

МЕХАНИКА ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА

Научная статья

УДК 624.072

ГРНТИ: 30.19 Механика деформируемого твердого тела; 67 Строительство и архитектура

ВАК: 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела; 2.1.9. Строительная механика

doi:10.51608/26867818_2025_2_62

СРАВНЕНИЕ ОСАДОК ДВУСЛОЙНОГО ОСНОВАНИЯ ПОД ПОДОШВОЙ ЖЕСТКОГО ФУНДАМЕНТА С ИЗМЕНЯЕМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ГРУНТОВ И УЧЕТОМ КАСАТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ МЕЖДУ НИМИ

© Авторы 2025
SPIN: 4836-8701

КОЗУНОВА Оксана Васильевна

кандидат технических наук, заведующий кафедрой строительства и эксплуатации зданий и сооружений

*Белорусский национальный технический университет
(Беларусь, Минск, e-mail: kozunova@gmail.com)*

ПУСЕНКОВ Анатолий Григорьевич

главный инженер завода КПД ОАО «Гомельский ДСК», аспирант

*Белорусский государственный университет транспорта
(Беларусь, Гомель, e-mail: pusenkov_a@mail.ru)*

Аннотация. В статье представлено сравнение расчетов осадок в линейной и нелинейной постановке при изменяемых расчетных характеристиках двухслойного основания с наклонным слоем без учета касательных напряжений (продольных деформаций), а так же с их учетом. Проводится числовая апробация вариационно-разностным методом (ВРМ) и верифицируются результаты в том числе и с линейным расчетом.

Ключевые слова: упругое двухслойное основание; балочная плита; осадки основания; касательные напряжения; зона контакта; характеристики основания; строительные конструкции; строительные материалы

Для цитирования: Козунова О.В., Пусенков А.Г. Сравнение осадок двухслойного основания под подошвой жесткого фундамента с изменяемыми параметрами грунтов и учетом касательных напряжений между ними // Эксперт: теория и практика. 2025. № 2 (29). С. 62-66. doi:10.51608/26867818_2025_2_62.

Original article

COMPARISON OF SETTLEMENT OF A TWO-LAYER FOUNDATION UNDER THE BASE OF A RIGID FOUNDATION WITH VARIABLE SOIL PARAMETERS AND CONSIDERING THE TANGENTIAL STRESSES BETWEEN THEM

© The Author(s) 2025

KOZUNOVA Oksana Vasilyevna

Candidate of Technical Sciences, head Department of Construction and Operation Buildings and Structures

*Belarusian National Technical University
(Belarus, Minsk)*

PUSENKOV Anatoly Grigorievich

chief engineer KPD plant OJSC "Gomel DSK", PhD Candidate

*Belarusian State University of Transport
(Belarus, Gomel)*

Abstract. In this article, settlement calculations for a two-layer base with an inclined layer are compared in linear and nonlinear formulations with varying design characteristics, both without and with consideration for tangential stresses (longitudinal deformations). Numerical testing is carried out using the variational-difference method (VDM), and the results are verified through linear calculation as well.

Keywords: elastic two-layer base; beam slab; base settlements; shear stresses; contact zone; base characteristics; building structures; building materials

For citation: Kozunova O.V., Pusenkov A.G. Comparison of settlement of a two-layer foundation under the base of a rigid foundation with variable soil parameters and considering the tangential stresses between them // Expert: theory and practice. 2025. № 2 (29). Pp. 62-66. (In Russ.). doi:10.51608/26867818_2025_2_62.

Введение. Инженерные изыскания должны обеспечивать комплексное изучение природных и техногенных условий территорий предполагаемого, намеченного или проектируемого строительства [1].

Современные реалии архитектуры требуют строительства все более сложных, высотных и не типовых зданий и сооружений. Изучение инженерно-геологических условий площадки, с учетом их изменений при строительстве и эксплуатации проектируемого здания, установление нормативных и расчетных значений характеристик грунтов и др. является основной задачей инженерно-геологического изыскания [1]. Поэтому перед специалистами стоят задачи разработки методов решений с высокой требуемой точностью совместной деформации фундаментов и сложных оснований, но из-за их разнообразия в настоящее время нет возможности дать строгое решение пространственной задачи.

Согласно экспериментальным и теоретическим исследованиям [2] оптимальным методом решения является нелинейный расчет взаимодействия фундамента (балочной плиты) и основания, которые позволяют выполнить более достоверную оценку работы. Методика расчетного исследования базируется на положениях разработанного вариационно-разностного подхода решения контактной задачи для нелинейно-упругого неоднородного основания [3], и на статических расчетах балочной плиты на однородном упругом основании с учетом касательных напряжений [4].

Автором предлагается сравнение напряженно-деформируемого состояния балочной плиты, осадок и реактивных давлений изменяемого (двуслойного) основания с учетом продольных деформаций в зоне контакта.

Постановка задачи. Алгоритм решения задачи. На рис. 1 показан инженерно-геологический разрез проектируемого места строительства. В строительстве геологический разрез является основным проектным документом, на котором указаны все основные элементы плана и профиля, типы и расположение искусственных сооружений.

На рис. 2 представлены варианты двуслойного основания со слабым слоем сверху (а) и во втором случае снизу (б). Наклон слоев составляет 45° .

На наклонном двуслойном основании общей глубиной (толщиной) H расположена Балочная плита ленточных фундаментов с приложенной внешней нагрузкой $q(x)$. Параметры плиты следующие: высота плиты h , ширина плиты $2l$, изгибная жесткость EJ .

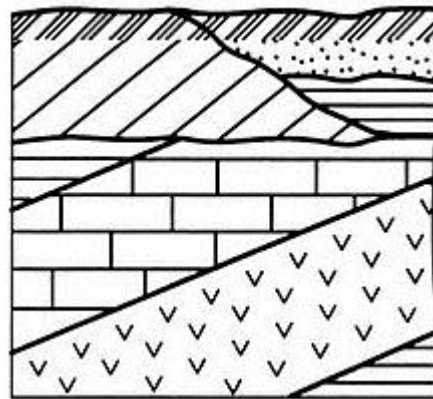


Рис. 1. Инженерно-геологический разрез

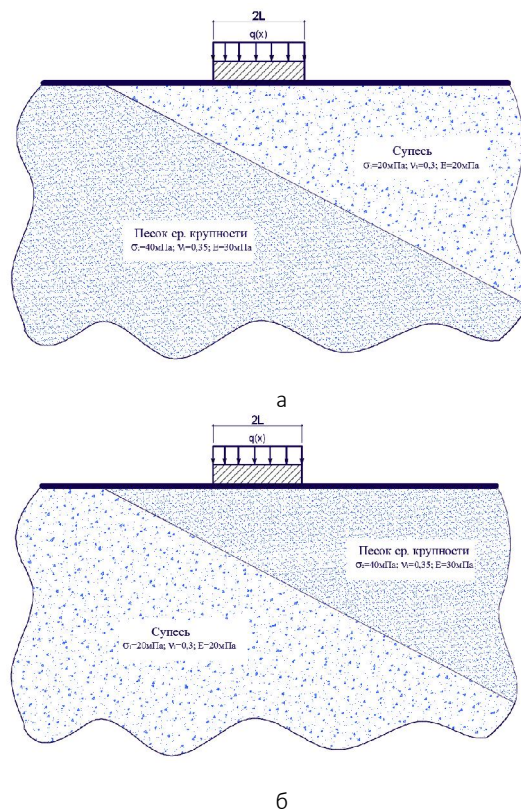


Рис. 2. Двуслойное наклонное основание

Вводим гипотезы (предположения) и допущения для расчета балочных плит на упругом основании: гипотезы теории упругости справедливы для рассматриваемой области упругого основания; допущения и гипотезы плоского изгиба балки справедливы для плиты.

Для решения рассматриваемой задачи применяется вариационно-разностный метод (ВРМ) [5], который реализуется в перемещениях через конечно-разностные соотношения теории упругости (случай плоской деформации) при использовании в



решении функционала полной потенциальной энергии деформации системы, состоящей из плиты, упругого основания и зоны контактного взаимодействия.

Основание при расчете заменяется прямоугольной расчетной областью рис 3, на границах которой перемещения равны нулю; в контактной зоне справедливо равенство осадок основания прогибам плиты.

Основание аппроксимируется разбивочной сеткой конечных размеров с постоянным шагом по осям (рис. 3).

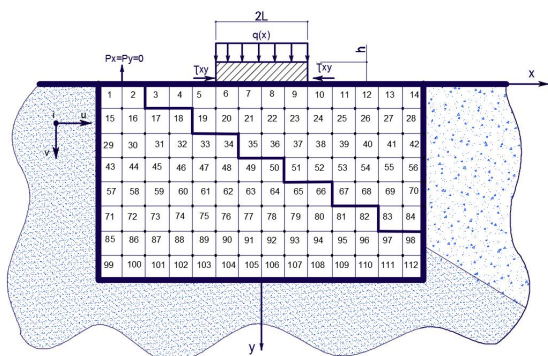


Рис. 3. Разбивочная сетка расчетной области

За неизвестные принимаем: $u_i(x,y), v_i(x,y)$ – компоненты вектора перемещения i -той узловой точки основания (на рис. 3 принято 112 точек), направленные вдоль осей X и Y соответственно; $p_y^{(i)}(x,y)$ - реактивные давления в зоне контакта балочной плиты с основанием, $\tau_{xy}^{(i)}(x,y)$ - касательные напряжения, q_x - распределенная нагрузка.

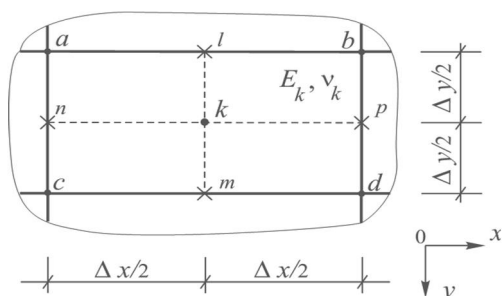


Рис. 4. Прямоугольная ячейка метода конечных разностей

Зависимость интенсивности напряжений и деформаций для двуслойного основания определяется по следующей формуле:

$$\sigma_i = \sigma_y \operatorname{th} \left(\frac{E}{\sigma_y} \varepsilon_i^{(k)} \right), \quad (1)$$

где σ_y - предел текучести основания; E - начальный модуль деформации основания; $\varepsilon_i^{(k)}$ – интенсивность деформаций в точке k упругого основания.

Вначале решается задача в линейной постановке. По вычисленным значениям перемещений i -той узловой точки $u_i(x), v_i(y)$, используя геометрические уравнения Коши и конечно-разностные соотношения, определяется *интенсивность деформаций* и *интенсивность напряжений* в центрах ячеек (см. формулы теории упругости).

Имея значения напряжений и перемещений, полученных в результате решения задачи в первом приближении, определяется *касательный модуль деформации* для каждой ячейки и задача решается во втором и последующих приближениях, с учетом изгибной жесткости балочной плиты.

$$E_i^{(n)} = \frac{E_{0k}}{\operatorname{ch}^2 \left(\frac{E_{0k}}{\sigma_{yk}} \varepsilon_i^{(n-1)} \right)} \quad (2)$$

Нелинейный расчет заканчивается, как только разница между последующим и предыдущим приближением исследуемой функции будет соответствовать установленной точности решения задачи.

$$\delta_f = \frac{f_{\max}^{(n)} - f_{\max}^{(n-1)}}{f_{\max}^{(n)}} \cdot 100\% \leq \xi, \quad (3)$$

где $f_{\max}^{(n)}, f_{\max}^{(n-1)}$ – максимальные значения итераций; n – номер итераций.

Подробная методика расчета опубликована совместно [4], соавтором является к.т.н., доцент Козунова О.В.

Решение задачи. Для решения задач составлена расчетная программа в Mathematica 10.0 и проведена ее числовая апробация для двуслойного основания с учетом изменчивости слоев и параметров [6].

1-й слой - супесь: $\sigma_{y1} = 0,2 \text{ МПа}$; $\nu = 0,3$; $E = 20 \text{ МПа}$

2-ой слой - песок ср. крупности: $\sigma_{y2} = 0,4 \text{ МПа}$; $\nu = 0,35$; $E = 40 \text{ МПа}$

Балочной плитой выступает железобетонная плита ленточного фундамента (ФЛ) с классом бетона С20/25 и типовым армированием. Задаем следующие характеристики плиты: длина - $l = 1,6 \text{ м}$, высота - $h = 0,3 \text{ м}$; модуль упругости бетона - $E_b = 2,75 \cdot 10^{10} \text{ Па}$.

На балочную плиту действует равномерно распределенная нагрузка $q(x)$, которая заменяется сосредоточенными силами $P_1 = P_3 = 100 \text{ кН}$, $P_2 = 200 \text{ кН}$.

Для итерационного процесса сходимости [7] устанавливаем критерий равный - 3%.

В компьютерной программе Mathematica 10.0 составляем алгоритм расчета и определяем горизонтальные и вертикальные перемещения узловых точек в линейных, а затем и в нелинейных постановках



расчета. Результаты получаем как с учетом касательных напряжений так и без них. Далее проводится верификация.

Результаты расчета осадок. На рисунках 5а, 5б представлены результаты осадок. Как видно на графиках за счет двуслойного основания осадки балочной плиты направлены в противоположные стороны.

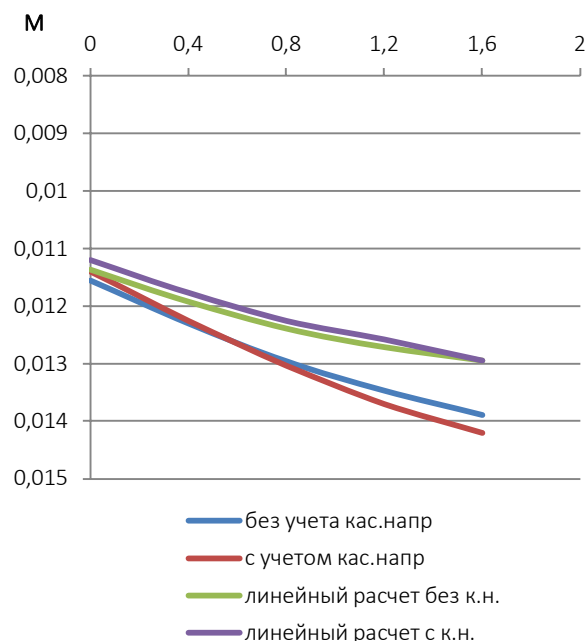


Рисунок 5а. - График сравнения результатов осадок двуслойного основания и плиты с учетом касательных напряжений и без них в контактной зоне для первых трех итераций, а также линейного расчета

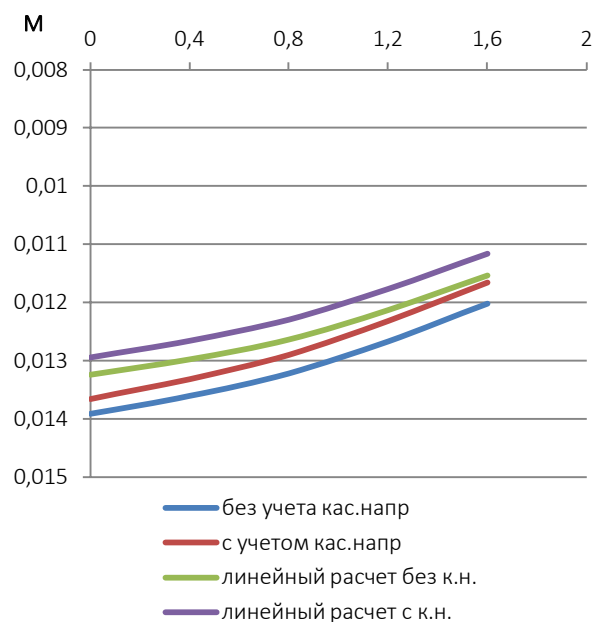


Рис. 5б. График сравнения результатов осадок основания и плиты с учетом касательных напряжений и без них в контактной зоне для первых трех итераций, а также линейного расчета

На графике 5а сходимось подтверждена в третьей итерации и составила 0,8%. Наблюдается просадка правой стороны плиты за счет увеличения расчетной области слабого верхнего слоя (супесь). Так же стоит обратить внимание на увеличение осадок с правой стороны за счет более точного расчета с учетом продольных деформаций на 2,1%, что в свою очередь позволит проектировать надежные фундаменты рациональных конструкций. Так же данный график осадок показывает некоторое снижение запаса прочности слабого верхнего грунта при наклонном основании и, в какой-то степени, противоречит работам [8-9].

На графике 5б происходит как бы продавливания не глубокой части верхнего прочного слоя (песок средней крупности) в более слабые грунты. В данном случае учет продольных деформаций в расчете снижает осадки на 2,4%, что позволяет сэкономить средства на его устройства.

Заключение. По результатам теоретических исследований сделаны следующие выводы:

1. В представленной статье усложнена постановка задачи и методика расчета системы балочной плиты с двуслойным основанием ВРМ с использованием конечно-разностных уравнений полной потенциальной энергии с учетом продольных деформаций в зоне контакта и дополняет работы [8-9].

2. Проведена верификация расчетов осадок основания при линейной и нелинейной постановке решения задачи.

3. Впервые получена возможность проектировать фундаменты с учетом более высокой степени объективности [10].

Библиографический список

1. СН 1.02.01-2019 Инженерные изыскания для строительства.
2. Козунова, О.В. Особенности проектирования плитных фундаментов на многослойных основаниях со слабыми слоями грунтов / О. В. Козунова // Рекомендации по проектированию и устройству рациональных фундаментов на основаниях, сложенных озерно-ледниковыми и лессовидными грунтами : Р 5.01.056.09 : введ. 01.10.09. - Минск: Стройтехнорм, 2009. - Гл. 8. - С. 39-47.
3. Босаков, С.В. Вариационно-разностный подход в решении контактной задачи для нелинейно-упругого неоднородного основания. Плоская деформация. Теория расчета / С.В. Босаков, О.В. Козунова // Архитектура и строительство. - Минск: БНТУ, 2009. - с. 5-13.
4. Козунова, О. В. Статические расчеты балочной плиты на однородном упругом основании с учетом касательных напряжений / О. В. Козунова, А. Г. Пусенков // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. - 2024. - № 1. - С. 39-44. - DOI 10.52928/2070-1683-2024-36-1-39-44. - EDN SMIRQO.
5. Статический анализ системы "балочная плита — нелинейно-упругое неоднородное основание" вариационно-разностным методом: диссертация на соискание



Механика деформируемого твердого тела

ученой степени кандидата технических наук: специальность 05.23.17 Строительная механика / Козунова О.В. - Минск, БНТУ – 2017 г. – 168 с.

6. Яголковский, С.Н. Влияние учета сцепления упругого слоя с подстилающим основанием на результаты расчета балок // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1969. - №4. – С. 3-5.

7. Винокуров, Е.Ф. Итерационный метод расчета оснований и фундаментов / Е.Ф. Винокуров // Строительство и архитектура Белоруссии. – 1970. – № 1. – с. 31–34.

8. Гудушаури, И.И. Расчет фундаментных полос на действие симметричных и обратнoсимметричных нагрузок с учетом касательных напряжений на поверхности контакта // Известия АН СССР. Механика и машиностроение, 1960, №6.

9. Флорин В.А. Основы механики грунтов. т. 1. Госстройиздат.

10. Руководство по проектированию плитных фундаментов каркасных зданий и сооружений башенного типа. Разработано к СНиП II-15-74. - М.: Стройиздат., 1984. – 265 с.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 23.04.2025; одобрена после рецензирования 30.05.2025; принята к публикации 30.05.2024.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 23.04.2025; approved after reviewing 30.05.2025; accepted for publication 30.05.2025.