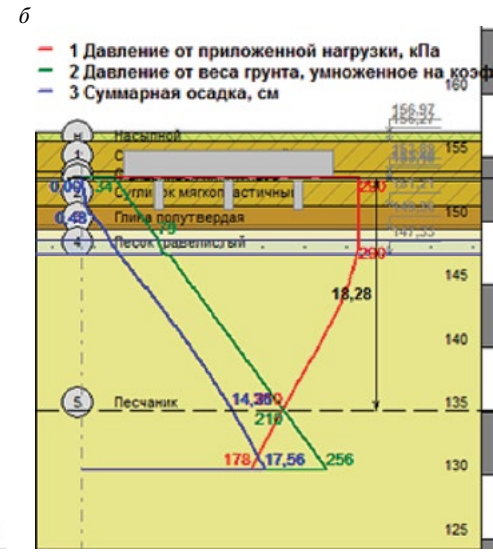


Рис. 5. Результаты расчета в GeoPlate Pro для случая укрепленного основания: а – поля осадок; б – эпюры напряжений и осадок по глубине



новании. На рис. 3 представлены результирующие поля осадок и эпюры напряжений и осадок по глубине сжимаемой толщи в точке, соответствующей максимальным осадкам. Результаты получены с учетом жесткости плиты. Величина осадок изменяется от 72 до 245 мм.

С целью уменьшения осадок принято решение о производстве укрепления слабых грунтов основания методом струйной цементации. Наиболее низким модулем, равным 4,5 МПа, обладает ИГЭ-2 суглинок тяжелый пылеватый, залегающий на глубине до 3,5 м относительно основания плиты.

Принята квадратная схема установки колонн с шагом 1,75 м, представленная на рис. 4. Длина колонн составляла 2,3 м, диаметр 700 мм. Модуль деформации грунтоцемента по результатам опытных работ составил 780 МПа. Непосредственно под основанием плиты создана щебеночная подготовка толщиной 0,2 м.

Результаты расчетов, соответствующие случаю укрепленного основания, представлены на рис. 5. По результатам расчетов можно сделать вывод, что в результате мероприятий по укреплению основания в предположении конечной жесткости плиты максимальные осадки уменьшились до 144 мм и стали на 41% ниже, чем в исходном случае.

Рассматриваемая задача в трехмерной постановке была решена в программном комплексе Midas 2018. При решении использовался метод конечных элементов, задача рассматривалась в упругой постановке. Конечно-элементная модель содержала 95812 элементов и 18353 узла. Глубина сжимаемой толщи составляла 19 м. Полученное поле вертикальных перемещений плиты представлено на рис. 6.

По результатам расчета максимальные осадки составили 163 мм. При качественном подоби ре-

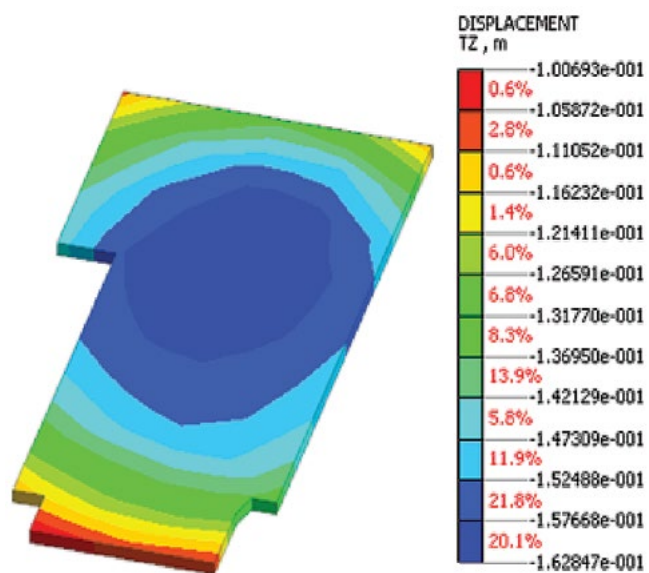


Рис. 6. Поле осадок фундаментной плиты на укрепленном основании, полученное в Midas 2018

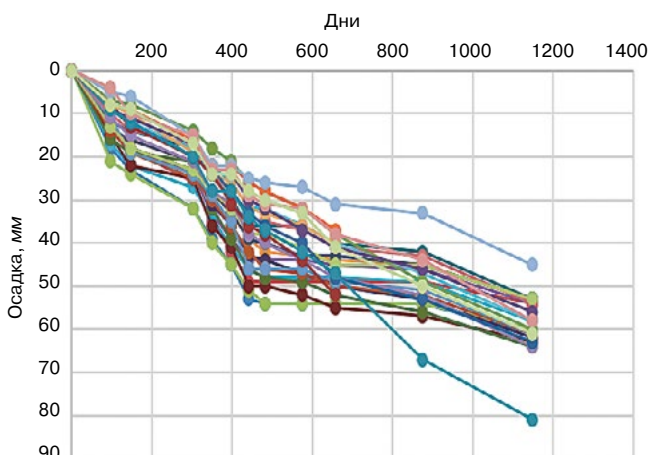


Рис. 7. Результаты мониторинга осадок

Таблица 2
Величины осадок по расчетам и данным мониторинга, мм

Номер маяка	Результаты мониторинга	GeoPlate Pro (конечная жесткость плиты)	GeoPlate Pro (абсолютно жесткая плита)	Midas 2018
M1	54	17,7	66	112
M4	54	20,2	79	106
M5	58	70,1	76,6	109
M23	81	117	92,1	157
M27	61	69,4	105,3	128,3

ультаты, полученные в GeoPlate Pro и в Midas 2018, в области максимальных осадок имеют расхождение до 14%.

При строительстве здания проводился геодезический мониторинг осадок основания в 27 точках. Результаты мониторинга осадок на протяжении строительства представлены на рис. 7.

В табл. 2 приведены результаты мониторинга на момент завершения последнего цикла строительства и вычисленные величины осадок в шести точках.

Список литературы

- Игошева Л.А., Клевко В.И. Сравнение результатов определения вертикальной осадки ленточного фундамента аналитическим методом и методом конечных элементов // *Вестник Пермского национального политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика*. 2014. № 6. С. 30–38.
- Бондарь Т.М. Расчет осадки поверхности грунтового основания при сложной форме подошвы фундамента // *Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета*. 2014. № 6. С. 65–69.
- Пронозин Я.А., Наумкина Ю.В., Рачков Д.В. Уточненный метод послойного суммирования для определения осадки плитных фундаментов // *Академический вестник УРАЛНИИПРОЕКТ РААСН*. 2015. № 3. С. 82–86.
- Пронозин Я.А., Рачков Д.В., Азаров К.В. Сравнительный анализ методов расчета осадки фундаментов. *Актуальные проблемы архитектуры, строительства, энергоэффективности и экологии: Сб. материалов международной научно-практической конференции*. Тюмень, 2016. С. 121–126.
- Черемных А.А. Сравнение результатов расчета вертикальной осадки фундамента, полученных аналитическим методом и методом конечных элементов // *Современные технологии в строительстве. Теория и практика*. 2016. Т. 2. С. 188–196.
- Коробова О.А., Максименко Л.А. Методы усовершенствования расчета осадок грунтовых осно-

Выводы

Анализируя полученные результаты, можно сделать заключение о большей близости результатов, полученных для случая бесконечной жесткости плиты, к данным мониторинга. Вероятно, этот факт говорит о существенном влиянии жесткости надфундаментных конструкций на величины осадок, которая некоторым образом должна быть введена в расчетную модель. Кроме того, необходимо учитывать конструктивные особенности здания, определяющие перераспределение нагрузок от несущих конструкций на фундаментную плиту.

Реализованный в GeoPlate Pro подход, основанный на методе послойного суммирования, существенно расширяет данную методику, учитывая влияние геометрии и жесткостных параметров плиты, особенности нагружения и неоднородность геологического строения основания. На рассматриваемом примере продемонстрирована близость результатов с полученными при решении аналогичной задачи с привлечением конечно-элементного подхода в трехмерной постановке.

References

- Igosheva L.A., Kleveko V.I. Analysis of girder foundation vertical displacement with analytic method and finite-element model. *Vestnik Permskogo natsional'nogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaya ekologiya. Urbanistika*. 2014. No. 6, pp. 30–38. (In Russian).
- Bondar' T.M. Calculation of earth foundation settlement with irregular shape of foundation. *Nauchnyi vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2014. No. 6, pp. 65–69. (In Russian).
- Pronozin Ya.A., Naumkina Yu.V., Rachkov D.V. Modified layerwise summation method for settlement calculations of plate foundations. *Akademicheskii vestnik URALNIIPROEKT RAASN*. 2015. No. 3, pp. 82–86. (In Russian).
- Pronozin Ya.A., Rachkov D.V., Azarov K.V. Comparison of settlement calculation methods. *Actual problems of architecture, building, energy efficiency and ecology. International research-to-practice conference information package*. Tyumen'. 2016, pp. 121–126. (In Russian).
- Cheremnykh A.A. Vertical displacement analysis of analytic method results and finite-element model results. *Sovremennye tekhnologii v stroitel'stve. Teoriya i praktika*. 2016. Vol. 2, pp. 188–196. (In Russian).
- Korobova O.A., Maksimenko L.A. Modification methods of earth foundation settlement calculations. *INTEREKSP0 GEO-SIBIR'*. 2015. Vol. 3. No. 4, pp. 198–203. (In Russian).

- ваний // *ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ*. 2015. Т. 3. № 4. С. 198–203.
7. Васенин В.А., Астафьева Е.Д. Учет реологических свойств грунтов при расчете осадок зданий // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2012. № 1. С. 1–21.
 8. Байковский Д.Ю., Филатов Н.А. Влияние модели грунта на величину осадки основания фундамента мелкого заложения. *Актуальные проблемы современной когнитивной науки: Сборник статей международной научно-практической конференции*. Уфа, 2018. С. 50–52.
 9. Соколов Н.С. Метод расчета осадок большемерных фундаментов при повышенных нагрузках // *Жилищное строительство*. 2018. № 7. С. 38–42.
 10. Федоровский В.Г., Безволев С.Г. Расчет осадок фундаментов мелкого заложения и выбор модели основания для расчета плит // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2000. № 4. С. 10–18.
 11. Леденев В.В., Однолько В.Г., Нгуен З.Х. Теоретические основы механики деформирования и разрушения. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2013. 312 с.
 12. Zienkiewicz O.C. *The Finite Element Method*. McGraw-Hill, 1967, Butterworth-Heinemann, 2000. 334 p.
 7. Vasenin V.A., Astaf'eva E.D. Using rheologic soil properties for building settlement calculations. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzhenii*. 2012. No. 1, pp. 1–21. (In Russian).
 8. Baikovskii D.Yu., Filatov N.A. Soil model influence to shallow foundation settlement. *Actual problems of modern cognitive science: international research-to-practice conference information package*. Ufa. 2018, pp. 50–52. (In Russian).
 9. Sokolov N.S. Settlement calculation methods for oversized foundations and high loads. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2018. No. 7, pp. 38–42. (In Russian).
 10. Fedorovskii V.G., Bezvolev S.G. Settlement calculation for shallow foundations and choice foundation model for plate calculation. *Osnovaniya, fundamentey i mekhanika gruntov*. 2000. No. 4, pp. 10–18. (In Russian).
 11. Ledenev V.V., Odnol'ko V.G., Nguen Z.Kh. *Teoreticheskie osnovy mekhaniki deformirovaniya i razrusheniya* [Theoretical basis of deformation and destruction mechanics]. Tambov: TGTU. 2013. 312 p.
 12. Zienkiewicz O.C. *The Finite Element Method*. McGraw-Hill. 1967. Butterworth-Heinemann. 2000. 334 p.

12-14
МАРТА

ПРИГЛАШАЕМ К УЧАСТИЮ

КРЫМ. СТРОЙИНДУСТРИЯ. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ. ВЕСНА-2020

34-Я МЕЖРЕГИОНАЛЬНАЯ
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА

ФОРУМ КРЫМСКИЕ
ВЫСТАВКИ

г. Симферополь, ул. Набережная, 75 В,
ТЦ «Гагаринский»

т.: +7 978 78 178 83, +7(3652) 500 864
marketing@expoforum.biz expoforum.biz