



П. С. Пойта
П. В. Шведовский
Д. Н. Клебанюк

Механика грунтов

Для студентов
учреждений
высшего образования

**П. С. Пойта П. В. Шведовский
Д. Н. Клебанюк**

Механика грунтов

*Допущено
Министерством образования
Республики Беларусь
в качестве учебного пособия
для студентов
учреждений высшего образования
по специальностям
«Промышленное и гражданское строительство»,
«Экспертиза и управление недвижимостью»,
«Сельское строительство
и обустройство территорий»*

Минск
 «Вышэйшая школа»
2019

УДК 624.131(075.8)

ББК 38.58я73

П47

Рецензенты: кафедра «Строительные технологии и конструкции» учреждения образования «Белорусский государственный университет транспорта» (доцент кафедры кандидат технических наук *В.В.Талецкий*); профессор кафедры «Геотехника и экология в строительстве» строительного факультета Белорусского национального технического университета доктор технических наук, профессор, действительный член Академии строительства Украины *М.Н. Никитенко*

Пойта, П. С.

П47 **Механика грунтов : учебное пособие / П. С. Пойта, П. В. Шведовский, Д. Н. Клебанюк. – Минск : Вышэйшая школа, 2019. – 280 с. : ил.**

ISBN 978-985-06-3068-1.

Изложены основные аспекты механики грунтов, связанные с их физико-механическими свойствами, оценкой напряженного состояния, деформируемости и прочности грунтовых массивов, рассмотрены основные виды, состав, строение, физические свойства и классификационные показатели грунтов. Изложена теория предельного напряженного состояния грунтов и особенности ее практического применения. Особое внимание уделено видам и причинам деформаций оснований, зданий и сооружений, определению осадок фундаментов, особенностям прогноза их во времени.

Для студентов строительных специальностей. Может быть полезно работникам проектных и строительно-эксплуатационных организаций в их практической деятельности.

УДК 624.131(075.8)

ББК 38.58я73

Все права на данное издание защищены. Воспроизведение всей книги или любой ее части не может быть осуществлено без разрешения издательства.

ISBN 978-985-06-3068-1

© Пойта П.С., Шведовский П.В.,
Клебанюк Д.Н., 2019

© Оформление. УП «Издательство
“Вышэйшая школа”», 2019

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Прописные буквы

A	—	площадь, амплитуда колебаний
B	—	жесткость, ширина подвала, объекта, территории
C	—	класс бетона, фиксированное значение, константа
C_c	—	коэффициент компрессии
C_z, C_x	—	коэффициенты жесткости основания упругого равномерного и неравномерного сжатия
C_v	—	коэффициент консолидации
C_p, C_ψ	—	коэффициенты равномерного и неравномерного сдвига
D	—	диаметр круга
DL	—	отметка планировки
E, E_0	—	модуль упругости, деформации
EJ	—	жесткость фундаментной балки
E_a, E_n	—	равнодействующая активного и пассивного давления грунта
$E_{об}$	—	модуль объемной деформации
F	—	расчетное значение силы предельного сопротивления основания, сила, воздействие
F_d	—	несущая способность сваи
F_u	—	несущая способность грунта
FL	—	отметка подошвы фундамента
G	—	собственный вес, постоянное воздействие, модуль сдвига
H	—	высота объекта, действующий напор
H_c	—	глубина сжимаемой толщи
HL	—	нижняя граница сжимаемой толщи
I_D	—	показатель динамической уплотненности
J	—	момент инерции
J_p	—	относительная плотность
J_L	—	показатель текучести (консистенции)
J_p	—	число пластичности
L	—	длина объекта или его частей
M	—	изгибающий, крутящий момент, масса
N	—	осевая (вертикальная) сила, нагрузка
NL	—	отметка поверхности природного рельефа
N_γ, N_q, N_c	—	табличные коэффициенты несущей способности грунта
Q	—	переменное воздействие
R, R_f	—	расчетное сопротивление грунта, радиус искривления поверхности основания, сооружения, длительная прочность грунта
S	—	статический момент, внутреннее усилие, класс арматуры
S_r	—	степень влажности
T	—	горизонтальная сила, сила трения
U	—	степень консолидации, показатель изменений
V	—	поперечная (перерезывающая) сила, объем
W	—	момент сопротивления, влажность, влагоемкость
WL	—	уровень подземных вод
X, Y, Z	—	оси координат

Γ — гибкость фундаментной балки, интенсивность деформаций сдвига
 Θ — сумма нормальных напряжений

Строчные буквы

a — расстояние, геометрический размер
 b — ширина (меньший размер) подошвы фундамента
 c — удельное сцепление
 c_1, c_2 — скорость распространения продольных, поперечных волн
 d — глубина заложения фундамента, диаметр круга, рабочая высота сечения
 e — коэффициент пористости, эксцентриситет
 f — прочность бетона (материала), коэффициент трения
 h — высота, толщина слоя грунта
 i — крен, обозначение элемента, гидравлический градиент
 k — поправочный коэффициент
 k_f — коэффициент фильтрации
 l — длина (большой размер) подошвы фундамента, размер (большой) пролета конструкций
 m — масса, коэффициент сжимаемости грунта, объем твердых частиц в единице объема
 m_v, m_0 — коэффициент сжимаемости, относительной сжимаемости
 n — пористость, число, отклонение, безразмерный параметр
 q — равномерно распределенная вертикальная нагрузка
 q_c — сопротивление грунта конусу при статическом зондировании
 p, p_e, p_{str} — давление, давление связности, интенсивность нагрузки, структурная прочность
 p_0, p, p_u — эффективное, нейтральное, полное давление, предельная нагрузка
 p_k — капиллярное давление
 p_d — условное сопротивление грунта конусу при динамическом зондировании
 r — перемещение, радиус
 $s, \Delta s$ — осадка основания, разность осадок соответственно
 s_t — осадка во времени
 t — толщина, время
 u — периметр, горизонтальное перемещение, избыточное поровое давление
 v, v_f — скорость потока, фильтрации
 w — перемещение, ширина раскрытия трещин, угловая частота, влажность
 x, y, z — координаты, разность значений координат
 α — угол, отношение, доверительная вероятность, коэффициент затухания напряжений
 β, δ — угол, коэффициент, отношение
 γ — удельный вес
 $\gamma_p, \gamma_m, \gamma_q, \gamma_n, \gamma_c$ — коэффициенты надежности по нагрузке, материалу, грунту, значению сооружения, условий работы соответственно

ε —	деформация (в том числе относительная)
ε_{sl} —	коэффициент относительной просадочности
λ —	отношение, относительная неравномерность осадок
ν, ν_0 —	коэффициент бокового расширения (Пуассона), относительной погрешности деформации
ξ —	относительная глубина, коэффициент бокового давления грунта
ρ —	плотность, кривизна
$\sigma, \sigma_a, \sigma_p$ —	нормальные напряжения, активное и пассивное давление
τ —	касательные напряжения
φ —	угол внутреннего трения

Индексы

ν, h —	активные вертикальная и горизонтальная составляющие силы
crit —	критический
d —	расчетное значение
v —	восстановление
Δ —	область изменения (разность характеристик)
m —	материал, среднее значение, изгиб
max —	максимум
min —	минимум
sup —	верхнее значение
inf —	нижнее значение
u —	предельное значение
prp —	прогнозируемое давление при приложении нагрузок
natp —	природное давление

Единицы измерения

пространство — м (см, мм), м² (см², мм²), м³ (см³, мм³)
 масса — кг, г
 сила, вес — Н, кН, МН, ГН
 момент силы — Н · м, кН · м
 плотность — г/см³, кг/м³, г/м³
 удельный вес — н/м³, кН/м³, МН/м³
 напряжение, давление, прочность — Па, кПа, МПа
 коэффициент фильтрации — м/сут
 коэффициент постели — Н/м³, кН/м³

ПРЕДИСЛОВИЕ

Грунты основания обычно обладают в тысячи раз большей деформативностью и в сотни раз меньшей прочностью, чем материалы, из которых возводятся сооружения, поэтому надежная эксплуатация последних в значительной степени зависит от величины неравномерности деформаций грунтов оснований. Следствием неправильной оценки характера инженерно-геологических условий и строительных свойств грунтов часто являются большие деформации конструкций сооружений и даже их полное разрушение.

Деформации грунтов в основании в значительной степени зависят от нагрузки по подошве фундаментов. В связи с этим при проектировании фундаментов конструкции и размеры их в плане необходимо выбирать с учетом совместной работы грунтов основания и конструкций сооружения.

Стоимость работ по подготовке оснований и устройству фундаментов обычно составляет 5...10% общей стоимости объекта, а при сложных грунтовых условиях она может превысить 20%. Исходя из этого, основными задачами курса являются:

- правильная оценка потенциальных геодинамических процессов, свойств грунтов, возможности их деформации и потери устойчивости под действием нагрузок;
- разработка мер по уменьшению или исключению воздействия геодинамических процессов на возводимые сооружения;
- улучшение, в случае необходимости, строительных качеств грунтов для возможности использования их в основании;
- определение рациональных размеров фундаментов и вида подземных конструкций сооружений;
- выбор методов устройства фундаментов, при которых не нарушается структура грунтов в основании в период строительства.

Для успешного освоения курса «Механика грунтов», который является частью дисциплины «Механика грунтов, основания и фундаменты», обязательно изучение следующих вопросов:

- оценка физико-механических свойств грунтов во всем их многообразии;
- определение напряженно-деформированного состояния грунтового основания под действием нагрузки, передаваемой от зданий и сооружений, и других факторов;
- оценка прочности грунтов, устойчивости грунтовых массивов против сползания, разрушения и давления грунта на ограждающие конструкции;
- прогноз полных осадок зданий и сооружений, разности осадок отдельных фундаментов, осадок во времени.

Выпускник университета должен уметь:

- правильно оценивать возможные геодинамические процессы, свойства грунтов, возможность их деформации и потери устойчивости под действием нагрузок;
- определять напряженно-деформированное состояние грунтовых массивов, прогнозировать его изменение в последующем;
- улучшать в случае необходимости строительные свойства грунтов для возможного использования их в основании;
- определять вид и рациональную конструкцию фундаментов и вид подземных конструкций сооружений;
- выбирать методы устройства фундаментов, при которых не нарушалась бы структура грунтов в основании в период строительства.

Кроме того, необходимы знания по инженерной геологии, сопоставлению материалов, теории упругости, строительной механике, строительным конструкциям, технологии строительного производства, технике безопасности и экономике.

Для более глубокого изучения курса и развития практических навыков в учебном пособии приведены нормативные ссылки (приложение 1), вопросы для самоконтроля (приложение 3), контрольные тесты (приложение 4) и справочные материалы (приложение 5).

Учитывая, что в ближайшем будущем возможен переход на европейские нормы проектирования, в приложении 2 приведены термины и основные обозначения согласно EN 1997-1:2004. Еврокод 7. Проектирование геотехническое.

Авторы искренне благодарят рецензентов – коллективы кафедр «Геотехника и экология в строительстве» (Белорусский национальный технический университет) и «Строительные технологии и конструкции» (Белорусский государственный университет транспорта) за участие в работе над рукописью. Особая признательность – доктору технических наук, профессору М.И. Никитенко и кандидату технических наук, доценту В.В. Талецкому, а также кандидату технических наук, доценту В.А. Сернову.

Также авторы благодарны за помощь в подготовке раздела 2 инженеру Г.П. Деминой, раздела 4 – инженеру В.Н. Дедок, раздела 7 – кандидату технических наук А.Н. Тарасевичу.

Любые замечания и предложения по улучшению пособия принимаются по адресу: 224017, г. Брест, ул. Московская, 267, БрГТУ.

Приложение 5. Справочные материалы

Таблица 1. Значение коэффициента Пуассона

Вид грунта	ν
Крупнообломочный	0,27
Песок, супесь	0,30
Суглинок	0,35
Глина	0,41

Таблица 2. Значение коэффициента относительной сжимаемости m_v

Вид грунта	Значение коэффициента m_v при коэффициенте пористости e , равном						
	0,45	0,55	0,65	0,75	0,85	0,95	1,05
Супесь	4	4	3,5	3	—	—	—
Суглинки	4	4	4,5	4	3	2,5	2
Глины	—	—	6	6	5,5	5	4,5

Таблица 3. Условное расчетное сопротивление R_0 песчаных грунтов

Пески	Значение R_0 , кПа, в зависимости от прочности песков	
	Прочные при коэффициенте пористости e от 0,45 до 0,54	Средней прочности при коэффициенте пористости e от 0,55 до 0,75
Крупные	600	500
Средние	500	400
Мелкие:		
маловлажные и влажные	400	300
водонасыщенные	300	250
Пылеватые:		
маловлажные	300	250
влажные	250	150
водонасыщенные	200	100

Примечание. В таблице значения R_0 даны для меньшего значения e . Для большего значения e приведенные в таблице значения R_0 для прочных грунтов следует умножать на 0,9, а для грунтов средней прочности — на 0,8; для промежуточных значений e значение R_0 допускается определять линейной интерполяцией.

Таблица 4. Условное расчетное сопротивление R_0 глинистых непросадочных грунтов (кроме моренных и лёссовых)

Глинистые грунты	Коэффициент пористости e	Значение R_0 , кПа, при показателе I_L , равном		
		0	0,5	0,75
Супеси	0,5	400	300	250
	0,7	300	250	200
Суглинки	0,5	400	350	300
	0,7	350	300	200
	0,85	250	200	150
Глины	0,5	600	500	400
	0,6	500	400	300
	0,8	300	250	200
	1,0	250	200	150

Таблица 5. Нормативные значения c_n , φ_n , E для песчаных грунтов четвертичных отложений

Наименование грунтов	Обозначение характеристик	Значения характеристик при e			
		0,45	0,55	0,65	0,75
Пески гравелистые и крупные	c_n	2	1	—	—
	φ_n	43°	40°	38°	35°
	E	50	40	30	15
Пески средней крупности	c_n	3	2	1	—
	φ_n	40°	38°	35°	33°
	E	45	35	25	13
Пески мелкие	c_n	6	4	2	—
	φ_n	38°	36°	32°	28°
	E	40	30	20	12
Пески пылеватые	c_n	8	6	4	2
	φ_n	36°	34°	30°	26°
	E	35	25	18	11

Таблица 6. Нормативные значения c_n , φ_n , E для глинистых (не моренных и не лёссовых) грунтов четвертичных отложений

Наименование грунтов	Пределы I_L	Обозначения характеристик	Значения характеристик при e						
			0,45	0,55	0,65	0,75	0,85	0,95	1,05
Супеси	$0 \leq I_L \leq 0,25$	c_n	21	17	15	13	—	—	—
		φ_n	30°	29°	27°	24°	—	—	—
		E	32	24	16	10	7	—	—
	$0,25 < I_L \leq 0,75$	c_n	19	15	13	11	9	—	—
		φ_n	28°	26°	24°	21°	18°	—	—
		E	31	23	15	9	6	—	—
Суглинки	$0 < I_L \leq 0,25$	c_n	47	37	31	25	22	19	—
		φ_n	26°	25°	24°	23°	22°	20°	—
		E	34	27	22	17	14	11	—
	$0,25 < I_L \leq 0,5$	c_n	39	34	28	23	18	15	—
		φ_n	24°	23°	22°	21°	19°	17°	—
		E	32	25	19	14	11	8	—
	$0,5 < I_L \leq 0,75$	c_n	—	—	25	20	16	14	12
		φ_n	—	—	19°	18°	16°	14°	12°
		E	—	—	17	12	8	6	5
Глины	$0 < I_L \leq 0,25$	c_n	—	81	68	54	47	41	36
		φ_n	—	21°	20°	19°	18°	16°	14°
		E	—	28	24	21	18	15	12
	$0,25 < I_L \leq 0,5$	c_n	—	—	57	50	43	37	32
		φ_n	—	—	18°	17°	16°	14°	11°

Таблица 7. Скальные грунты по степени выветрелости

Скальные грунты	Характеристика залегания грунтов и степень выветрелости k_{wr}
Невыветрелые (монолитные)	Сплошной массив, $k_{wr} = 1$
Слабовыветрелые (трещиноватые)	Несмещенные отдельные (глыбы) $1 > k_{wr} \geq 0,9$
Выветрелые	Скопления кусков, переходящие в трещиноватую скалу, $0,9 > k_{wr} \geq 0,8$
Сильновыветрелые (рухляки)	Во всем массиве в виде отдельных кусков $k_{wr} < 0,8$

Таблица 8. Классификация грунтов с жесткими структурными связями (класс скальных грунтов)

Группа	Подгруппа	Тип	Вид	Разновидность
Матчатические	Интрузивные	Гранит, диорит, сиенит, монзонит, габбро, диабаз, перидотит, вебстерит, горнблендит и др.	<i>По структуре:</i> мелко-, средне-, крупнозернистый, порфировый и др.	<i>По пределу прочности при одноосном сжатии в водонасыщенном состоянии R_c, МПа:</i> скальные грунты очень прочный $R_c > 120$ прочный $50 < R_c \leq 120$ средней прочности $15 < R_c \leq 50$ малопрочный $5 \leq R_c \leq 15$
	Эффузивные	Липарит, порфир, порфирит, базальт, туф, туфобрекчия и др.	<i>По структуре:</i> стекловатый, неполнокристаллический, порфировый и др.	полускальные грунты пониженной прочности $3 \leq R_c < 5$ низкой прочности $1 \leq R_c < 3$ весьма низкой прочности $R_c < 1$
Метаморфические	Регионально-метаморфизованные	Гнейс, кварцит, сланец и др.	<i>По структуре</i> — так же, как вид магматических грунтов	<i>По степени засоленности D_{sal}, %:</i> % по- лускальный грунт: незасоленный $D_{sal} < 2$ засоленный $D_{sal} \geq 2$
	Динамометаморфизованные	Порфиرويد, порфирит, катаклазит, тектоническая брекчия и др.	<i>По текстуре:</i> гнейсовый, сланцеватый, слоисто-сланцеватый, тонкослоистый, полосчатый, массивный и др.	<i>По коэффициенту размягчаемости в воде C_{soft}:</i> неразмягчаемый $C_{soft} \geq 0,75$ размягчаемый $C_{soft} < 0,75$
Осадочные цементированные	Обломочные	Конгломерат, брекчия, гравелит, тиллит	<i>По составу цемента:</i> кремнистый, железистый, карбонатный, глинистый и др.	<i>По степени растворимости в воде I_{dis} %/л, осадочный цементированный грунт:</i> нерастворимый $I_{dis} < 0,01$ труднорастворимый $0,01 \leq I_{dis} \leq 1$ среднерастворимый $1 < I_{dis} \leq 10$ легкорастворимый $I_{dis} > 10$
		Песчаник, туффит		<i>По температуре t, °C:</i> немерзлые (талые) $t \geq 0$ мерзлые $t < 0$
		Алевролит, аргиллит		
По петрографическому составу				

Осадочные цементированные	Биохимические	Кремнистые	По петрографическому составу	Спонголит, опока, диатомит	По структуре: пелитоморфный, мелко-, средне- и крупнокристаллический По составу примесей: окремненный, ожелезненный, глинистый и др.	По предельной прочности при одноосном сжатии в водонасыщенном состоянии (после закрепления) R_c — так же, как разнородности магматического, метаморфического и осадочного цементированного грунта
		Карбонатные		Доломит, мергель, мел		
Искусственные	Химические	Сульфатные	Магматические, метаморфические и осадочные цементированные грунты (трещиноватые)	Ангидрит, гипс	По способу преобразования	Закрепленный цементными растворами, жидким силикатом, глинистосиликатными растворами, расплавленными битумами и т.п.
		Галоидные		Галит, сильвин, сильвинит, карналлит		
			Крупнообломочные несцементированные грунты	Песчаные несцементированные грунты		Закрепленный цементом, известью, жидким силикатом, карбомидными смолами, способом замораживания и т.п.

Таблица 9. Значение коэффициента k_m

Ширина фундамента, м	k_m при среднем значении E , МПа	
	<10	≥ 10
$b > 10$	1	1
$10 \leq b \leq 15$	1	1,35
$b > 15$	1	1,5

Таблица 10. Значение коэффициента постели k_s

Вид грунта	k_s , кН/м ³
Текучепластичные глины и суглинки	1000
Мягкопластичные суглинки, супеси и глины, пылеватые и рыхлые пески	2000
Тугопластичные суглинки, супеси и глины, пески мелкие и средние	4000
Твердые суглинки, супеси и глины, крупные пески	6000
Пески гравелистые, грунты крупнообломочные	10 000

Таблица 11. Определение вида грунта в полевых условиях (визуально)

Грунт	Ощущения при растирании в руке	Вид в лупу	Состояние в сухом виде
Глинистый	Песчаные частицы не чувствуются, комочки раздавливаются с большим трудом	Песчинок не видно	Очень твердый в кусках
Суглинистый	Чувствуются песчаные частицы, отдельные комочки раздавливаются легко	Ясно видно присутствие песчинок на фоне тонкого грунта	Комья и куски менее твердые, при ударе молотком рассыпаются в мелочь
Суглинистый пылеватый	Песок не чувствуется, комочки раздавливаются сравнительно легко	Песка очень мало, видны тонкие пылеватые частицы	Комья и куски менее твердые, при ударе молотком рассыпаются в мелочь
Пылеватый	Производит впечатление сухой муки	Песка очень мало, пылеватых частиц очень много	Комья очень непрочные и легко рассыпаются
Супесчаный	Песчаные частицы преобладают, комочки раздавливаются без труда	Песчаные частицы преобладают над глинистыми и пылеватыми	Комья легко рассыпаются от давления руки
Песчаный	Глинистые частицы не чувствуются, рыхлая, нецементированная масса	Видны только песчаные частицы	Цементация отсутствует, сыпучий грунт

Таблица 12. Основные физические причины различных видов деформаций грунта

Виды деформаций	Физические причины деформаций
<i>Упругие деформации</i>	
Искажения формы	Действие молекулярных сил упругости, развивающихся при искажении структурной решетки твердых частиц и цементирующего коллоидного вещества
Изменения объема	Действие молекулярных сил упругости замкнутых пузырьков воздуха, тонких пленок воды и твердых частиц
<i>Остаточные деформации</i>	
Уплотнения	Разрушение скелета грунта и отдельных его частиц в точках контактов, взаимный сдвиг частиц, выдавливание поровой воды, обуславливающие уменьшение пористости (компрессию грунта)
Пластические	Развитие местных сдвигов в областях предельного напряженного состояния
Просадки	Резкое нарушение природной структуры грунта при изменении условий его существования (замачивание лёссов, оттаивание мерзлых грунтов и др.)
Набухания	Проявление расклинивающего эффекта в результате действия электромолекулярных сил и выделение из поровой воды растворенного в ней газа при понижении давления

Таблица 13. Расчетные модели грунта в соответствии с фазами напряженно-деформированного состояния

Уровень напряжений P	Расчетная модель	Характеристики модели	Методы анализа
$P < P_{стр}$	Упругая среда	Модуль упругости	Теория упругости
$P_{стр} \leq P \leq^{нач} P_{кр}$	Линейно деформируемая неупругая среда	Модуль деформации при нагрузке и модуль упругости при разгрузке	Теория упругости анизотропной среды
$нач P_{кр} \leq P \leq^{пред} P_{кр}$	Упругопластическая среда	Функциональная зависимость деформации от напряжений	Теория пластичности
$P \geq^{пред} P_{кр}$	Дилатирующая среда	Модули дилатансии (дилатации и контракции)	Дилатансионная теория

Таблица 14. Степень сжимаемости грунта

Степень сжимаемости грунта	m_0 , МПа ⁻¹	E_0 , МПа
Несжимаемый	<0,01	> 100
Малосжимаемый	0,01–0,05	30–1000
Среднесжимаемый	0,05–0,10	15–30
Повышенной сжимаемости	0,1– 1,0	5–15
Сильносжимаемый	> 1	< 5

Таблица 15. Основные физические характеристики грунта

Наименование	Обозначение	Размерность	Формула для вычисления
Удельный вес грунта	γ	кН/м ³	$\gamma = (G / V) \cdot g$
Удельный вес частиц грунта	γ_s	кН/м ³	$\gamma_s = (G_s / V_s) \cdot g$
Влажность грунта	w	Безразмерна	$w = (G - G_s) / G_s = G_w / G_s$
Влажность на границе пластичности (раскатывания)	w_p	Безразмерна	$w_p = G_{w,p} / G_s$
Влажность на границе текучести	w_L	Безразмерна	$w_L = G_{w,L} / G_s$

Таблица 16. Производные физические характеристики грунта

Наименование	Обозначение	Размерность	Формула для вычисления
Удельный вес сухого грунта	γ_d	кН/м ³	$\gamma_d = \gamma / (1 + w)$
Коэффициент пористости	e	Безразмерна	$e = V_n / V_s = (\gamma_s - \gamma_d) / \gamma_d = (\gamma_s / \gamma_d) - 1$
Пористость	n	Безразмерна	$n = V_n / V = (\gamma_s - \gamma_d) / \gamma_s = 1 - (\gamma_d / \gamma_s)$
Удельный вес грунта с учетом взвешивающего действия воды	$\gamma_0^{\text{взв}}$	кН/м ³	$\gamma_0^{\text{взв}} = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{1 + e}$

Таблица 17. Классификационные физические характеристики грунта

Наименование	Обозначение	Размерность	Формула для вычисления
1	2	3	4
Число пластичности	J_p	Безразмерна	$J_p = w_L - w_p$
Показатель текучести	J_L	Безразмерна	$J_L = \frac{w - w_p}{w_L - w_p}$
Коэффициент водонасыщения (степень влажности)	S_r	Безразмерна	$S_r = \frac{V_w}{V_n} = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \frac{w}{e}$
Полная влагоемкость	w_{sat}	Безразмерна	$w_{\text{sat}} = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} e$
Коэффициент относительной плотности (индекс плотности)	D	Безразмерна	$D = \frac{e_{\text{max}} - e}{e_{\text{max}} - e_{\text{min}}},$ <p>e_{max} – коэффициент пористости грунта в максимально рыхлом его состоянии; e_{min} – коэффициент пористости грунтов в минимально рыхлом его состоянии</p>

1	2	3	4
Относительная деформация просадочности	ε_{sl}	Безразмерна	$\varepsilon_{sl} = \frac{h_{n,p} - h_{sat,p}}{h_{n,g}},$ <p>где $h_{n,p}$ и $h_{sat,p}$ – высота образца соответственно природной влажности и после его полного водонасыщения ($w = w_{sat}$) при давлении p, равном вертикальному напряжению на рассматриваемой глубине от внешней нагрузки и собственного веса грунта $p = \sigma_{zp} + \sigma_{zg}$; $h_{n,g}$ – высота того же образца природной влажности при $p = \sigma_{zg}$</p>

Таблица 18. Коэффициент, зависящий от степени уплотнения грунта обратной засыпки

ρ'_d / ρ_d	1	0,98	0,96	0,94	0,92	0,9
β	1	0,88	0,76	0,64	0,5	0,4

Таблица 19. Значения коэффициента эквивалентного слоя $A\omega$ (по Н.А. Цыговичу)

$\alpha = l/b$	Пески			Суглинки пластичные				Глины сильно-пластичные							
	Твердые глины и суглинки			Супеси			Глины пластичные								
	$\mu_0 = 0,20$			$\mu_0 = 0,25$		$\mu_0 = 0,30$	$\mu_0 = 0,35$		$\mu_0 = 0,40$						
1	1,20	1,01	0,94	1,26	1,07	0,99	1,37	1,17	1,08	1,58	1,34	1,24	2,02	1,71	1,58
1,5	1,45	1,23	1,15	1,53	1,30	1,21	1,66	1,40	1,32	1,91	1,62	1,52	2,44	2,07	1,94
2	1,63	1,39	1,30	1,72	1,47	1,37	1,88	1,60	1,49	2,16	1,83	1,72	2,76	2,34	2,20
3	1,90	1,63	1,54	2,01	1,73	1,62	2,18	1,89	1,76	2,51	2,15	2,01	3,21	2,75	2,59
4	2,09	1,81	1,72	2,21	1,92	1,81	2,41	2,09	1,97	2,77	2,39	2,26	3,53	3,06	2,90
5	2,24	1,95	1,84	2,37	2,02	1,94	2,58	2,25	2,11	2,96	2,57	2,42	3,79	3,29	3,10
6	2,37	2,09	–	2,50	2,21	–	2,72	2,41	–	3,14	2,76	–	4,00	3,53	–
7	2,47	2,18	–	2,61	2,31	–	2,84	2,51	–	3,26	2,87	–	4,18	3,67	–
8	2,56	2,26	–	2,70	2,40	–	2,94	2,61	–	3,38	2,98	–	4,32	3,82	–
9	2,64	2,34	–	2,79	2,47	–	3,03	2,69	–	3,49	3,08	–	4,46	3,92	–
10	2,71	2,40	2,26	2,86	2,54	2,38	3,12	2,77	2,60	3,58	3,17	2,98	4,58	4,05	3,82
Более 10	$A\omega_0$	$A\omega_m$	$A\omega_c$	$A\omega_0$	$A\omega_m$	$A\omega_c$	$A\omega_0$	$A\omega_m$	$A\omega_c$	$A\omega_0$	$A\omega_m$	$A\omega_c$	$A\omega_0$	$A\omega_m$	$A\omega_c$

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- Баркан, Д.Д.* Виброметод в строительстве / Д.Д. Баркан. М., 1959.
- Березенцев, В.Г.* Расчет оснований сооружений / В.Г. Березенцев. Л., 1970.
- Вялов, С.С.* Реологические основы механики грунтов / С.С. Вялов. М., 1978.
- Гольдштейн, М.Н.* Механические свойства грунтов / М.Н. Гольдштейн. М., 1973.
- Герсеванов, Н.М.* Собрание сочинений / Н.М. Герсеванов. М., 1958. Т. I, II.
- Далматов, Б.И.* Механика грунтов, основания и фундаменты / Б.И. Далматов. Л., 1988.
- Зарецкий, Ю.К.* Теория консолидации грунтов / Ю.К. Зарецкий. М., 1967.
- Мальшев, М.В.* Механика грунтов, основания и фундаменты (в вопросах и ответах) / М.В. Мальшев, Г.Г. Болдырев. М., 2004.
- Механика грунтов, основания и фундаменты: в 2 ч. / П.С. Пойта [и др.]. Брест, 2010. Ч. I.
- Механика грунтов, основания и фундаменты / С.Б. Ухов [и др.]. М., 1994.
- Никитенко, М.И.* Инженерно-геологические изыскания в строительстве / М.И. Никитенко. Минск, 2005.
- Пойта, П.С.* Строительные свойства искусственных оснований / П.С. Пойта. Брест, 2004.
- Пьянков, С.А.* Механика грунтов / С.А. Пьянков. Ульяновск, 2018.
- Соколовский, В.В.* Статика сыпучей среды / В.В. Соколовский. М., 1960.
- Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения / под общ. ред. В.А. Ильичева и Р.А. Манчугиева. М., 2014.
- ТКП 45-5.01-254-2012(02250). Основания и фундаменты зданий и сооружений. Основные положения. Минск, 2012.
- ТКП 45-5.01-67-2007(02250). Фундаменты плитные. Правила проектирования. Минск, 2008.
- Тейлор, Д.В.* Основы механики грунтов / под ред. Н.А. Цытовича; пер. с англ. М., 1960.
- Терцегги, К.* Теория механики грунтов / под ред. Н.А. Цытовича; пер. с англ. М., 1961.
- Цытович, Н.А.* Механика грунтов. Краткий курс / Н.А. Цытович. М., 1983.
- Шведовский, П.В.* Инженерная геология / П.В. Шведовский, В.Г. Фёдоров. Брест, 2007.

СОДЕРЖАНИЕ

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ	3
ПРЕДИСЛОВИЕ	6
ВВЕДЕНИЕ	8
1. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ, СОСТАВ И СОСТОЯНИЕ ГРУНТОВ	13
1.1. Строительная классификация грунтов	13
1.2. Состав грунтов	16
1.3. Вода в грунтах, ее виды и свойства	18
1.4. Газообразная составляющая грунта	20
1.5. Влияние состава грунта на физико-механические свойства	21
1.6. Структурные связи и строение грунтов	23
1.7. Структура и текстура грунтов	25
2. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И КЛАССИФИКАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ГРУНТОВ	26
2.1. Основные физические характеристики грунтов	27
2.2. Производные характеристики грунтов	29
2.3. Плотность сыпучих грунтов	32
2.4. Гранулометрический состав грунтов	33
2.5. Пластичность глинистых грунтов	35
2.6. Понятие об оптимальной плотности сухого грунта и оптимальной влажности грунта	36
3. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ МЕХАНИКИ ГРУНТОВ	37
3.1. Механические свойства грунтов	37
3.2. Сжимаемость грунтов	38
3.2.1. Физические представления	38
3.2.2. Компрессионная зависимость	39
3.2.3. Коэффициент относительной сжимаемости	41
3.2.4. Структурная прочность грунта	42
3.2.5. Закон уплотнения и линейная деформируемость грунта	44
3.2.6. Общий случай компрессионной зависимости	45
3.2.7. Определение модуля общей деформации грунта с помощью компрессионной кривой	47
3.3. Водопроницаемость грунтов	49
3.3.1. Закон ламинарной фильтрации	49
3.3.2. Понятие о начальном градиенте	50
3.3.3. Определение коэффициента фильтрации	51
3.3.4. Модель водонасыщенного грунта	52
3.3.5. Понятие об эффективном и нейтральном давлении	53
3.4. Сопротивление грунтов сдвигу. Закон Кулона	54

3.4.1. Соппротивление сдвигу сыпучих грунтов	55
3.4.2. Соппротивление сдвигу связных грунтов	56
3.4.3. Условия предельного равновесия сыпучих и связных грунтов	59
3.4.4. Испытание грунтов на сдвиг при простом и трехосном сжатии . . .	61
3.5. Структурно-фазовая деформируемость грунтов	66
3.6. Полевые методы определения характеристик деформируемости и прочности грунтов	68
3.7. Особенности свойств структурно-неустойчивых грунтов	76
4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ГРУНТОВОЙ ТОЛЩЕ	87
4.1. Напряжения от действия сосредоточенной силы (основная задача)	88
4.2. Напряжения от нескольких сосредоточенных сил	91
4.3. Определение сжимающих напряжений способом элементарного суммирования	91
4.4. Определение сжимающих напряжений по методу угловых точек	93
4.5. Влияние формы и площади загрузки	96
4.6. Распределение напряжений в случае плоской задачи	97
4.7. Распределение напряжений по подошве фундаментов (контактная задача)	101
4.8. Определение напряжений от собственного веса грунта	106
5. ТЕОРИЯ ПРЕДЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВ И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЕ	108
5.1. Понятие о предельном напряженном состоянии (равновесии) грунта . .	108
5.2. Уравнения предельного равновесия	108
5.3. Фазы напряженного состояния грунтов при возрастании нагрузки	109
5.4. Поверхности скольжения грунта	111
5.5. Начальная критическая нагрузка на грунт	112
5.6. Предельная нагрузка на грунт	115
5.7. Устойчивость грунтов в откосах и склонах	117
5.7.1. Основные понятия и причины нарушения устойчивости откосов. . .	117
5.7.2. Устойчивость откоса сыпучего грунта	118
5.7.3. Устойчивость вертикального откоса в предельно связных грунтах . .	119
5.7.4. Устойчивость откосов по теории предельного равновесия	120
5.8. Графоаналитические методы расчета устойчивости откосов (метод круглоцилиндрических поверхностей скольжения)	122
5.9. Устойчивость прислоненных откосов	124
5.10. Меры борьбы с оползнями	126
5.11. Определение давления грунта на подпорные стенки	126
5.11.1. Конструкции подпорных стен	126
5.11.2. Аналитический метод определения давления грунта на подпорную стенку	128
5.11.3. Определение давления грунта на подпорные стенки методом теории предельного равновесия	131
5.11.4. Графоаналитический метод определения давления грунта на подпорную стенку	132

5.11.5. Построение эпюр давления грунта при сложном очертании задней грани стенки и слоистом напластовании грунтов.	135
---	-----

6. ДЕФОРМАЦИИ ГРУНТОВ И ПРОГНОЗ ОСАДКИ ФУНДАМЕНТОВ . . . 136

6.1. Виды деформаций грунтов и их причины	136
6.2. Упругие деформации грунтов и методы их определения	137
6.2.1. Условия возникновения упругих деформаций	137
6.2.2. Метод общих упругих деформаций	138
6.2.3. Метод местных упругих деформаций.	142
6.2.4. Обобщенные методы определения деформаций	144
6.3. Прогноз осадок фундаментов.	145
6.3.1. Общие положения.	145
6.3.2. Осадка слоя грунта при сплошной нагрузке (основная задача) . . .	146
6.3.3. Метод послойного суммирования	148
6.3.4. Метод линейно деформируемого слоя конечной толщины.	152
6.3.5. Метод эквивалентного слоя грунта	155
6.3.6. Определение крена плитных фундаментов.	158
6.4. Прогноз изменения осадок во времени	160
6.4.1. Общие положения.	160
6.4.2. Основные допущения фильтрационной консолидации.	161
6.4.3. Одномерная задача консолидации грунтов (основной случай) . . .	164
6.4.4. Другие случаи одномерной задачи консолидации грунтов	166
6.4.5. Учет структурной прочности скелета грунта и сжимаемости газосодержащей поровой воды	172
6.4.6. Учет начального гидравлического градиента напора	173
6.4.7. Вторичная консолидация грунтов	175
6.4.8. Плоская и пространственная задачи теории фильтрационной консолидации грунтов	177

7. РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ГРУНТАХ И ИХ ЗНАЧЕНИЕ 186

7.1. Реологические явления в грунтах	186
7.2. Физические причины протекания реологических процессов в грунтах . .	188
7.3. Длительная прочность грунта и релаксация напряжений	190
7.4. Деформация ползучести грунта при уплотнении	191
7.5. Определение осадки во времени квазиоднофазных, двухфазных и многофазных грунтов	195
7.6. Инженерный метод прогноза суммарных осадок уплотнения и ползучести оснований фундаментов сооружений	196
7.7. Вопросы нелинейной механики грунтов	198

8. ДИНАМИКА ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ 200

8.1. Общие сведения о динамических воздействиях на грунт	200
8.2. Влияние отдельных факторов на свойства грунта при динамических воздействиях.	203

8.3. Модели основания при динамических воздействиях.	207
8.4. Изменение свойств грунтов при динамических воздействиях	212
8.5. Учет динамических свойств грунтов при расчете фундаментов	216
8.6. Учет динамических свойств грунтов при расчете фундаментов на колебание.	219
8.7. Определение упругих и демпфирующих характеристик естественного основания	221
8.8. Прочностные характеристики грунтов при динамических нагрузках.	222
ГЛОССАРИЙ.	224
ПРИЛОЖЕНИЯ	239
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	276

Учебное издание

Пойга Петр Степанович
Шведовский Петр Владимирович
Клебанюк Дмитрий Николаевич

МЕХАНИКА ГРУНТОВ

Учебное пособие

Редактор *Е.В. Савицкая*
Художественный редактор *Т.В. Шабунько*
Технический редактор *Н.А. Лебедевич*
Компьютерная верстка *Н.В. Шабуня*
Корректор *Т.В. Кульнис*

Подписано в печать 06.11.2019. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 16,28. Уч.-изд. л. 16,05. Тираж 200 экз. Заказ 1814.

Республиканское унитарное предприятие «Издательство “Вышэйшая школа”». Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/3 от 08.07.2013. Пр. Победителей, 11, 220004, Минск.
e-mail: market@vshph.com <http://vshph.com>

Открытое акционерное общество «Полиграфкомбинат им. Я. Коласа». Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 2/3 от 10.09.2018. Ул. Корженевского, 20, 220024, Минск. Отпечатано: Филиал № 1 ОАО «Полиграфкомбинат им. Я. Коласа». Ул. Советская, 80, 225409, Барановичи.