

В.И. Клевеко

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет

ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ ОСАДКИ ФУНДАМЕНТА НА ГЛИНИСТЫХ ОСНОВАНИЯХ, АРМИРОВАННЫХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫМИ ПРОСЛОЙКАМИ

Приведены результаты исследования осадок фундаментов на глинистых основаниях, армированных горизонтальными геосинтетическими прослойками. Разработан метод определения модуля деформации однородных глинистых оснований с однослойным армированием.

***Ключевые слова:** армированные глинистые грунты, осадка фундаментов, геотекстильный материал.*

Затраты на сооружение фундаментов зданий и сооружений составляют значительную долю от общей стоимости строительства. Поэтому их уменьшение дает весьма ощутимые экономические результаты. Особенно остро эта проблема стоит при возведении фундаментов на переувлажненных пылевато-глинистых грунтах, в том числе и слабых грунтах. На многих территориях Северо-Запада России, Урала и Западной Сибири имеются такие грунты. Возведение фундаментов на таких грунтах требует больших материальных и трудовых затрат. Одним из способов увеличения деформативных свойств грунтов является применение армированного грунта. Во многих случаях применение армированных грунтов позволяет значительно снизить затраты на возведение фундаментов, а следовательно, и стоимость строительства. Работа армированных оснований в пылевато-глинистых грунтах изучена еще недостаточно хорошо. Для изучения работы армированных оснований были проведены комплексные экспериментально-теоретические исследования, которые включали в себя лабораторные модельные исследования, натурные испытания, численное моделирование работы армированных оснований в водонасыщенных пылевато-глинистых грунтах. Проведенные исследования позволили получить качественную и количественную картину работы армогрунтовых оснований и их напряженно-деформированное состояние.

Одним из основных методов решения задач, связанных с определением усадок армированных оснований, является метод конечных элементов (МКЭ), который дает возможность моделировать работу системы «основание–фундамент» с учетом многих факторов. Метод конечных элементов позволяет учитывать: природное напряженное состояние; сложные напластования грунтов; изменение деформационных и прочностных свойств грунтов в процессе строительства и эксплуатации сооружений; поэтапное приложение внешних нагрузок на исследуемый объект. Кроме того, МКЭ позволяет производить одновременный расчет по двум предельным состояниям с учетом совместной работы системы «основание–фундамент», расчет напряженно-деформированного состояния грунтов с выявлением зон развития пластических деформаций.

Реализация задачи по определению осадок фундаментов на армированных основаниях, а также прогноз напряженно-деформированного состояния активной зоны были выполнены с помощью пакета прикладных программ *PLAXIS*.

Основные допущения и возможности, положенные в основу расчета по программе *PLAXIS*:

- исследуемая область дискретизируется 15-узловыми треугольными элементами, которые обеспечивают кубическое распределение напряжений и деформаций в пределах каждого элемента;
- для моделирования работы системы «фундамент-основание» на участках контакта вводятся специальные «поверхностные» (контактные) элементы, позволяющие более реально отразить действительное состояние системы на различных этапах нагружения;
- для моделирования работы подпорных стен, шпунтовых ограждений, оболочек тоннелей и пластин используются специальные линейные элементы, работа которых учитывает действующие изгибающие моменты и реальную нормальную и изгибную жесткости, что позволяет рассматривать работу рам и балок на упругом основании;
- для моделирования грунтовых анкеров используются специальные упругопластические элементы, которые определяются исходя из действующей максимальной силы на выдергивание и нормальной жесткости элемента;
- в программе заложены возможности по расчету геотекстильных элементов, которые в современной практике строительства использу-

ются для укрепления грунтовых оснований и обеспечения устойчивости откосов дамб и подпорных стенок. Геотекстильный материал моделируется с помощью специальных элементов, испытывающих растягивающие напряжения;

– для анализа консолидации грунтового основания *PLAXIS* позволяет задать существующее избыточное поровое давление в грунте, уровень грунтовых вод, водопроницаемость грунта, дренирующие свойства материалов.

В программе *PLAXIS* заложено несколько моделей грунта: упругая модель грунта, модели Рейсса-Прандтля, Мора-Кулона, «продвинутая» Мора-Кулона, модель слабого грунта, модель скального грунта и *PLAXIS*-Кап-модель.

При расчете программа может автоматически выбирать величину шага загрузки, что особенно удобно при расчетах в пластической стадии работы. Для точного вычисления потери несущей способности грунта возможно самостоятельно задавать пошаговое нагружение. Во всех расчетах вводятся коэффициенты запасов прочности и устойчивости исследуемых материалов. В программе заложена функция стадийного нагружения и разгрузки грунтового основания, что позволяет реально моделировать строительные процессы, связанные с земляными работами, возведением зданий и их реконструкцией.

Расчет осадок фундаментов согласно п. 5.6.5 [1] производится исходя из выполнения условия

$$s \leq s_u, \quad (1)$$

где s – осадка основания фундамента (совместная деформация основания и сооружения);

s_u – предельное значение осадки основания фундамента (совместной деформации основания и сооружения), устанавливаемое в соответствии с указаниями 5.6.46–5.6.50 [1].

Во всех методах расчета осадок фундаментов основной деформационной характеристикой является модуль общей деформации E_0 . Поэтому необходимо количественно оценить влияние армирования на осадку фундамента и определить модуль деформации армированного основания. Для оценки влияния армирования на осадку фундамента был проведен численный эксперимент с помощью программы *PLAXIS*.

Задача решалась в условиях осевой симметрии. Рассматривалась задача загрузки вертикальной нагрузкой круглого штампа, находящегося на поверхности грунта. Размеры расчетной области основания принимались таким образом, чтобы ее границы не оказывали влияния на результаты расчета. Разбивка на элементы производилась программой автоматически. В рассматриваемой задаче принимались следующие граничные условия: по контуру верхней границы перемещения не ограничиваются; по вертикальным граням ограничиваются перемещения в горизонтальном направлении; по нижней границе перемещения отсутствуют. При расчете использовалась «продвинутая» модель Мора-Кулона. В задаче рассматривались однослойные армированные основания в глинистых грунтах с показателем $0,4 \leq I_L \leq 0,6$. Армирующая прослойка шириной не менее $3d$ (d – диаметр или ширина фундамента) закладывалась на глубине $0,25d$. Свойства грунтов основания принимались следующими: сцепление C изменялось в пределах от 5 до 30 кПа с шагом 5 кПа; угол внутреннего трения ϕ изменялся в пределах от 5 до 25 градусов с шагом 5 градусов. Армирующая прослойка моделировалась специальным «геотекстильным» элементом. Взаимодействие этого элемента с грунтом имитировалось особыми поверхностными элементами. Жесткость прослойки G_{rf} ($G_{rf} = E_r \cdot A_{rf}$) изменялась от 25 до 2000 кН/м. Заглубление фундамента задавалось боковой пригрузкой, равной давлению грунта на уровне подошвы фундамента. Ступени нагрузки и расчетное сопротивление основания рассчитывались программой автоматически. Модуль деформации неармированного грунта принимался 1000, 5000, 10000 и 15000 кПа.

Зная осадку штампа на армированном основании, можно определить соответствующий модуль общей деформации армированного грунта, используя для этого известную формулу Шлейхера

$$E_{rf} = (1 - \nu^2) \frac{\omega P \sqrt{A}}{S_{rf}}, \quad (2)$$

где E_{rf} – модуль деформации армированного основания; ν – коэффициент бокового расширения грунта; ω – коэффициент, зависящий от формы подошвы штампа; P – нагрузка на штамп; A – площадь штампа; S_{rf} – осадка штампа на армированном основании.

Для оценки влияния армирования введем коэффициент K_r , равный отношению модуля деформации армированного грунта к модулю деформации неармированного грунта:

$$K_r = E_{rf}/E_o. \quad (3)$$

Используя значения осадок, полученные в результате проведенного численного эксперимента, и подставляя их в формулу (2)), удалось получить значения коэффициента K_r , приведенные в табл. 1. На рис. 1. показана зависимость K_r от модуля деформации грунта и жесткости армирующей прослойки.

Таблица 1

Значения коэффициента K_r

Модуль деформации грунта, кПа	Жесткость армирующей прослойки $G_{rf} = E_{rf} \cdot A$, кН/м				
	2000	1000	500	100	25
1000	1,757	1,736	1,679	1,558	1,446
5000	1,588	1,521	1,467	1,353	1,303
10000	1,459	1,366	1,338	1,251	1,207
15000	1,368	1,298	1,250	1,180	1,160

Таким образом, зная значения K_r и модуль общей деформации неармированного грунта, можно найти модуль деформации армированного грунта:

$$E_{rf} = K_r \cdot E_o. \quad (4)$$

Для определения зоны влияния армирования по глубине были выполнены дополнительные исследования напряженно-деформированного состояния армированного основания.

Достоверность того или иного метода расчета может быть оценена в результате сравнения экспериментально установленных зависимостей с аналогичными, полученными расчетным путем. Для этого с помощью программы *PLAXIS* было выполнено численное моделирование работы армированных оснований при действии вертикальной силы на круглый жесткий штамп. Ниже рассмотрены основные результаты численных исследований, а также выполнено сравнение их с экспериментальными данными.

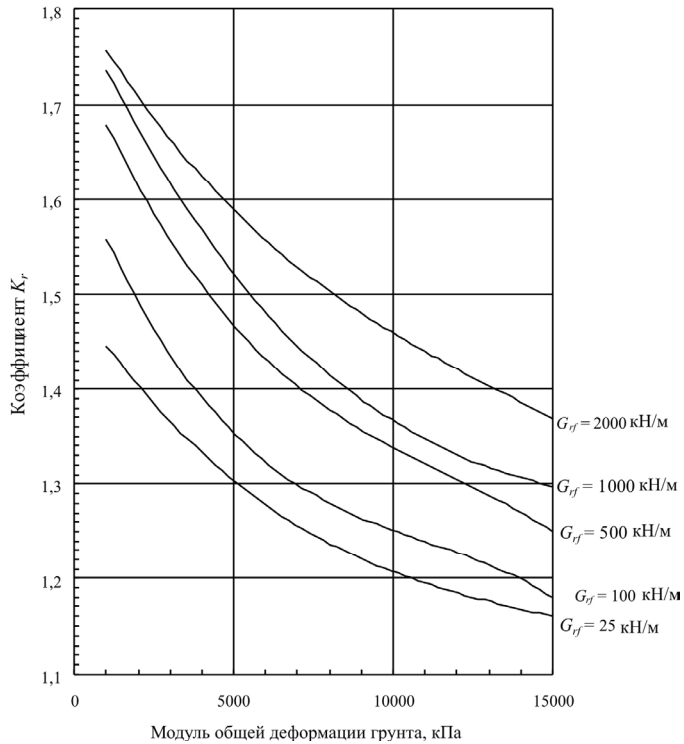


Рис.1. Графики зависимости коэффициента K_r от модуля деформации грунта и жесткости армирующей прослойки G_{rf}

Задача решалась в условиях осевой симметрии. В рассматриваемой задаче принимались следующие граничные условия: по контуру верхней границы перемещения не ограничиваются ($U \neq 0, V \neq 0$); по вертикальным граням ограничиваются перемещения в направлении X ($U=0, V \neq 0$); по нижней границе перемещения отсутствуют ($U=0, V=0$). При расчете использовалась «продвинутая» модель Мора-Кулона. Размеры рассматриваемых областей выбирались такими, чтобы границы не влияли на НДС фундаментов. Данные физико-механических свойств грунта и материалов приведены в табл. 2. Расчет велся до нагрузки $N_{пр} = 150$ кПа. Ступени нагрузки подбирались программой автоматически.

Для исследования НДС армированного основания и сравнения его с неармированным основанием с помощью пакета *PLAXIS* были определены вертикальные напряжения в активной зоне основания. На рис. 2 и 3 приведены результаты исследования распределения верти-

кальных напряжений в активной зоне армированных и неармированных оснований при различной глубине. На рис. 2 показаны значения вертикальных напряжений при нагрузке на штамп 50 кПа, т.е. в упругой стадии работы грунтовых оснований, а на рис. 3 – при нагрузке на штамп 125 кПа, т.е. при упругопластической стадии работы.

Таблица 2

Вводимые значения физико-механических свойств грунтов и материалов при расчете по МКЭ

Характеристики	Грунт основания	Контакт-элементы	Армирующая прослойка
Удельный вес грунта γ , кН/м ³	18,4	18,4	–
Коэффициент Пуассона, ν	0,35	0,35	–
Модуль сдвига G , кПа	185	185	–
Модуль деформации E , кПа	500	500	–
Удельное сцепление C , кПа	10	9	–
Угол внутр. трения ϕ , град	14,0	10,0	–
Жесткость арматуры, кН/м	–	–	2100

Анализ графиков, приведенных на рис. 2, а, показывает, что при начальных ступенях нагрузки на глубине расположения армирующей прослойки ($0,25d$) вертикальные напряжения в армированном основании меньше, чем в неармированном. Эпюра напряжений носит явно седлообразный характер, что подтверждается и результатами экспериментов. С ростом глубины эпюра вертикальных напряжений трансформируется в выпуклую (рис. 2, б, в) и напряжения в армированном основании становятся несколько больше, чем в неармированном. В целом при работе оснований в упругой стадии различие в качественной картине эпюр активных вертикальных напряжений небольшое, за исключением более выраженной «седловидности» неармированного основания на глубине $0,25d$.

При нагрузке на штамп 125 кПа (рис. 3) качественная картина эпюр активных вертикальных напряжений изменяется. На глубине $0,25d$ эпюры вертикальных напряжений по-прежнему имеют «седлообразный» вид. Вертикальные напряжения в армированном основании значительно меньше, чем в неармированном основании.

На глубине $0,75d$ и ниже эпюры вертикальных напряжений трансформируются в выпуклую форму. Значения вертикальных напряжений для армированного основания остаются заметно меньшими, чем для неармированного основания.

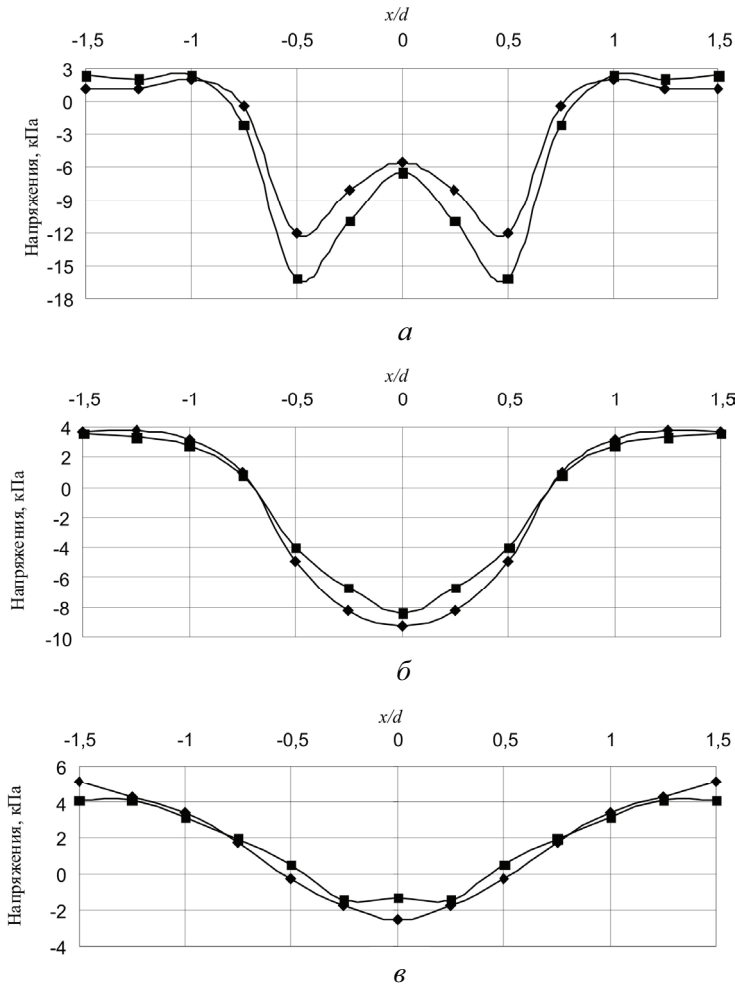


Рис. 2. Эпюры вертикальных напряжений в грунте при нагрузке 50 кПа:
 а – на глубине $0,25d$; б – на глубине $0,75d$; в – на глубине $1,25d$;
 ◆ – армированное основание; ■ – неармированное основание

На глубине $1,25d$ значения вертикальных напряжений для армированного и неармированного оснований практически совпадают.

Результаты исследования НДС армированного основания показали, что армирующая прослойка влияет на распределение напряжений в грунте до глубины $1,0–1,25d$ от подошвы фундамента. Ниже этой границы напряжения в грунте армированного и неармированного оснований практически совпадают. Примем толщину этого активного слоя с модулем деформации E_{rf} , равной d , для некоторого запаса с учетом точности вычисления. Тогда расчетную схему для определения

осадки фундамента на армированном основании в простейшем случае можно представить как двухслойное основание, верхний слой которого имеет толщину d и модуль деформации E_{rf} , а нижний слой имеет модуль деформации грунта. Величину E_{rf} можно определить по формуле (4) с помощью табл. 2 или графиков, приведенных на рис. 1. На рис. 4 приведена расчетная схема для предлагаемой методики расчета.

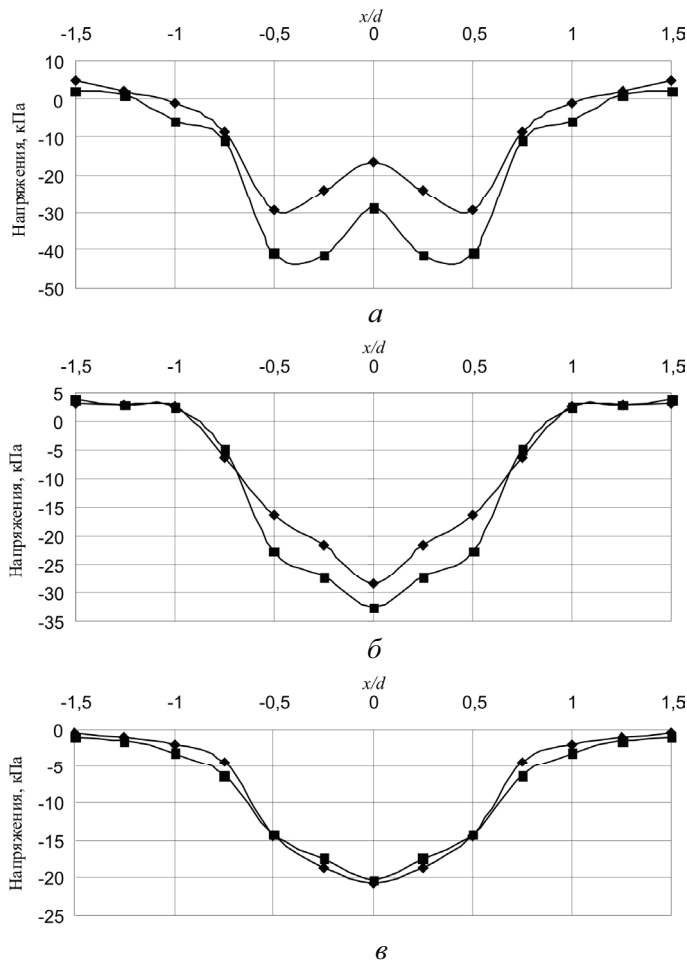


Рис. 3. Эпюры вертикальных напряжений в грунте при нагрузке 125 кПа:
 а – на глубине $0,25d$; б – на глубине $0,75d$; в – на глубине $1,25d$;
 ◆ – армированное основание; ■ – неармированное основание

Для проверки работоспособности предложенной методики расчета осадки фундаментов были проведены сравнительные расчеты по известным методам [1].

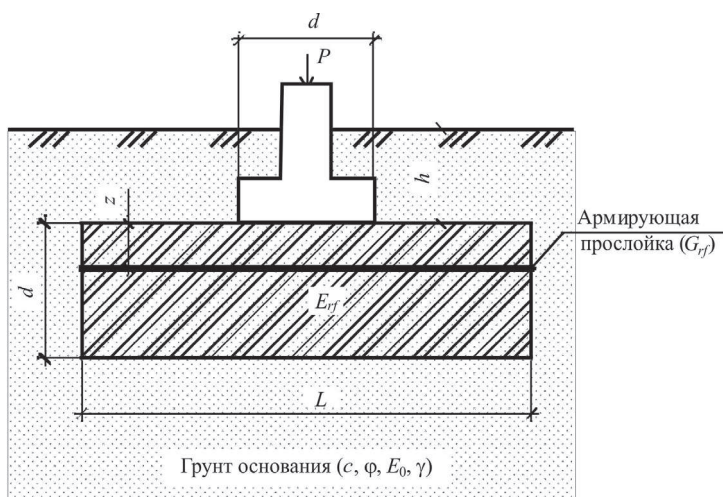


Рис. 4. Схема для расчета армированного основания

Анализ результатов проверки показал, что наименьшую погрешность во всем диапазоне характеристик грунтов имеет метод послойного суммирования.

Для слабых грунтов с R_{rf} менее 100 кПа погрешность расчета достигает 17 % в сторону занижения осадки. Поэтому метод послойного суммирования рекомендуется для грунтов, обладающих расчетным сопротивлением армированного основания более 100 кПа. Максимальная погрешность расчета в диапазоне от 100 до 200 кПа не превышает 11 % [2].

Список литературы

1. СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01–83* / Министерство регионального развития Российской Федерации. – М., 2011. – 161 с.
2. Клевко В.И. Оценка напряженно-деформированного состояния армированных оснований в пылевато-глинистых грунтах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Уфа, 2002. – 17 с.

Получено 28.02.2012