

УДК 624.151.5

РАСЧЕТ И СРАВНЕНИЕ ОСАДОК ФУНДАМЕНТНОЙ ПЛИТЫ ПО РАЗНЫМ МОДЕЛЯМ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ В СОВРЕМЕННОМ ПРОГРАММНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ

С.Л. Субботин, А.Д. Крылов

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Субботин С.Л., Крылов А.Д., 2026

Аннотация. В статье рассмотрен расчет и приведены результаты сравнения осадок фундаментной плиты 12-этажного монолитного жилого дома с помещениями общественного назначения по разным моделям грунтового основания.

Ключевые слова: грунтовое основание, осадка, модель Винклера, модель Пастернака, метод послойного суммирования.

DOI: 10.46573/2658-7459-2026-1-26-35

РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПОСТЕЛИ В ПРОГРАММЕ-САТЕЛЛИТЕ

В программно-вычислительном комплексе (ПВК) и программах-сателлитах реализована возможность расчета с одним и двумя коэффициентами постели. Существует несколько способов расчета коэффициентов постели C_1 и C_2 [1–12].

Фундамент под зданием выполнен монолитной фундаментной плитой толщиной 800 мм из бетона класса В25 (рис. 1) на естественном основании (рис. 2) с устройством подбетонки класса В7,5 толщиной 100 мм, превышающей габариты подошвы на 250 мм в каждую сторону. Естественное сложение грунтов основания под фундаментной плитой отображено на рис. 3.

Коэффициент постели задается в первом приближении $C_1 = 500 \text{ т/м}^3$, расчет включает несколько итераций. При этом ограничивается перемещение фундаментной плиты здания по направлениям X и Y . Линейный расчет выполняется методом PARFES.

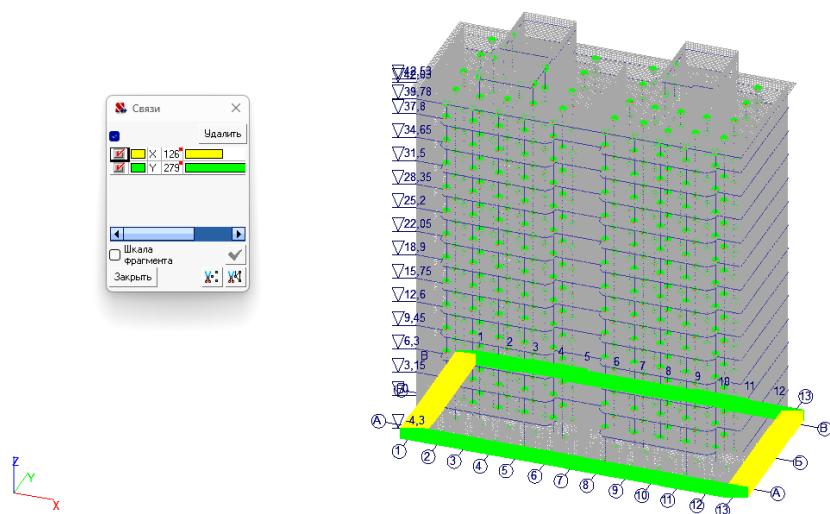


Рис. 1. Связи фундаментной плиты

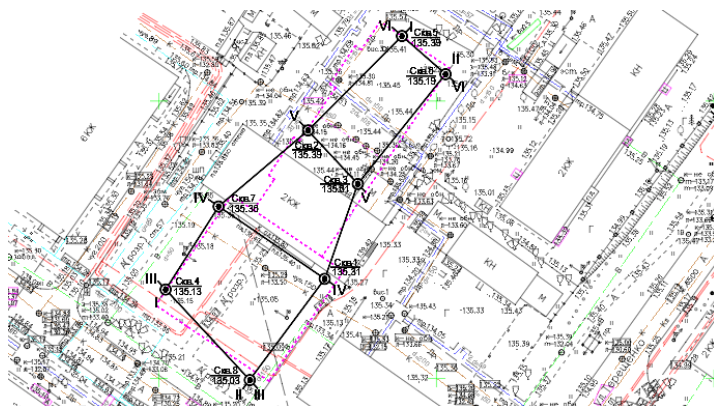


Рис. 2. Расположение скважин, секции № 1 и 2

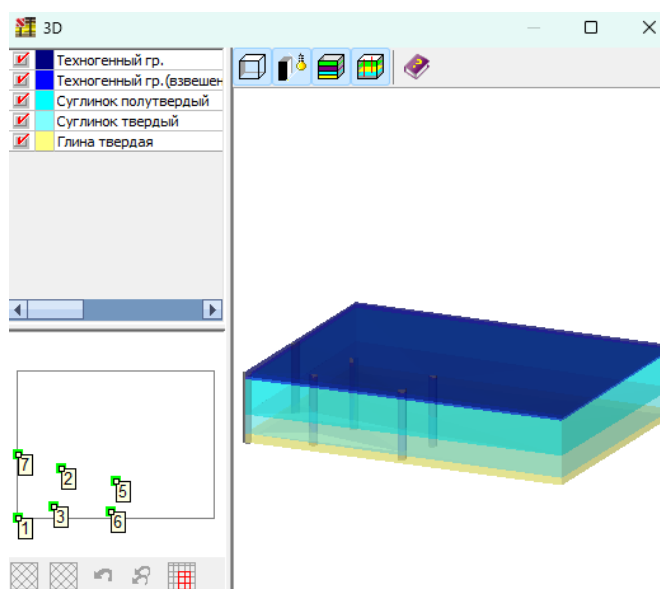


Рис. 3. Разрез 3D-слоев грунта

Согласно пункту 5.6.41 СП 22.13330.2016 нижнюю границу сжимаемой толщи основания принимают на глубине $z = H_c$, где выполняется условие

$$\sigma_{zp} = 0,5\sigma_{zg}.$$

При этом глубина сжимаемой толщи должна быть не менее $H_{\min}$, равной $(4 + 0,1b)$ при $10 < b \leq 60$ м, т. е.

$$\begin{aligned} E &\geq 7 \text{ МПа } \sigma_{zp} = 0,5\sigma_{zg}; \\ E &\leq 7 \text{ МПа } \sigma_{zp} = 0,2\sigma_{zg}. \end{aligned}$$

Так как в рассматриваемом случае модуль деформации грунта больше 7 МПа, то выбираем напряжение от внешней нагрузки с половиной напряжения от собственного веса грунта: $\sigma_{zp} = 0,5\sigma_{zg}$.

Значение высоты сжимаемой толщи определяется отношением $\sigma_{zp} / \sigma_{zg}$ в разделе настроек «Расчет». По умолчанию $\sigma_{zp} / \sigma_{zg}$ равно 0,2.

После нескольких итераций получается итоговый результат. Стабилизация величин C_1 наступает к 3-й итерации. Осадка фундаментной плиты представлена на рис. 4.

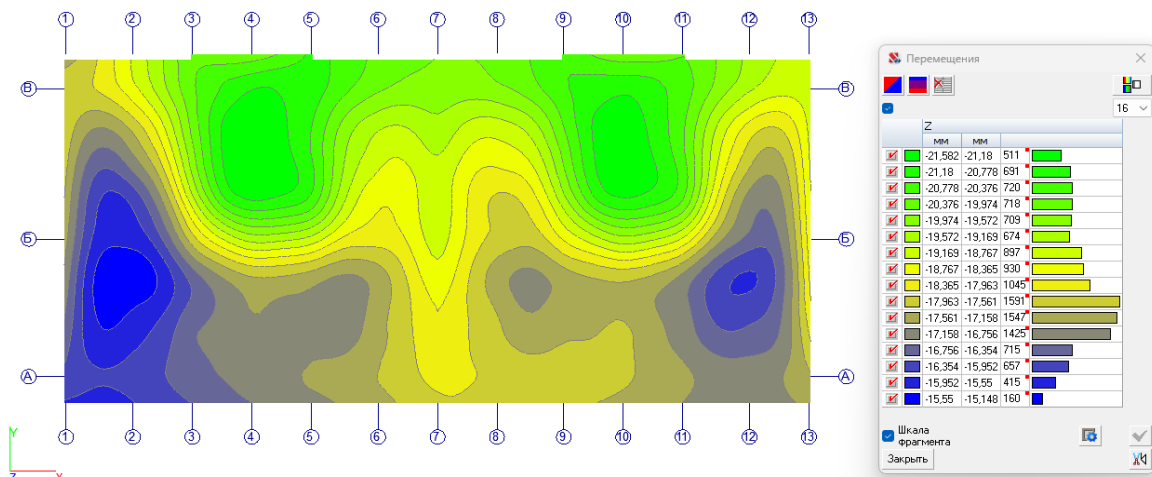


Рис. 4. Осадка фундаментной плиты из ПВК, 3-я итерация

ПЕРЕСЧЕТ В ПРОГРАММЕ ДЛЯ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТОВ ПОСТЕЛИ ПОСЛЕ ЗАНИЖЕНИЯ ЖЕСТКОСТИ ИЗ-ЗА ПОЯВЛЕНИЯ ТРЕЩИН В ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

При наличии трещин вводится понижающий коэффициент 0,2 для модуля упругости бетона. После этого производится перерасчет всей схемы, так как все усилия будут перераспределены. Если после изменения жесткостей плиты трещины начали расползаться или локализоваться, то создается группа для новых трещин и уже для них вводится понижающий коэффициент 0,2, а предыдущей группе трещин возвращается коэффициент 0,3. Перерасчет продолжается до тех пор, пока трещины не стабилизируются в расчетной схеме (рис. 5).

То же самое делается с плитами перекрытия, плитой покрытия и лестничными маршами.

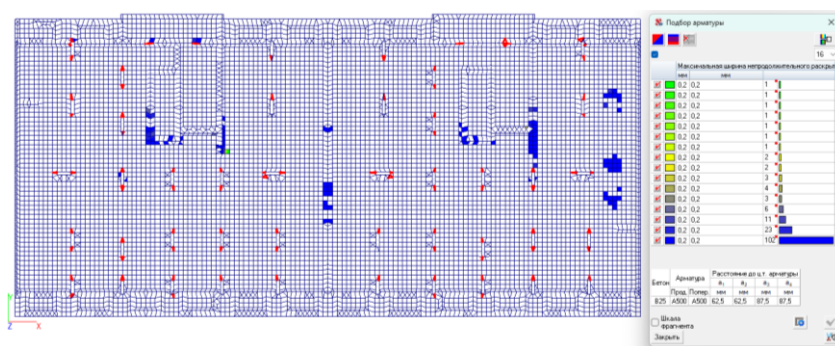


Рис. 5. Трещины фундаментной плиты на 9-й итерации

После нескольких итераций получается итоговый результат. Стабилизация величины C_1 наступает к 5-й итерации. Осадка фундаментной плиты представлена на рис. 6.

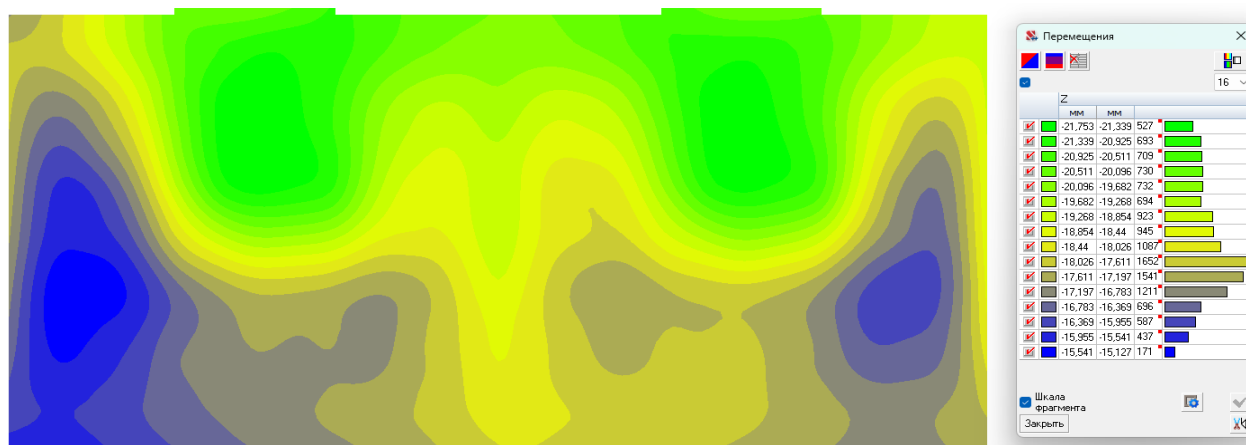


Рис. 6. Осадка фундаментной плиты из ПВК, 5-я итерация

РАСЧЕТ ПО МОДЕЛИ ПАСТЕРНАКА

Расчет коэффициентов C_1 и C_2 в программе-сателлите в составе ПВК представлен в табл. 1 [12].

Таблица 1

Определение коэффициентов постели в программе для расчета коэффициентов C_1 и C_2

Наименование грунтов	Модуль деформации, Т/м ²	Коэффициент Пуассона	Толщина слоя, м
Суглинок полутвердый	3 058,104	0,35	6,8
Суглинок твердый	4 383,282	0,35	4,34

Коэффициент сжатия C_1 – 499,401 Т/м³.

Коэффициент сдвига C_2 – 3 824,883 Т/м.

Важно отметить, что в графе «Толщина слоя» учитываются только слои грунта в пределах сжимаемой толщи [12].

Учет части основания, расположенной по внешней области Ω за внешним контуром фундаментной плиты, может выполняться с использованием «полубесконечных конечных элементов» типа «Клин» или «Полоса». Эти законтурные элементы позволяют смоделировать все окружение области фундаментной плиты, если она является выпуклой и многоугольной [12].

Многоугольность области практически всегда обеспечивается с той или иной степенью точности. Если же область Ω является невыпуклой, то она должна быть дополнена до выпуклой области конечными элементами ограниченных размеров. При этом в дополняемых частях толщина плиты принимается равной нулю (рис. 7) [12].

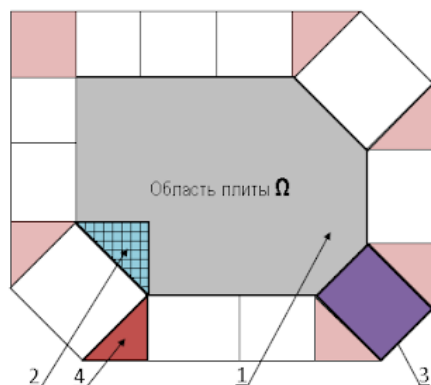


Рис. 7. Дополняемые части плиты: 1 – плита; 2 – дополнение области Ω до выпуклой; 3 – элемент «Полоса»; 4 – элемент «Клин»

Так как форма фундаментной плиты рассчитываемого здания является невыпуклой, то ее необходимо достроить до выпуклой для обеспечения возможности выполнения расчета по этой модели (рис. 8, 9).

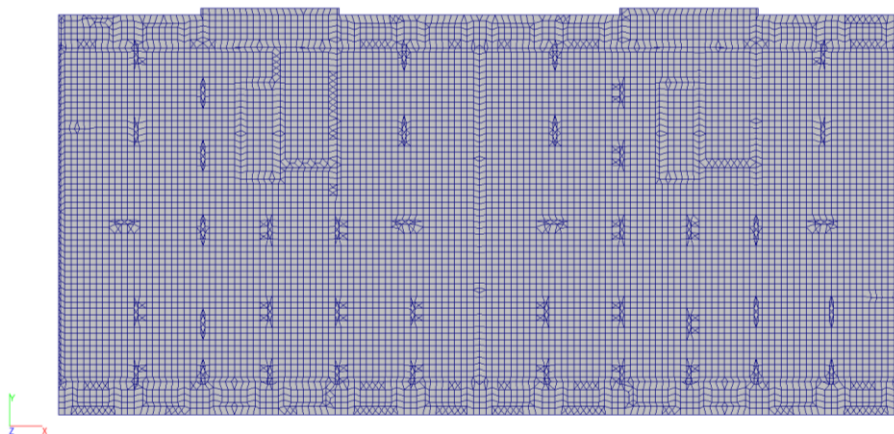


Рис. 8. Первоначальная форма плиты

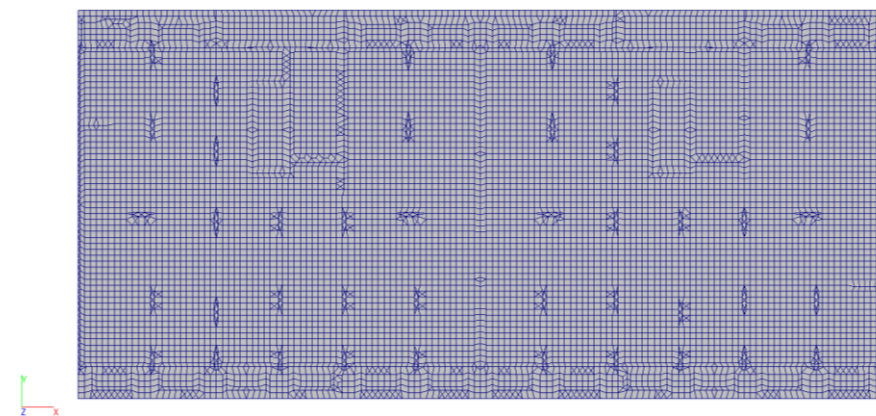


Рис. 9. Конечная форма плиты

Затем производится статический расчет схемы и в графическом анализе рассматриваются перемещения плиты по оси Z от нормативно-длительной комбинации нагрузжений (рис. 10).

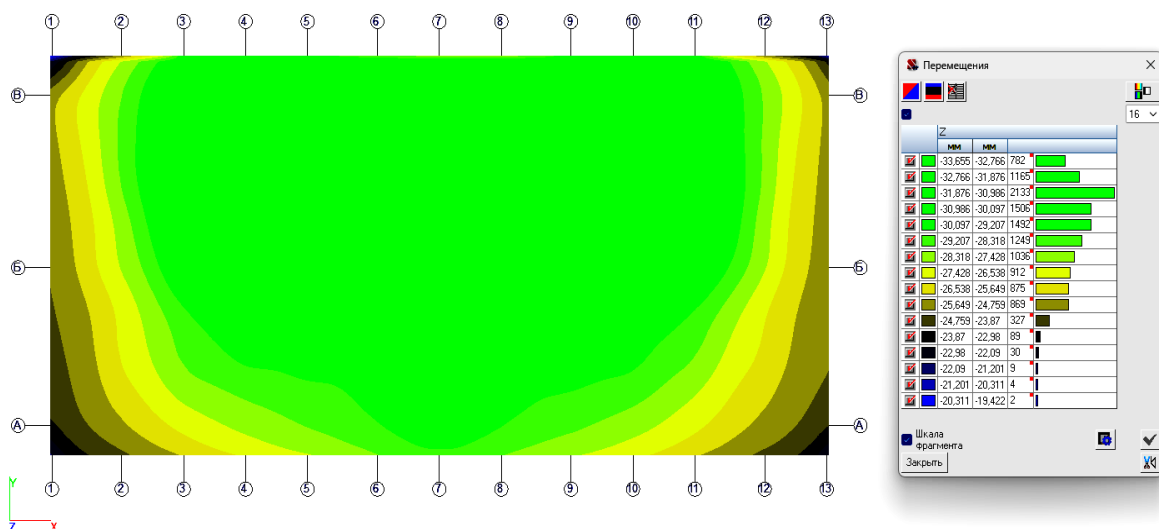


Рис. 10. Осадка фундаментной плиты по модели Пастернака

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАБИЛИЗИРОВАННОЙ ОСАДКИ ОСНОВАНИЯ ФУНДАМЕНТА ПО МЕТОДУ ПОСЛОЙНОГО СУММИРОВАНИЯ

Фундамент с размерами $b \times l = 19,08 \times 40,2$ м и глубиной заложения $d = 3,9$ м передает на основание вертикальную нагрузку $N = 16\,100,465$, $T = 157,89$ МН. Значение модулей деформации грунтов составляет: $E_{02} = 30$ МПа, $E_{03} = 43$ МПа, $E_{04} = 26$ МПа.

Характеристики грунтов и мощности слоев представлены в табл. 2.

Таблица 2

Список грунтов

Наименование	Удельный вес, T/m^3	Модуль деформации, T/m^2	Модуль упругости, T/m^2	Коэффициент Пуассона	Коэффициент переплотнения	Давление переплотнения, T/m^2	Мощность слоя h , м
Техногенный грунт	1,8	1 019,368	8 494,733	0,3	1	0	1,4
Техногенный грунт (взвешенный)	0,48	1 019,368	8 494,733	0,3	1	0	1
Суглинок полутвердый	2,21	3 058,104	25 484,2	0,35	1	5	8,3
Суглинок твердый	2,27	4 383,282	36 527,353	0,35	1	5	6,2
Глина твердая	2,09	2 650,357	22 086,307	0,2	1	5	5,1

Осадка методом послойного суммирования вычисляется по формуле

$$s = \beta \sum_{i=1}^n \frac{(\sigma_{zp,i} - \sigma_{zy,i}) \cdot h_i}{E_i} + \beta \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{zy,i} \cdot h_i}{E_{e,i}},$$

где β – безразмерный коэффициент, принимаемый равным 0,8; n – число слоев грунта в пределах сжимаемой толщи; h_i – толщина i -го слоя; $h_i < 0,4b$; $\sigma_{zp,i}$ – среднее значение вертикального напряжения от внешней нагрузки в i -м слое грунта; $\sigma_{zy,i}$ – среднее значение вертикального напряжения в i -м слое от собственного веса грунта, выбранного при отрывке котлована; E_i – модуль деформации грунта i -го слоя; $E_{e,i} = 5E_i$.

Давление подошвы фундамента на основание

$$p = \frac{N}{l \cdot b} = \frac{157\,890}{40,2 \times 19,08} = 205,85 \text{ кПа},$$

$$s = \beta \sum_{i=1}^n \frac{(\sigma_{zp,i} - \sigma_{zy,i}) \cdot h_i}{E_i} + \beta \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{zy,i} \cdot h_i}{E_{e,i}}.$$

Для расчета осадки определяем вертикальные напряжения от собственного веса грунта, от внешней нагрузки и от собственного веса грунта, выбранного при отрывке котлована грунта по оси фундамента по формулам:

$$\sigma_{zg} = \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i;$$

$$\sigma_{zp} = \alpha \cdot p;$$

$$\sigma_{zy} = \alpha_k \cdot \sigma_{zg,0}.$$

В точке 2 выполняется условие

$$\sigma_{zp} = 138,74 \text{ кПа} \leq 0,5\sigma_{zg} = 182,085 \text{ кПа}.$$

Осадка по методу послойного суммирования

$$s = 0,8 \left(\frac{(194,94 - 69,86) \cdot 6,8}{30\,000} + \frac{(161,385 - 59,365) \cdot 6,2}{43\,000} \right) = 0,0344 \text{ м} = 3,4 \text{ см}.$$

Строятся эпюры вертикальных напряжений от собственного веса грунта σ_{zg} , внешней нагрузки σ_{zp} , собственного веса грунта σ_{zy} , выбранного при отрывке котлована, и $m \cdot \sigma_{zg}$.

Находят точку пересечения графиков $0,5\sigma_{zg}$ и σ_{zp} . Спроецировав данную точку на ось глубины, получим глубину сжимаемой толщи $H_c = 11,14$ м. Эта величина показывает, что при увеличении глубины напряжение от внешней нагрузки становится меньше напряжения от собственного веса грунта. Следовательно, напряжения, которые находятся ниже отметки

$$s = 0,8 \left(\frac{(194,94 - 69,86) \cdot 6,8}{30\,000} + \frac{(172,5 - 61,53) \cdot 4,34}{43\,000} \right) = 0,0316 \text{ м} = 3,16 \text{ см},$$

не учитываются при расчете осадки.

Сравнение результатов расчета осадки здания по трем моделям сведено в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчета осадки

Характеристика	Программа КРОСС	Программа Пастернак	СП.22.13330.2016
Максимальная осадка здания, см	2,548	3,366	3,16

Таким образом, программа для расчета коэффициентов постели по модели основания Винклера моделирует грунт как набор независимых пружин. Модель не учитывает непрерывность грунтового массива и распространение напряжений в стороны. Она дала заниженную осадку, так как не был учтен распор грунта.

Программа для расчета коэффициентов C_1 и C_2 – двухпараметрическая модель, которая учитывает сдвиговые взаимодействия между пружинками. Она ближе к реальному поведению грунтового массива, так как позволяет работать грунту как цельному массиву, поэтому осадка максимальная.

Метод послойного суммирования, реализованный в СП 22.13330.2016, рассматривает грунт как линейно-деформируемое полупространство, учитывает распространение напряжений в глубину и в стороны.

Основной расчетной моделью для определения усилий в плите и подборе армирования в ПВК следует считать модель Пастернака. Ее результаты подтверждаются расчетом осадки методом послойного суммирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Модели грунтов, реализованные в программных комплексах SCAD Office и Plaxis 3D / Е.С. Егорова [и др.] // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2016. № 3 (42). С. 31–60.
2. SCAD Office. Вычислительный комплекс SCAD: учебное пособие / В.С. Карпиловский [и др.]. М.: СКАД СОФТ, 2009. 648 с.

3. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*. URL: <https://agentstvotek.ru/upload/files/СП%2022.13330.2016.pdf> (дата обращения: 09.02.2025).
4. КРОСС. Определение коэффициентов постели по результатам геологических изысканий. Руководство пользователя. Киев: SCAD Group, 2001. 41 с.
5. Алехин А.Н. Краткая характеристика моделей грунта // *Академический вестник УралНИИПроект РААСН*. 2011. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kratkaya-harakteristika-modeley-grunta> (дата обращения: 09.02.2025).
6. A Review on Soil-Foundation-Interaction Models / G. Pandey [et al.] // *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*. 2023. Т. 11. № 3. С. 158–179.
7. Горб А.М. Выбор расчетной модели основания при проектировании плит промышленных полов // *Склад и техника*. 2009. № 1-2. С. 1–2.
8. Основы и фундаменты: учебное пособие / И.Н. Кокунько [и др.]. URL: https://rgups.ru/site/assets/files/127130/osnovaniia_i_fundamenty.pdf (дата обращения: 09.02.2025).
9. Шеин А.И. Динамика и устойчивость сооружений: обеспечение сейсмостойкости зданий и сооружений: учебное пособие. Пенза: ПГУАС, 2015. 108 с.
10. Кравченко Г.М., Труфанова Е.В., Вержиковский В.В., Заритовский Д.С. Исследование напряженно-деформированного состояния фундаментной плиты выставочного павильона Технопарка РГСУ с учетом различных моделей основания // *Инженерный вестник Дона*. 2015. № 4-1. С. 30–38.
11. Лукьянов А.И., Тюфанов В.А. Выбор модели грунтового основания, реализованных в ПК SCAD office // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2021. № 1. С. 29–37.
12. Субботин С.Л., Крылов А.Д. Выбор модели грунтового основания для расчета фундаментной плиты в современном ПВК SCAD Office++ // *Теоретические исследования и экспериментальные разработки студентов и аспирантов*. 2025. № 1.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

СУББОТИН Сергей Львович – доктор технических наук, профессор кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: sbtn@yandex.ru
КРЫЛОВ Алексей Дмитриевич – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: krylovalesha791@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Субботин С.Л., Крылов А.Д. Расчет и сравнение осадок фундаментной плиты по разным моделям грунтового основания в современном программно-вычислительном комплексе // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2026. № 1 (29). С. 26–35.

**CALCULATION AND COMPARISON OF FOUNDATION SLAB SEDIMENTS
ACCORDING TO DIFFERENT MODELS OF THE SOIL BASE IN MODERN
SOFTWARE AND COMPUTING COMPLEX**

S.L. Subbotin, A.D. Krylov
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The article considers the calculation and results of comparing the sediments of the foundation slab of a 12-storey monolithic residential building with public premises according to different models of the soil foundation.

Keywords: ground base, sediment, Winkler model, Pasternak model, layer-by-layer summation method.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

SUBBOTIN Sergey Lvovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: sbtn@yandex.ru

KRYLOV Alexey Dmitrievich – Master's Degree Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: krylovalesha791@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Subbotin S.L., Krylov A.D. Calculation and comparison of foundation slab sediments according to different models of the soil base in modern PVC // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2026. No. 1 (29), pp. 26–35.

УДК 69.07

**ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА И СРОКА СЛУЖБЫ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ БАЛКИ ПОКРЫТИЯ ЗДАНИЯ КОТЕЛЬНОЙ
В УСЛОВИЯХ АГРЕССИВНОЙ СРЕДЫ**

А.А. Черняев, К.В. Марфин
Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева (г. Орел)

© Черняев А.А., Марфин К.В., 2026

Аннотация. В статье выполнены теоретические расчеты и произведен анализ изменения остаточного ресурса и срока службы железобетонной балки покрытия на примере обследуемого здания котельной, расположенной в 909-м жилом квартале г. Орла. Рассмотрена предварительно напряженная балка пролетом 12 м, предназначенная для покрытий зданий с плоской и скатной кровлей, выполненная по серии 1.462.1-1/88.