



**БОЛОТБЕК Т., ТЕМИРКАНОВА Ж.Т., НУРЛАН УУЛУ А., ТОЙЧУ КЫЗЫ Ж.,
ASKAROVA A.**

¹КГУСТА им. Н. Исанова, Бишкек, Кыргызская Республика

**BOLOTBEK T., TEMIRKANOVA J.T., NURLAN UULU A., TOYCHU KYZY J.,
ASKAROVA A.**

¹KSUCTA n. a. N. Isanov Bishkek, Kyrgyz Republic
(temir.b.amir@gmail.com)

**АППРОКСИМАЦИЯ МЕТОДА СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ К
ПРАКТИКЕ ПРИМЕНЕНИЯ СПЛОШНЫХ ФУНДАМЕНТОВ НА УПРУГОМ
ОСНОВАНИИ**

**APPROXIMATION OF THE METHOD OF FOCUSED DEFORMATIONS TO THE
PRACTICE OF APPLICATION OF SOLID FOUNDATIONS ON AN ELASTIC BASIS**

Макалада туташ пайдубал такталарын колдонуу жана серпилгич негиздеги туташ пайдубалды долборлоону ишке ашырууда топтолгон деформацияларды жакындаштыруу методун теориялык жактан негиздөө каралат.

Өзөк сөздөр: туташ фундамент, топтолгон деформациялар ыкмасы, серпилгич негиз, дифференциалдык теңдеме, устун, серпилгич негиздеги устун.

В статье рассматриваются вопросы применения сплошных фундаментных плит в основании и теоретическое обоснование аппроксимации метода сосредоточенных деформаций в реализации проектирования сплошных фундаментов на упругом основании.

Ключевые слова: сплошной фундамент, метод сосредоточенных деформаций, упругое основание, дифференциальное уравнение, балка, балка на упругом основании.

The article discusses the application of solid foundation slabs in the base and the theoretical justification for the approximation of the method of concentrated deformations in the design of solid foundations on an elastic foundation.

Key words: solid foundation, method of concentrated deformations, elastic foundation, differential equation, beam, beam on elastic foundation.

Развитие высотного строительства предполагает, что использование классических столбчатых и ленточных фундаментов нецелесообразно в зданиях с высотой более 100 м. Мировая практика показывает, что в конструкциях с ядрами жесткости используются фундаментные плиты сплошного сечения. Это также позволяет добиться устойчивости здания при неравномерном развитии деформаций грунтов основании под массивными зданиями. В этой связи, актуализация балок на упругом основании, как теоретического обоснования аппроксимации метода сосредоточенных деформаций, очевидна.

Дифференциальное уравнение изгиба балки на сплошном упругом винклеровом основании с учетом того, что на балку действует не только распределенная внешняя нагрузка q_z , но и распределённые силы реакции сплошного упругого основания, записывается в виде [1]

$$\square\square \square^{\circ} \# \square \square \dot{\square} \square \square \quad (1)$$



Из предложенных в работах В.З.Власова, Н.Н. Леонтьева, П.Л.Пастеренко, М.М. Филоненко-Бородича следует, что реакция упругого основания определяются двумя коэффициентами постели

$$k_1, k_2 \quad (2)$$

При этом дифференциальное уравнение изгиба балки на сплошном упругом основании записывается в виде

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} + k_1 w = q(x) \quad (3)$$

Физический смысл модели, приводящий к уравнению (3), может быть различен. В работе [1] уравнение (3) получено, исходя из представления об упругом сопротивлении основания поворотом оси балки; реакция основания предполагаются в виде поперечной нагрузки $k_1 w$ и распределенных моментов $k_2 w'$. В работе [3] учитывается деформация сдвига основания. Основание создает вертикальные реакции $k_1 w$ и поперечные силы $k_2 w'$, которые дают

$$k_1 w + k_2 w' = \dots$$

Тогда полная реакция основания будет $k_1 w + k_2 w'$, откуда уравнению

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} + k_1 w + k_2 w' = q(x) \quad (4)$$

В трудах [4] основанию придаются свойства натянутой нити, создающей реакцию, пропорциональную кривизне оси балки, где $k_1 = \dots, k_2 = \dots$.

Существенное отличие основания с двумя коэффициентами постели от винклерового основания заключается в том, что основание с двумя коэффициентами постели может иметь осадки за пределами лежащей на нем балки; отсутствует разрыв в функции w у конца балки, характерный для модели Винклера.

Упругое полупространство составляет суть другой модели основания, которая предлагается в работах К.Вигхарда, Н.М.Герсегова, М.И.Горбунова-Посадова, Б.Н.Жемочкина, В.И.Кузнецова, И.А.Симвулиди, Г.Э.Проктора, В.А.Флорина и др. Согласно этой модели между реактивным давлением и перемещением поверхности основания имеет место зависимости

$$p = \int \int \dots \quad (5)$$

где p - функция, представляющая собой перемещение основания в точке (x, ξ, η) вызванные единичной силой, приложенной в точке (x, ξ, η) . Для упругого однородного изотропного полупространства функция p определяется из решения Буссинеска (Тимошенко, Гудьер, 1975)

$$p = \frac{1-\nu}{4\pi G} \frac{1}{r^3} \quad (6)$$

В условиях плоской деформации вместо (5) применяется решение Фламана

$$p = \dots \quad (7)$$



где $r = |z|$, C произвольная постоянная; поскольку мы условились измерять ϕ^* ..., то $r = \pm d...$

Совместное рассмотрение дифференциального уравнения изгиба балки (1) и интегрального уравнения (5) позволяет решить задачу о расчете конструкции на сжимаемом основании на основе гипотезы упругого полупространства.

Из решений дифференциального уравнения (1) изгиба призматической балки, опирающейся по всей своей длине на сплошное упругое основание на основе метода разделения переменных получены аналитические решения балки конечной длины с различными граничными условиями. Ниже приведем результаты аналитических решений для нескольких примеров расчета балки на винклеровом основании. Прогиб и изгибающий момент посередине равномерно нагруженной балки с шарнирными концами определяются формулами:

$$\phi = \frac{1}{2} \phi_0 \left[1 - \frac{\cos(\alpha x) \cos(\alpha l)}{\cos(\alpha l)} \right], \quad M = \frac{q_0}{2} \left[\frac{\sin(\alpha x) \cos(\alpha l)}{\alpha \cos(\alpha l)} - \frac{\sin(\alpha l) \cos(\alpha x)}{\alpha} \right] \quad (8)$$

Прогиб и изгибающий момент посередине балки с шарнирными концами при действии сосредоточенной нагрузки в центре определяются как:

$$\phi = \frac{q_0 l^3}{48 E I} \left[1 - \frac{\cos(\alpha l)}{\cos(\alpha l)} \right], \quad M = \frac{q_0 l^2}{8 E I} \left[\frac{\sin(\alpha l)}{\alpha \cos(\alpha l)} - \frac{\sin(\alpha l)}{\alpha} \right] \quad (9)$$

Уравнение изогнутой оси балки со сводными концами на упругом основании с грузом на конце имеет вид

$$EI \phi'''' + k \phi = -q_0 \delta(x-l), \quad \phi(0) = \phi(l) = 0, \quad \phi'(0) = \phi'(l) = 0 \quad (10)$$

Прогибы на концах и изгибающий момент посередине балки, изгибаемой двумя равными и противоположенным парами сил P

$$\phi = \frac{2 P l^3}{48 E I} \left[1 - \frac{\cos(\alpha l)}{\cos(\alpha l)} \right], \quad M = \frac{2 P l^2}{8 E I} \left[\frac{\sin(\alpha l)}{\alpha \cos(\alpha l)} - \frac{\sin(\alpha l)}{\alpha} \right] \quad (11)$$



При одновременном действии сосредоточенной и распределенной нагрузки, методы решения задачи (11) становятся громоздкими (Горбунов-Посадов, Маликова, 1973). Поэтому в работе (Пузыревского Н.П., 1923) был предложен метод начальных параметров, в котором вместо неизвестных постоянных A, B, C, D входят новые четыре постоянные, из которых каждое равно или кратно значениям прогиба, угла наклона и поперечной силы на одном из концов балки.

Дифференциальное уравнение поперечных колебаний балок на упругом основании, без учета массы основания, представляется в виде

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} + q = \rho A \frac{d^2 w}{dt^2} \quad (12)$$

где ρA - распределенная масса балки, $\rho A \ddot{w}$ - заданная распределенная динамическая нагрузка. Исследование свободных колебаний балки пролетом l и со свободно опертыми концами на основе (12) приводит к следующим решениям для формы и частоты собственных колебаний (Тимошенко С.П., 1959):

$$w_i = \frac{q}{EI} \frac{1 - \cos \alpha x}{\alpha^4}, \quad \alpha = \frac{\pi i}{l} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}, \quad i=1,2,3$$

где $a^2 = EI/\rho A$, $\alpha = kl^4/\pi^4 EI_y$, $q = \rho A g$.

Здесь через q обозначен вес балки на единицу длины, EI_y - жесткость балки при изгибе в вертикальной плоскости. При действии сосредоточенной вибрационной нагрузки $P = P_0 \sin \theta t$, приложенной на расстоянии c от левой опоры. В работе (Тимошенко С.П., 1959) получено решение для изгиба балки на упругом основании:

$$w(x,t) = \frac{P_0}{EI} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\sin \alpha_i x \sin \alpha_i c}{\alpha_i^4} \sin \alpha_i t \quad (13)$$

Из (13) следует, что при $\theta = \frac{\pi i}{l} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$ имеет место явление резонанса от действия нагрузки, когда расстояние точки приложения силы опоры в момент t будет равняться vt , то прогиб балки выражается формулой (Тимошенко С.П., 1959)

$$w(x,t) = \frac{P_0}{EI} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\sin \alpha_i x \sin \alpha_i c}{\alpha_i^4} \sin \alpha_i t \quad (14)$$



Полученные аналитические решения будут использованы для сравнения с результатами численного решения по Методу сосредоточенных деформаций статических и динамических задач балок на упругом основании [1].

Таким образом, полученные результаты подтверждают влияние ребер жесткости на изгиб сплошных плит на упругом основании с отрицательными значениями [2].

Для экспериментального подтверждения результатов исследования была разработана информационная модель высотного здания на основе BIM (см.рис.1 -7).

Технические характеристики информационной модели здания:

1. Высота здания – 146,5 м
2. Этажность – 40 уровней
3. Площадь здания – 43 728 м²
4. Площадь этажа – 4041 м²
5. Подземные уровни – 3 уровня
6. Парковка – 2 уровня ниже 0,00
7. Инженерный уровень – 1 уровень на отметке -10500 мм
8. Технический этаж – на уровне 140 м, место локализации 24 инерционных демпферов
9. Кровельный этаж – на уровне 143,5 м
10. Высота этажа на всех уровнях – 3,5 м
11. Конструктивная схема – каркасно-ствольная с центральным железобетонным ядром жесткости
12. Ядро жесткости – прямоугольник, внутренним размером 6000 мм, толщиной 500 мм
13. Опорные части по периметру – железобетонные колонны квадратного сечения размером 500x500 мм
14. Ригели на отметке выше 0,00 – прокатные стальные балки двутаврового сечения
15. Перекрытия на отметке выше 0,00 – стальной ребристый настил толщиной 50 мм и слой легкого бетона 160 мм
16. Ригели на отметке ниже 0,00 – ж/б балки прямоугольного сечения 500x500 мм
17. Перекрытия на отметке ниже 0,00 – ж/б перекрытие из промышленного железобетона толщиной 362 мм
18. Фундаменты – совмещенные – ленточный фундамент 600x300x1500 мм и ниже сплошная ж/б плита толщиной 1500 мм; от отметки 3-го этажа до отметки 1-го этажа – подпорная стена толщиной 500 мм; ниже уровня плиты свайное поле числом 36 групп по 9 свай в группе, длина свай 11100 мм, размер свай 300x300 мм
19. Кровля – балка фермовая стальная 505 мм
20. Стены наружные – стеклянные витражные панели
21. Стены внутренние – гипсокартонные листы на стальном каркасе
22. Окна – нет
23. Двери входные – автоматические дверные стеклянные панели, 3 экземпляра
24. Двери внутренние – 2 группы из двойных и одинарных деревянных панелей
25. Лестницы – П-образные 2523x2350 мм
26. Лифты – пассажирских 4 лифта локализованных в ядре жесткости
27. Отопление – автономное
28. Вентиляция – внутренняя организованная система
29. Слив атмосферной воды – внутренняя организованная система

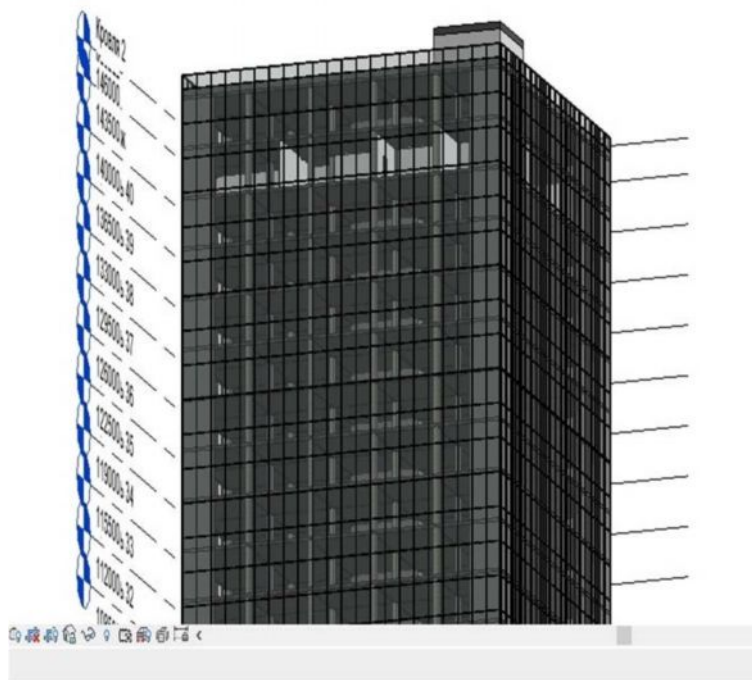


Рис. 1. Информационная модель здания, вид верхней части

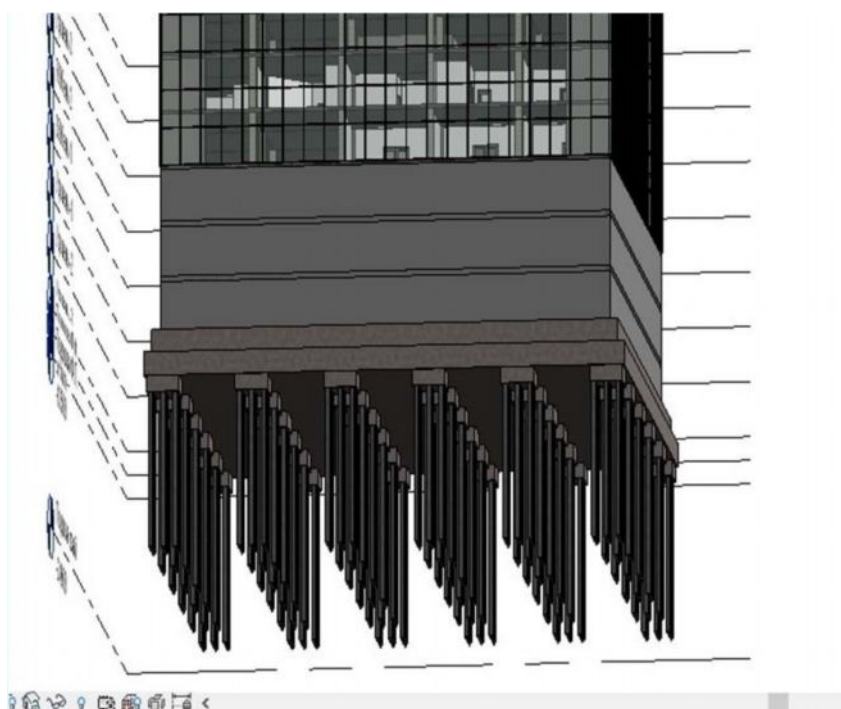


Рис. 2. Информационная модель здания, вид нижней части

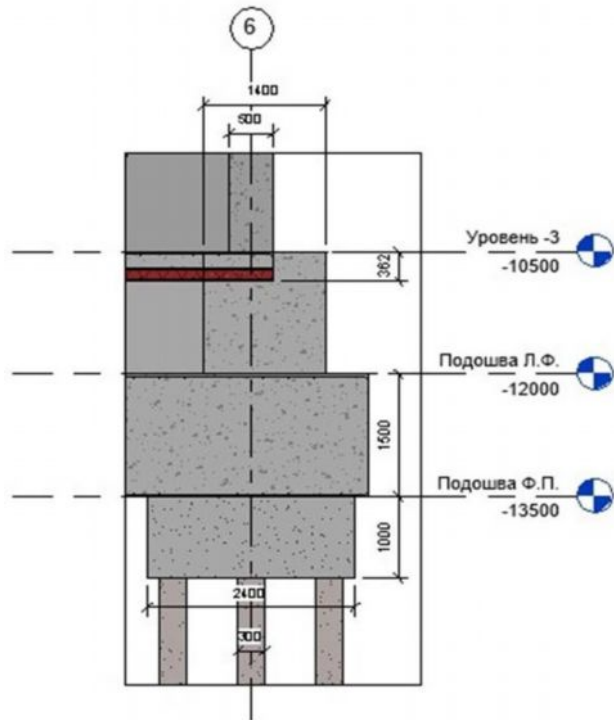


Рис. 3. Конструктивный узел фундаментной части

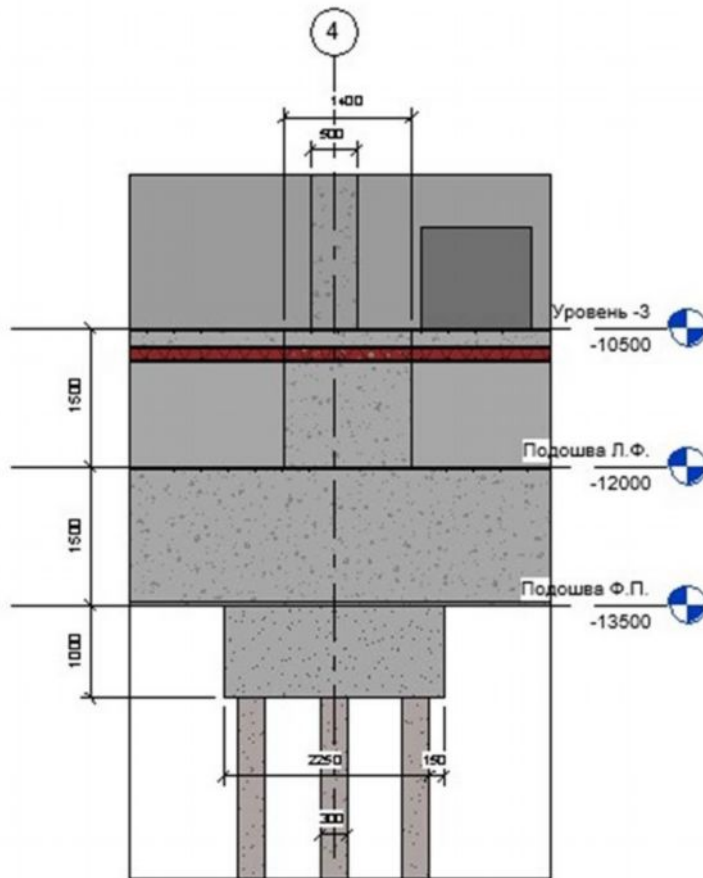


Рис. 4. Конструктивный узел фундаментной части

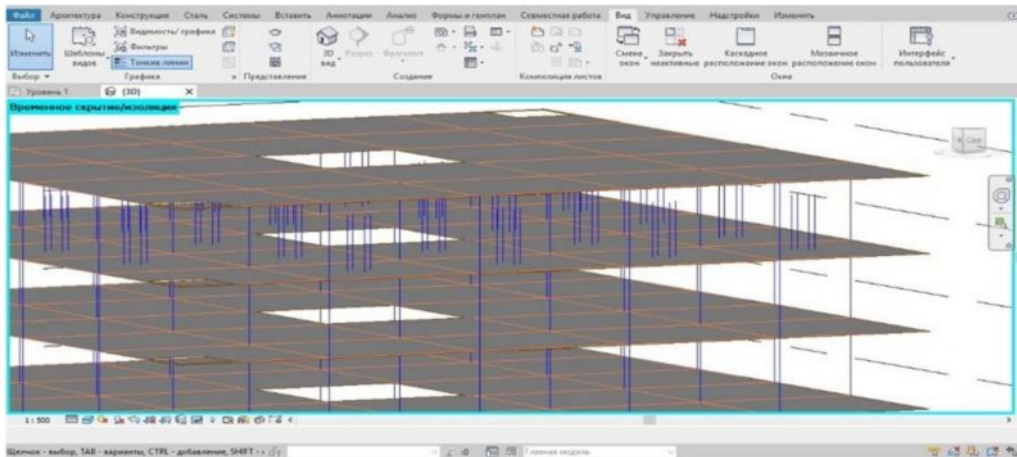


Рис. 5. Аналитическая модель здания

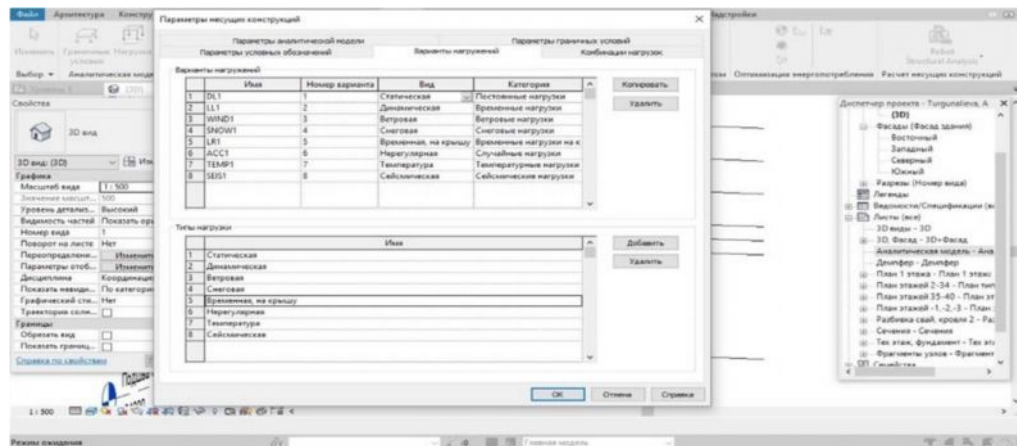


Рис. 6. Расчетное сочетание усилий

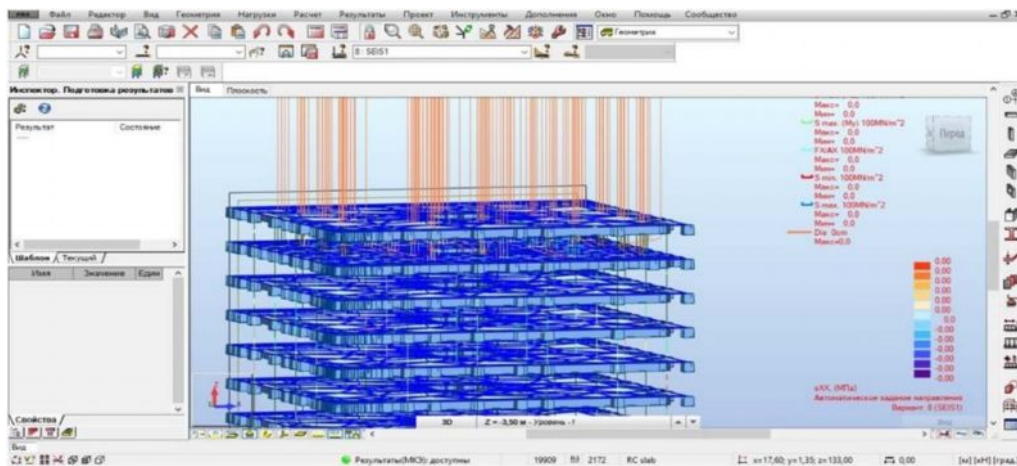


Рис. 7. Конечно-элементная модель здания

Выводы. По результатам исследования получены следующие научно обоснованные выводы: структурный анализ информационной модели здания (выполненной в Autodesk Revit) в среде программного обеспечения Autodesk Robot Structural Analysis показал, что практическое применение сплошных фундаментных плит позволит снизить неравномерные деформации грунтов основания под высотными зданиями с ядрами жесткости в диапазоне от



25 до 35% в сравнении с применением, соответственно, ленточных и столбчатых фундаментов.

Список литературы

1. Низомов Д.Н. Метод сосредоточенных деформаций [Текст] / Д.Н. Низомов, И. Каландарбеков. – Душанбе: Изд-во “Дониш”, 2015. – 436 с.
2. Болотбек Т., Насырынбекова К.У. Теоретическое обоснование практики применения сплошной фундаментной плиты на подземных уровнях зданий [Текст] / Т. Болотбек, К.У. Насырынбекова // Вестник КГУСТА. – Бишкек: 2019. – №1 (63). – С. 132- 136.
3. Власов В.З. Балки, плиты и оболочки на упругом основании [Текст] / В.З. Власов, Н.Н. Леонтьев. - М.: ГИ Физ. Мат. Науки, 1960. – 490 с.
4. Курс сопротивления материалов [Текст] / М.М. Филоненко-Бородич, С.М. Изюмов, Б.А. Олисов и др. // под общ. ред. М.М. Филоненко-Бородича. 4-е изд., перераб. - М.: Гостехиздат, 1956.
5. Болотбек Т. Теоретическое обоснование практики применения сплошной фундаментной плиты на подземных уровнях зданий [Текст] / Т. Болотбек, К.У. Насырынбекова, Токтогул уулу Ж., А.Б. Болотбеков // Вестник КГУСТА. – Бишкек: 2019. - №1(63). - с. 132-137.