

# ВЛИЯНИЕ АНИЗОТРОПИИ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ НЕИЗОЛИРОВАННОЙ ПЛИТЫ

**Магистрант 2 курса «Строительный инжиниринг»**

**Нургалиев Мейрам Русланович**

meiramnurg@gmail.com

**Научный руководитель: Дюсембаев И.Н.**

**Аннотация.** В статье рассматривается влияние анизотропных свойств грунтового основания на напряженно-деформированное состояние неизолированной плиты. Выполнен анализ существующих моделей основания, применяемых при расчете системы «плита–основание», а также исследовано изменение прогибов, изгибающих моментов и контактных напряжений при различных значениях коэффициента анизотропии. Расчет выполнен методом конечных элементов с использованием программного комплекса ЛИРА-САПР. Полученные результаты показывают, что учет анизотропии основания существенно влияет на распределение внутренних усилий и деформаций плиты. Установлено, что применение изотропных моделей основания может приводить к искажению реального напряженно-деформированного состояния конструкции.

**Ключевые слова:** плитный фундамент, анизотропное основание, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов, ЛИРА-САПР, прогибы, изгибающие моменты, контактные напряжения.

**Введение.** Современное строительство зданий и сооружений в сложных инженерно-геологических условиях требует повышения точности расчетов системы «основание–фундамент–сооружение». Одним из наиболее распространенных типов фундаментов являются плитные фундаменты, широко применяемые при строительстве гражданских и промышленных объектов. При проектировании плитных фундаментов грунтовое основание во многих случаях рассматривается как изотропная среда. Однако реальные грунтовые массивы обладают неоднородностью, слоистостью и различными физико-механическими характеристиками по направлениям, что приводит к анизотропии основания. Игнорирование анизотропных свойств грунтового массива может вызывать существенные погрешности при определении прогибов, изгибающих моментов и контактных напряжений. Особенно это проявляется при расчете плитных фундаментов на слабых и неоднородных грунтах. В связи с этим исследование влияния анизотропии основания на напряженно-деформированное состояние неизолированной плиты является актуальной научной и инженерной задачей.

Целью исследования является анализ влияния коэффициента анизотропии грунтового основания на напряженно-деформированное состояние неизолированной плиты.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- анализ существующих моделей основания;
- построение расчетной модели системы «плита–основание»;
- выполнение численного моделирования методом конечных элементов;
- исследование изменения прогибов, изгибающих моментов и контактных напряжений при различных значениях коэффициента анизотропии.

**Анализ существующих моделей основания.** Проблема взаимодействия плитных конструкций с грунтовым основанием является одной из наиболее сложных задач механики деформируемого твердого тела и геотехники. В современной инженерной практике для анализа системы «плита–основание» используются различные расчетные модели, отличающиеся уровнем допущений, точностью описания грунтового массива и сложностью математического аппарата.

Наиболее простой и широко распространенной является модель Винклера, предложенная Эмилем Винклером в XIX веке [3]. Согласно данной модели основание представляется в виде системы независимых упругих элементов, а реакция основания определяется локальным прогибом плиты. Несмотря на простоту и удобство практического применения, модель Винклера обладает рядом существенных недостатков. Основным ограничением является отсутствие взаимодействия между соседними участками основания, вследствие чего деформация грунтового массива рассматривается локально и не отражает реальную пространственную работу основания. Кроме того, модель не позволяет корректно описывать распределение напряжений по глубине грунтового массива [6], [10].

Как отмечается в работах Kerr [6] и Selvadurai [10], коэффициент постели не является физической константой грунта и зависит от размеров фундамента, условий нагружения и характеристик основания. Это существенно ограничивает универсальность применения модели Винклера.

Развитием локальных моделей являются двухпараметрические модели Пастернака и Власова. В модели Пастернака дополнительно учитывается сдвиговая жесткость основания, что позволяет частично описывать взаимодействие между соседними участками грунта [9].

Модель Власова основана на вариационном подходе и позволяет учитывать распределение деформаций по глубине основания [5]. Данный подход является более строгим с точки зрения теории упругости, однако требует применения сложного математического аппарата.

Наиболее точными являются модели упругого полупространства, основанные на положениях теории упругости [4], [10]. В рамках данных моделей грунтовой массив рассматривается как непрерывная деформируемая

среда, что позволяет учитывать пространственное распределение напряжений и деформаций.

Однако практическое применение моделей упругого полупространства существенно ограничивается высокой вычислительной сложностью и необходимостью использования численных методов [8].

Особую сложность представляет анализ плит на анизотропном основании. Большинство классических моделей ориентировано на изотропные среды и не позволяет корректно учитывать различие свойств грунта по направлениям. В реальных инженерно-геологических условиях грунтовые основания обладают слоистостью, неоднородностью и анизотропией, что оказывает существенное влияние на распределение напряжений и деформаций [12], [13].

Современные исследования в области геотехники показывают, что игнорирование анизотропии основания может приводить к недооценке внутренних усилий, неправильному определению осадок и снижению достоверности инженерных расчетов [11], [12]. В связи с этим в настоящее время наибольшее распространение получили численные методы расчета, прежде всего метод конечных элементов.

**Анализ существующих моделей основания.** Классические подходы к расчету плит на основании основаны на различных моделях взаимодействия конструкции и грунтового массива. Наиболее простой является модель Винклера, согласно которой основание представляется в виде системы независимых упругих элементов.

Несмотря на простоту реализации, модель Винклера обладает рядом недостатков. В рамках данной модели отсутствует учет взаимодействия между соседними участками основания, что ограничивает возможность описания пространственного распределения напряжений в грунтовом массиве. Развитием модели Винклера являются двухпараметрические модели Пастернака и Власова, позволяющие учитывать сдвиговые взаимодействия в основании. Однако данные модели также обладают ограничениями, связанными со сложностью определения дополнительных параметров и неполным учетом анизотропии.

Наиболее универсальным инструментом анализа напряженно-деформированного состояния системы «плита–основание» являются численные методы, среди которых ведущую роль занимает метод конечных элементов.

Метод конечных элементов позволяет учитывать сложную геометрию конструкции, неоднородность и анизотропию основания, сложные граничные условия, а также пространственное распределение напряжений и деформаций, что обеспечивает более точное моделирование напряженно-деформированного состояния плиты и позволяет достоверно оценивать влияние характеристик грунтового основания на работу конструкции. В связи

с этим для исследования системы «неизолированная плита – анизотропное основание» в настоящей работе используется метод конечных элементов.

**Постановка задачи.** В качестве объекта исследования рассматривается неизолированная железобетонная плита, расположенная на анизотропном грунтовом основании.

Основание характеризуется различной жесткостью по направлениям X и Y, что учитывается посредством коэффициентов постели  $k_x$  и  $k_y$ .

Коэффициент анизотропии определяется выражением:

$$\alpha = k_x / k_y$$

При  $\alpha = 1$  основание считается изотропным. При увеличении коэффициента анизотропии учитывается различие жесткости грунтового основания по направлениям.

На плиту действует равномерно распределенная нагрузка  $q$ .

Расчет выполняется методом конечных элементов в программном комплексе ЛИРА-САПР.

### **Математическая модель**

В основе расчета лежит дифференциальное уравнение изгиба тонкой плиты:

$$D\nabla^4 w = q - q_r$$

где:

$D$  — цилиндрическая жесткость плиты;

$w$  — прогиб плиты;

$q$  — внешняя нагрузка;

$q_r$  — реакция основания.

Жесткость плиты определяется выражением:

$$D = Eh^3 / 12(1 - \nu^2)$$

Реакция анизотропного основания определяется с учетом различной жесткости по направлениям:

$$q_r = k_x w_x + k_y w_y$$

Таким образом, математическая модель позволяет учитывать изгибную работу плиты, пространственное взаимодействие грунтового основания, анизотропию среды и влияние внешней нагрузки.

**Численный эксперимент.** Численное моделирование выполнялось методом конечных элементов в программном комплексе ЛИРА-САПР. Для моделирования плиты использовались пластинчатые конечные элементы, позволяющие учитывать изгибную и пространственную работу конструкции.

Основание моделировалось как упругая анизотропная среда с различной жесткостью по направлениям X и Y. Для описания анизотропных свойств основания использовались коэффициенты постели  $k_x$  и  $k_y$ . В качестве расчетной модели рассматривалась железобетонная плита размером 6×6 м и толщиной 0,4 м. На плиту действовала равномерно распределенная нагрузка,

моделирующая эксплуатационные воздействия. Параметры материала плиты принимались в соответствии с требованиями нормативных документов Республики Казахстан [1], [2].

Для исследования влияния анизотропии основания были рассмотрены четыре расчетных варианта.

Вариант	$k_x, \text{кН/м}^3$	$k_y, \text{кН/м}^3$	$\alpha$	Характер основания
1	20000	20000	1.00	Изотропное
2	25000	20000	1.25	Слабая анизотропия
3	25000	15000	1.67	Средняя анизотропия
4	30000	15000	2.00	Выраженная анизотропия

Полученные результаты показывают, что увеличение коэффициента анизотропии приводит к изменению напряженно-деформированного состояния системы «плита–основание».

При увеличении коэффициента анизотропии наблюдается рост максимальных прогибов плиты, что связано с перераспределением жесткости основания по направлениям.

Анализ изгибающих моментов показал, что увеличение жесткости основания по оси X приводит к росту изгибающих моментов  $M_x$  и одновременному снижению значений  $M_y$ .

Кроме того, результаты моделирования показывают увеличение контактных напряжений основания и появление локальных зон концентрации реакций грунта. Это свидетельствует о существенном влиянии анизотропии основания на пространственную работу конструкции.

Для исследования влияния анизотропии основания были рассмотрены четыре расчетных варианта.

Вариант	$k_x, \text{кН/м}^3$	$k_y, \text{кН/м}^3$	$\alpha$	Характер основания
1	20000	20000	1.00	Изотропное
2	25000	20000	1.25	Слабая анизотропия
3	25000	15000	1.67	Средняя анизотропия
4	30000	15000	2.00	Выраженная анизотропия

Результаты расчета показали, что при увеличении коэффициента анизотропии наблюдается рост максимальных прогибов плиты и изменение формы деформирования конструкции.

Кроме того, происходит перераспределение изгибающих моментов. При увеличении коэффициента анизотропии возрастают значения моментов  $M_x$ , тогда как значения  $M_y$  уменьшаются.

Анализ контактных напряжений показал увеличение локальных концентраций реакций основания и изменение характера взаимодействия системы «плита–основание».

**Анализ результатов.** Результаты численного моделирования подтверждают существенное влияние анизотропии основания на напряженно-деформированное состояние плиты.

При изотропном основании распределение прогибов и внутренних усилий имеет практически симметричный характер. При наличии анизотропии наблюдается смещение зоны максимальных прогибов и перераспределение изгибающих моментов.

Установлено, что увеличение коэффициента анизотропии приводит к:

- росту максимальных прогибов;
- увеличению неравномерности деформаций;
- перераспределению внутренних усилий;
- росту контактных напряжений основания.

Полученные результаты показывают, что применение изотропных моделей основания в ряде случаев может приводить к недооценке внутренних усилий и искажению реального напряженно-деформированного состояния конструкции.

**Практическое значение результатов исследования.** Практическое значение выполненного исследования заключается в возможности повышения точности расчета плитных фундаментов при проектировании зданий и сооружений в сложных инженерно-геологических условиях.

Полученные результаты показывают, что использование изотропных моделей основания в ряде случаев может приводить к искажению реального напряженно-деформированного состояния конструкции и недооценке внутренних усилий. Учет анизотропии основания позволяет более достоверно определять прогибы, изгибающие моменты и контактные напряжения, что особенно важно при проектировании плитных фундаментов на слабых, неоднородных и слоистых грунтах.

Результаты исследования могут быть использованы при проектировании плитных фундаментов зданий, оценке взаимодействия системы «основание–фундамент», разработке расчетных моделей оснований, а также при совершенствовании методов численного моделирования напряженно-деформированного состояния конструкций на анизотропных грунтовых основаниях. Кроме того, результаты работы могут использоваться при дальнейших исследованиях взаимодействия плитных конструкций с анизотропными грунтовыми основаниями.

**Заключение.** Выполненное исследование позволило оценить влияние анизотропных свойств грунтового основания на напряженно-деформированное состояние неизолированной плиты.

Установлено, что учет анизотропии основания существенно влияет на распределение прогибов, изгибающих моментов и контактных напряжений.

Показано, что использование изотропных моделей основания может приводить к искажению результатов расчета, особенно при наличии выраженной неоднородности грунтового массива.

Применение метода конечных элементов обеспечивает возможность учета анизотропных свойств основания и позволяет получать более достоверные результаты расчета системы «плита–основание».

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании плитных фундаментов в сложных инженерно-геологических условиях.

### **Список использованной литературы**

1. СП РК 5.01-102-2013 «Основания зданий и сооружений».
2. СП РК EN 1997-1:2004/2011 «Геотехническое проектирование».
3. Timoshenko S.P., Woinowsky-Krieger S. Theory of Plates and Shells. McGraw-Hill, 1959.
4. Власов В. З. Общая теория упругих оснований. М., 1964.
5. Kerr A.D. Elastic and viscoelastic foundation models // Journal of Applied Mechanics. 1964.
6. Hetényi M. Beams on Elastic Foundation. University of Michigan Press, 1946.
7. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. The Finite Element Method.
8. Пастернак П. Л. Основы нового метода расчета фундаментов на упругом основании. М., 1954.
9. Selvadurai A.P.S. Elastic Analysis of Soil-Foundation Interaction. Elsevier, 1979.
10. Harden C., Hutchinson T. Beam on nonlinear Winkler foundation modeling of shallow foundations. 2009.
11. Daloglu A.T. Numerical analysis of plates on elastic foundations.
12. Vallabhan C.V.G. Analysis of plates resting on elastic foundations.