



УДК 624.131

© С. А. Кудрявцев, К. М. Складорова, 2012

## АНАЛИЗ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОСНОВАНИЙ ПЛИТНЫХ ФУНДАМЕНТОВ ЗДАНИЙ ПОВЫШЕННОЙ ЭТАЖНОСТИ В ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ Г. ХАБАРОВСКА

*Кудрявцев С. А.* – д-р техн. наук, проф. кафедры «Железнодорожный путь, основания и фундаменты», тел.: 407-591, e-mail: kudr@festu.khv.ru; *Складорова К. М.* – асп. кафедры «Железнодорожный путь, основания и фундаменты», тел: 8914704638, e-mail: kseniya\_skl@mail.ru (ДВГУПС)

Возведение зданий повышенной этажности на плитном фундаменте в инженерно-геологических условиях города Хабаровска представляет собой сложную геотехническую и конструктивную задачу. В связи с этим весьма актуальным является проектирование и устройство надёжного фундамента. Для выбора и устройства надёжного фундамента необходимо знать распределение напряжений в основании и в конструктивных элементах надземной конструкции, неравномерность деформаций всех элементов системы «основание-фундамент-сооружение». Это возможно на основании совместных пространственных расчётов с использованием численного моделирования методом конечных элементов.

The construction of raised number of storeys buildings on slab foundation in geotechnical conditions of Khabarovsk city is a complicated problem. In this respect foundation engineering becomes rather essential. In order to set a firm foundation it is necessary to take into account the pressure distribution at the structure base, elevated construction, in homogeneity of deformation elements of system “base – slab foundation – high storey building”. This possible as a matter of collaboration calculation with use of the numerical modeling by finite element method.

*Ключевые слова:* плитный фундамент, здание повышенной этажности, численное моделирование методом конечных элементов.

### Введение

С каждым годом проблема получения новых строительных площадок в мегаполисах и крупных городах становится все более сложной задачей из-за достаточно высокой цены на землю. Решение этой проблемы заключается в получении с каждой земельной площади максимального количества квадрат-



ных метров за счет увеличения этажности здания или сооружения. Здания повышенной этажности являются доминантами и достопримечательностями городов и мегаполисов.

Строительство домов повышенной этажности в сегменте жилой недвижимости уменьшает стоимость квадратного метра земли, позволяют снизить и стоимость готового жилья, а все технические сложности в настоящее время вполне разрешимы.

Характерными чертами зданий повышенной этажности является значительная разница между высотой зданий и размерами его в плане. Грунты непосредственно под подошвой фундаментов таких зданий работают, как в основании жесткого штампа.

Возведение зданий повышенной этажности на плитном фундаменте в инженерно-геологических условиях г. Хабаровска представляет собой актуальную и сложную геотехническую и конструктивную задачу по проектированию и строительству надёжного фундамента и надземных конструкций.

Основным критерием сооружения надёжного фундамента и основания является эффективное распределение напряжений, возникающих в основании для эффективного перераспределения неравномерности деформаций и напряжений в наземных конструкциях здания. Основной задачей таких исследований является совместная адекватная оценка основных исходных данных влияющих на безопасность всего сооружения таких, как напластование грунтов; сложная геометрия возводимого здания; пространственная совместная работа грунта основания с учётом физической нелинейности и надземной конструкции; влияние жёсткости надземных конструкций здания (железобетонного каркаса) на перераспределение неравномерности деформаций основания и др. Корректная оценка этих параметров в расчётах возможна только на основании совместных пространственных расчётов системы «основание-фундамент-сооружение», позволяющих учитывать множество реальных факторов влияющих на безопасность здания в целом.

#### **Методика численного моделирования оснований фундаментов зданий повышенной этажности**

При рассмотрении пространственных совместных задач о взаимодействии зданий и оснований целесообразно учитывать приведённые факторы в полной мере с использованием методики численного моделирования методом конечных элементов (МКЭ).

Решение задачи методом конечных элементов заключается в том, что расчётная область (фундамент – основание – сооружение) разбивается на некоторое число подобластей – конечных элементов. Элементы могут быть одномерными, являться плоскими или пространственными фигурами.

Физические задачи, решаемые методом конечных элементов, описываются дифференциальными уравнениями. Преимуществами МКЭ, благодаря которым он получил широкое применение, являются [1]:



1. Свойства материалов смежных элементов могут быть различны. Это даёт возможность применять МКЭ при расчёте грунтов и конструктивных элементов сооружения имеющих различные свойства.

2. Криволинейные области могут быть аппроксимированы с помощью прямолинейных элементов или аппроксимирована полностью с помощью криволинейных элементов, что позволяет использовать МКЭ для расчёта зданий повышенной этажности различной конфигурации в плане.

3. Размеры элементов могут быть переменными, что даёт возможность укрупнять или разбивать на более мелкие элементы рассчитываемую систему, если в этом есть необходимость.

4. При помощи МКЭ можно рассматривать граничные условия с разрывной поверхностной нагрузкой, а так же смешанных граничных условий.

Все эти преимущества объединены в программный комплекс «FEM-models», разработанный сотрудниками ООО «ПИ «Геореконструкция-Фундаментпроект» под руководством профессора В.М.Улицкого г.Санкт-Петербург [2].

Предлагаемая методика численного моделирования работы системы «основание - фундамент - наземные конструкции зданий повышенной этажности» является составной частью программного комплекса FEM-models.

Программный комплекс состоит из пяти компонентов: решателя, графического редактора, среды разработчика, библиотеки моделей, структуры универсального конечного элемента.

«Решатель» является ядром программы, который из матриц отдельных конечных элементов формирует разрешающую матрицу системы конечных элементов, а в дальнейшем производится решение системы линейных алгебраических уравнений.

Графический редактор – это система конечно-элементарных схем, которые могут изменяться во времени. Графический редактор необходим для создания конечно-элементных схем, а так же для анализа результатов вычислений в наглядной форме (в виде изолиний, эпюр, графиков, деформированных схем и т.д.)

При помощи среды разработчика создаются, тестируются и анализируются расчётные модели.

Для выбора пользователем адекватной модели в программе существует библиотека моделей, в которой хранятся конечно-элементные модели.

В единое целое все компоненты объединяет структура универсального конечного элемента, при помощи которой можно описать практически любую модель МКЭ. Элемент, описанный данной структурой, может иметь неограниченное число степеней свободы в каждом узле (перемещения, ускорения, температуры и т.д.). В узлах могут быть приложены силы или различного рода воздействия. Элемент, созданный при помощи данной программы, описывается определёнными параметрами, которые задает пользователь, число параметров определяется автором модели.

При исследовании напряженно-деформированного состояния (НДС) системы «основание - фундамент - наземная конструкция зданий повышенной этажности» использовалась упругопластическая модель грунта основания в виде объемных элементов с критерием прочности Мора-Кулона и равнообъемным законом течения. Работа конструкций здания моделировалась упругими пластинчатыми и стержневыми элементами (Стены, перекрытия, фундаментная плита – упругие пластины, колонны – упругие стержни). Выбор интерполирующих полиномов и построение матрицы жесткости конечного элемента, а также составление и решение системы алгебраических уравнений относительно узловых значений основывается по методике, предложенной профессором А.Б.Фадеевым [3].

При разработке программы авторами были приняты следующие основные допущения:

- грунт рассматривается как идеально-упругопластическая среда с критерием прочности Кулона, подчиняющаяся законам пластического течения;
- реакция среды на объемные деформации упругая, а на сдвигающие – упругопластическая с равнообъемным течением;
- интерполирующие полиномы для каждого конечного элемента приняты линейными, а напряжения и деформации в нем – постоянны;
- природное напряженное состояние заменяется гидростатическим тензором обжатия «характерного объема» грунта;
- существует завершенность фильтрационной консолидации и реологических процессов в основании.

Полные деформации грунтовой среды представлены в виде суммы упругих  $d\varepsilon_{ij}^e$  и пластических  $d\varepsilon_{ij}^p$  деформаций

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p \quad (1)$$

Для определения  $d\varepsilon_{ij}$  используется теория пластического течения в форме неассоциированного закона:

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \quad F \neq f \quad (2)$$

где  $d\lambda$  - малый скалярный множитель;  $F$  - пластический потенциал;  $\sigma_{ij}$  - компоненты напряжений;  $f$  - критерий предельного состояния.

При переходе из упругого состояния в пластическое вектор  $\sigma_{ij}$  - проходит через плоскость, касательную к поверхности предельного состояния, а конец вектора напряжения движется по этой поверхности. В данном случае нагружение будет нейтральным, при котором законы пластичности и упругости совпадают (возникают только упругие деформации), что является условием непрерывности.

При решении упругопластической задачи (плоская деформация) используется схема идеально-пластической среды с критерием прочности Кулона в виде:



$$f = \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} + (\sigma_x + \sigma_y) \sin \varphi - 2c \cos \varphi = 0 \quad (3)$$

где  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  - осевые напряжения;  $\varphi$  - угол внутреннего трения;  $c$  - удельное сцепление.

Для рассматриваемой среды основные параметры границы предельной поверхности  $c, \varphi$  постоянны и не зависят от накопленной пластической деформации. При достижении предельной поверхности  $f$  происходит равнообъемное течение и пластический потенциал  $F$  параллелен гидростатической оси. При выходе за критерий предельного состояния на каждом цикле итерации поверхность текучести совпадает с поверхностью начала пластичности, таким образом, приращение пластических деформаций происходит в результате нейтрального нагружения.

Идеализация модели грунтового основания осуществляется следующим образом. Если при внешнем воздействии нагрузок напряжение грунта «характерного объема» меньше предельного  $\sigma \neq \sigma_{np}$ , то связь между напряжениями и деформациями описывается законом Гука, который для условий плоской деформации может быть записан в виде:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{E'(\varepsilon_1 + \nu'\varepsilon_3)}{(1 - \nu'^2)} \\ \sigma_3 &= \frac{E'(\varepsilon_3 + \nu'\varepsilon_1)}{(1 - \nu'^2)} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Здесь  $E' = \frac{E}{(1 - \nu'^2)}$ ;  $\nu' = \frac{\nu}{(1 - \nu)}$  - плоские аналоги модуля Юнга  $E$  и коэффициента Пуассона  $\nu$ .

В системе «основание – фундамент – наземные конструкции зданий повышенной этажности» важную роль в сохранении целостности строений, как в процессе строительства, так и в период эксплуатации играют основания. От прочности слагающих их грунтов, степени деформируемости под нагрузкой зависит надёжность будущего сооружения.

### Инженерно-геологические условия г.Хабаровска

Хабаровск – «город на трех холмах» и речных террасах Амура. Город и прилегающая территория располагаются в пределах одной из наиболее крупных на Дальнем Востоке – Средне-Амурской межгорной впадины. На его территории выделяются погруженные участки, заполненные кайнозойскими слабосцементированными континентальными образованиями, и поднятия, сложенные более древними и более крепкими палеозойскими и мезозойскими осадочными изверженными породами. Хабаровск и его окрестности расположены в суровых климатических условиях с разнообразным рельефом и довольно пёстрым составом грунтов, с которыми приходится иметь дело на всех этапах строительства [4].



В рельефе г.Хабаровска можно выделить три основных типа: горный денудационно-эрозионный, предгорный денудационно-аккумулятивный, равнинный аккумулятивный.

Все породы в пределах рассматриваемой территории можно разделить на две большие группы: породы коренной основы и поверхностные отложения.

Скальные грунты прочные и средней прочности залегают в северной, центральной и южной частях города, так же обнажаются в береговом обрыве правого берега р.Амур. К поверхностным отложениям относятся грунты четвертичного возраста: галечниковые, песчаные, глинистые и заторфованные грунты эллювиально-делювиального, аллювиального и озерно-аллювиального происхождения, а так же техногенные образования. На скальных грунтах залегают крупнообломочные грунты на всей территории города, в русле реки Амур. Эллювиальные, щебенчатые и дресвяные грунты с суглинистым заполнителем занимают площадь более 6 км<sup>2</sup>, мощность их достигает 8 м, мощность зоны выветривания достигает 60-80м.

Важнейшая особенность геологического строения – это неоднородность его строения, значительная изменчивость прочностных и деформационных свойств эллювиальных образований. Все эти факторы в соответствии с нормативными требованиями должны быть учтены при проектировании и производстве работ в черте города.

Делювиальные отложения обладают, в большинстве своём, достаточно высокой несущей способностью и являются надёжными основаниями сооружений в центральной и северной части г.Хабаровска.

Исходя из выше изложенного, строительство зданий и сооружений в г.Хабаровске целесообразно вести с учётом инженерно-геологических условий, с применением защитных и профилактических мероприятий от неблагоприятного влияния различных природных и техногенных факторов.

### **Исследование НДС оснований плитных фундаментов зданий повышенной этажности**

Анализ результатов численного моделирования устройства зданий повышенной этажности на плитных фундаментах в г.Хабаровске проводился по ряду спроектированных и построенных сооружений [5-7]. В процессе работы были выполнены пространственные расчёты НДС системы «основание – фундамент – наземные конструкции зданий повышенной этажности» для различных инженерно-геологических условий и конструктивных решений зданий г.Хабаровска.

Были рассмотрены следующие здания:

- двадцати трёх этажный односекционный с техническим подпольем жилой дом проектируется на береговом склоне р. Амур по ул. Кавказкой г. Хабаровска, Каркас здания монолитный железобетонный с жесткой конструктивной схемой, представленной продольными и поперечными несущими пилонами и дисками перекрытий. Фундаментом здания является плита толщиной равной 0,8м.



- жилой дом переменной этажности (12 и 14 этажей) со встроенным магазином, офисами и автопарковкой проектируется в пределах первой надпойменной террасы р. Амур по ул. Флегонтова в г. Хабаровске. Конструктивная схема здания – рамно-связевая. Здание с железобетонными монолитными колоннами, дисками перекрытий и диафрагмами жесткости. Фундаментом здания является сплошная железобетонная плита толщиной 0,9 м.

- жилой дом переменной этажности со встроенно-пристроенным магазином и подземной автостоянкой проектируется по ул. Саратовской в г. Хабаровска, имеет Г-образную конфигурацию в плане и состоит из двух разноэтажных (10 и 12 эт.) индивидуальных секций. Фундаментом здания является монолитная железобетонная плита толщиной 0,7 м.

Расчётная схема системы «основание – фундамент – наземные конструкции зданий повышенной этажности» приведена на рис.1.

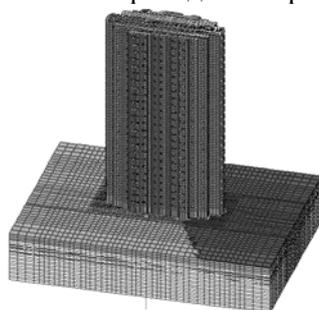


Рис. 1. Расчётная схема 23-этажного здания по ул. Кавказской

При решении численных задач напряженно-деформированного состояния зданий были выполнены поверочные аналитические расчеты осадок основания, с определением нижней границы сжимаемой толщи исходя из реальной геотехнической ситуации.

Для определения веса зданий были составлены пространственные схемы зданий. Для того, чтобы исключить некоторые степени свободы системы в фундаментной плите - она была закреплена от перемещений. Разница в расчете наземной нагрузки на основание по расчетной схеме и аналитическому расчету составляет 8%, что позволяет с уверенностью выполнять численные расчеты по собранной расчетной схеме.

При определении нижней границы сжимаемой толщи и поверочного расчета осадки плитных фундаментов зданий повышенной этажности был выполнен аналитический расчет. Расчет осадок выполнен согласно СНиП 2.02.01-83 «Основания зданий и сооружений» методом послойного суммирования в программе MathCAD. Были определены отметки подошвы фундамента в расчетной схеме. Произведена проверка давления по подошве плитного фундамента и сравнение его с расчётным сопротивлением грунта основания. Аналитическим методом определена глубина сжимаемой толщи основания и расчетная осадка, которая при численном моделировании являлась нижней границей расчетной схемы.

На рис. 2 приведены изолинии осадок фундаментной плиты 23-этажного здания.

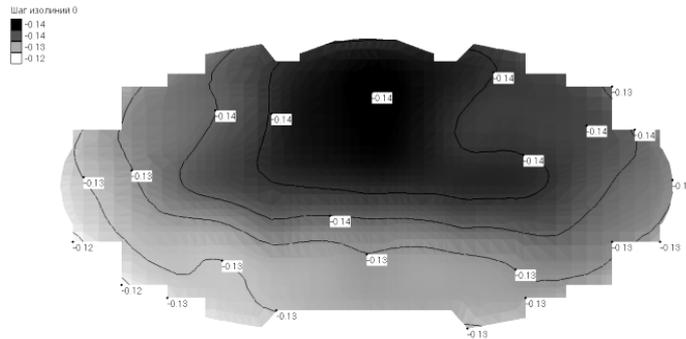


Рис. 2. Изолинии осадок (м) фундаментной плиты 23 этажного здания

На примере 23-этажного здания произведём анализ осадок фундаментной плиты и горизонтальных перемещений (крена здания).

Деформации в основании равномерные и составляют 0.13-0.14 м. Эти значения меньше предельно допустимой величины, равной  $S_u = 0.2\text{ м}$  [8] для жесткой конструктивной схемы здания.

Найденные горизонтальные перемещения надземных конструкций относительно оси  $x$  меньше, чем относительно оси  $y$ . В нижней части здания (первые 7 этажей) перемещения незначительны. На последних этажах перемещения по оси  $x$  достигают величины 0,01м, по оси  $y$  – 0,03м, что не превышает допустимых [8] значений. Крен здания высотой 74 м составляет  $i = 0.0004$  и не превышает предельно допустимых значений по крену  $i_u = 0.004$  [8]

Изолинии вертикальных напряжений основания от веса фундамента и наземных конструкций приведены на рис.3. Эти значения под фундаментной плитой составляют около 300 кПа, что меньше расчетного сопротивления  $R = 409$  кПа.

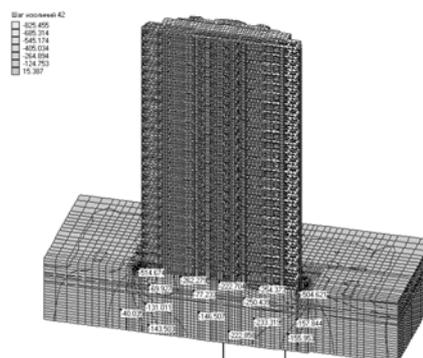


Рис. 3. Изолинии вертикальных напряжений от внешней нагрузки



## Основные выводы

Исследования НДС оснований зданий повышенной этажности в инженерно-геологических условиях г. Хабаровска показали следующее:

1. Здания получают равномерные и неравномерные осадки, значения которых не превышают предельно допустимых значений. Неравномерность осадок вызвана различной мощностью насыпных грунтов. Устройство плитного фундамента позволяет за счет своей жесткости снизить эту неравномерность.

2. Горизонтальные перемещения при совместных пространственных расчетах системы «основание - плитный фундамент – наземные конструкции зданий повышенной этажности» имеют следующий характер: в нижней части большинства зданий (первые 5-7 этажей) перемещения незначительны; на последних этажах перемещения по оси  $x$  достигают величины 0,043 м, по оси  $y$  – 0,045 м. Найденный крен зданий (равный  $i = 0,001$ ), не превышает предельно допустимых значений  $i_0 = 0,004$  м [8].

3. Характер работы плитных фундаментов исследуемых зданий в целом приближается к жесткому штампу. Под краями наблюдается локальное развитие зон пластических деформаций, не превышающих 0,25 от ширины подошвы фундамента.

4. Изгибающие моменты, возникающие в фундаментной плите, имеют знакопеременные значения, максимальные величины изгибающего момента  $M_x$  составляют: от минус 585 до плюс 352 кПа, изгибающего момента  $M_y$  от минус 687 до плюс 543 кПа, а изгибающего момента  $M_{xy}$  от минус 586 до плюс 627 кПа. Это указывает на необходимость выполнения армирования фундаментной плиты в двух уровнях (верхнем и нижнем).

5. Инженерные и совместные расчеты методом численного моделирования показывают, что при устройстве фундаментной плиты деформации зданий повышенной этажности находятся в пределах допустимых нормативных значений согласно СП 22.13330.2011 [8], что показывает возможность применения данного типа подземных конструкций при проектировании и строительстве в инженерно-геологических условиях г. Хабаровска.

## Библиографические ссылки

1. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М.: Изд-во «Мир», 1979.
2. Шашкин К.Г. Использование структуры универсального конечного элемента при разработке моделей в рамках программы "FEM models". // Реконструкция городов и геотехническое строительство, №2, 2000.
3. Фадеев А.Б., Бакенов Х.З., Кудрявцев С.А. Решение задач механики грунтов, оснований и фундаментов методом конечных элементов с использованием ЕС ЭВМ. Методические указания к курсовому и дипломному проектированию. ХаБИИЖТ. Хабаровск, 1989. 64 с.



4. Варнавский В.Г., Даммер А.Э., Тюрин И.М., Поздняков И.И., Подгорная Т.И. Геологическое строение и инженерно-геологические условия г.Хабаровска и его окрестностей., Хабаровск, 1991, 138 с.

5 Кудрявцев С.А., Кажарский А.В., Шишкина К.М. Исследование напряженно-деформированного состояния основания и фундамента жилого здания на слабых промерзающих грунтах. Научно-технические проблемы транспорта, промышленности и образования, 22-24 апреля 2008 г./ под общ. ред. В.С. Шварцфельда. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2008

6 Кудрявцев С.А., Шишкина К.М., Кажарский А.В. Исследование напряжён-деформированного состояния основания и фундамента высотного здания в г.Хабаровске. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2009.

7. Кудрявцев С.А., Бахарев В.И., Шишкина К.М., Кажарский А.В. Исследование изменения прочностных свойств грунтов от влажности в стабилометре при оттаивании. Хабаровск, Изд-во ДВГУПС, 2010.

8. СП 22.13330. 2010. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция, Москва: ФГУП ЦПП, 2011. 165 с.