

**ОСОБЕННОСТИ НЕЛИНЕЙНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ
ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ ПРИ НАГРУЖЕНИИ ИХ
ЖЕСТКИМИ ШТАМПАМИ**

Тугаенко Ю.Ф., Марченко М.В., Ткалич А.П., Мосичева И.И.

*Одесская государственная академия строительства и архитектуры,
г. Одесса*

Оценка деформаций в грунтах оснований фундаментов по действующим нормам и стандартам, принятых для упруго-деформируемой грунтовой среды при давлениях, не превышающих предела пропорциональности, выполняется по критериям ряда условных допущений: грунтовая среда считается упругим, изотропным линейно-деформируемым полупространством; расчетные значения дополнительных напряжений по глубине не зависят от вида грунтов, их состава и состояния; глубина сжимаемой толщи принимается условной по отношению напряжений от собственного веса грунта и дополнительной нагрузки, и не зависит от показателей деформативных свойств грунтов; модуль деформации определяется по результатам полевых испытаний в пределах линейного участка зависимости осадки от нагрузки [1; 2; 4]. При этом деформативные свойства грунтов оцениваются только величиной осадки, размером штампа и давлением, без учета параметров, характеризующих процессы их деформирования.

В настоящее время еще не разработаны нормативные документы и стандарты по оценке деформаций, возникающих при давлениях за пределом пропорциональности. Накопленные результаты экспериментальных исследований в геомеханике позволяют изменить представления о процессах трансформирования напряженно-деформированного состояния грунтов основания под влиянием внешней нагрузки. Появились новые показатели для оценки деформативных свойств грунтов при их необратимом деформировании.

Структурная прочность, коэффициенты бокового давления и расширения являются параметрами, которые необходимо учитывать при совершенствовании нелинейных методов расчета оснований для давлений, превышающих предел линейной зависимости осадки от нагрузки. Экспериментальные исследования указанных параметров выполнены в полевых условиях. Структурная прочность как начальный порог

деформирования грунтовых оснований изучалась на однородном, искусственно приготовленном массиве.

Методика исследований. Для создания грунтовой массы в котловане пройден шурф размерами в плане $1,2 \times 1,2$ м, глубиной 1 м. Вынутый грунт размельчался, перемешивался с водой, а полученная пульпа через сито сливалась в шурф. Искусственная масса в заполненном шурфе защищалась от влияния атмосферных и механических воздействий. Плотность приготовленного грунта составила в среднем $1,54 \text{ г/см}^3$ (природного – $1,47 \text{ г/см}^3$). Влажность в период испытаний колебалась в пределах $0,26 \dots 0,24$. Исследования проведены через 3; 10; 23 и 33 месяца (опыты 1; 2; 3; 4) после приготовления искусственного массива с помощью круглого штампа площадью 300 см^2 . Измерения послойных перемещений выполнены с помощью грунтовых магнитных марок, установленных вдоль его вертикальной оси с интервалом по глубине 5 см [10]. Нагрузка на штамп, прикладывалась укладкой тарированного груза массой 20 кг.

Испытания проведены по технологии циклически возрастающей нагрузки, при которой каждая ступень представляла самостоятельный цикл: приложение нагрузки, выдерживание ее до условной стабилизации и разгрузка. При этом измерялись: осадка штампа, перемещения глубинных марок (s) и их остаточные составляющие (s_o), по которым определялись значения упругой части ($s_y = s - s_o$). После окончания испытания и демонтажа оборудования определялись значения плотности скелета грунта и влажность под штампом и за пределами зоны деформаций [5; 6; 8].

Примененная методика исследований позволила определить процессы деформирования грунтов в пределах каждой фазы.

В пределах первой фазы наблюдаются, преимущественно, упругие деформации, исчезающие после снятия нагрузки. Зафиксированные незначительные остаточные деформации можно объяснить смятием контактных неровностей в плоскости примыкания подошвы штампа к поверхности основания. Первая фаза заканчивается при давлениях, равных значению структурной прочности.

Вторая фаза начинается при давлениях, превышающих структурную прочность. Она характеризуется разрушением структурных связей между частицами грунта, сопровождающимся снижением его пористости. Уплотнение происходит в пределах сжимаемого объема, ограниченного подошвой штампа, боковой поверхностью по его периметру и нижней границей зоны деформации. Последняя находится на глубине, где сумма напряжений от внешней нагрузки и дополнительного давления равна структурной прочности. При повышении структурной проч-

ности, при прочих равных условиях, уменьшается глубина зоны деформации. На рис.1 приведены графики зависимости остаточных значений осадки (а) и глубины зоны деформации (б) от давления.

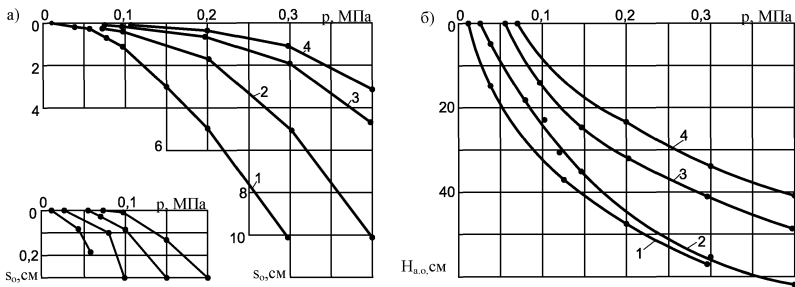


Рис. 1. Графики нарастания остаточных осадок s_0 (а) и глубины зоны остаточных деформаций $H_{a,0}$ (б) от давления p (цифрами показаны номера опытов)

Поперечные деформации, возникающие под влиянием бокового давления, в пределах этой фазы отсутствуют. Боковое давление уравновешивается структурной прочностью грунта, окружающего сжимаемый объем. Предельным для второй фазы, является давление p_q , при котором боковое давление q равно структурной прочности окружающего грунта. Во второй фазе, при небольших значениях остаточных осадок, в интервале давлений от p_{str} до p_q происходит резкое увеличение глубины зоны остаточных деформаций. Процесс уплотнения нарастает по глубине без поперечного расширения (рис. 2, табл. 1).

Результаты исследований. Учитывая однородность искусственно приготовленной грунтовой массы, принято допущение о равенстве структурной прочности в вертикальном и горизонтальном направлениях. По результатам измерений осадки штампа и перемещений грунтовых магнитных марок для каждой ступени нагрузки строятся эпюры полных (1) и остаточных (2) деформаций по глубине (рис. 3, а).

Для каждого сжимающегося слоя, находящегося между смежными марками, определяется относительное значение остаточных деформаций по зависимости $\epsilon_0 = \Delta s_0 / \Delta h$ и по их значениям строится эпюра относительных деформаций по глубине (рис. 3, б).

Остаточные деформации нарастают при давлениях, превышающих структурную прочность в пределах II и III фаз напряженно-деформированного состояния грунтов основания [6; 7]. В пределах II фазы, в интервале давлений $p_{str} \geq p_q$ деформации нарастают под площа-

дью штампа без поперечного расширения сжимаемого объема грунта (см. рис. 3, е).

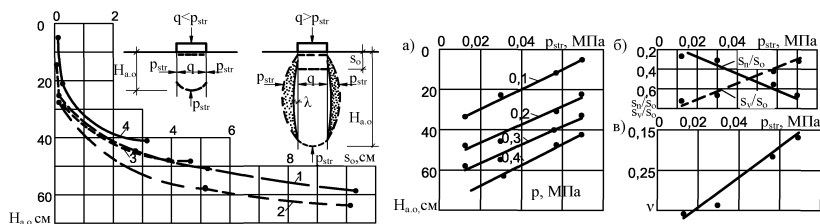


Рис. 2. Влияние структурной прочности на параметры напряженно-деформируемого состояния грунтов в основании штампа:

- а) – зависимость глубины зоны остаточных деформаций $H_{a,0}$ от остаточной составляющей осадки s_0 ; б) – зависимость глубины зоны остаточных деформаций $H_{a,0}$ от p_{str} ; в) – влияние p_{str} на соотношения осадок, вызванных уплотнением и поперечным расширением; г) – зависимость коэффициента поперечного расширения от p_{str} .

Таблица 1

Параметры зоны остаточных деформаций

№ опыта	p , МПа	p_{str} , МПа	p_q , МПа	ε_n	$H_{a,0}$ см	s_0 , см	S_n , см	S_v , см	ν
1	0,3	0,012	0,03	0,05	59	10,49	2,95	7,54	0,36
2	0,4	0,03	0,075	0,05	63	10,13	3,15	6,98	0,34
3	0,4	0,057	0,142	0,05	48	4,17	2,4	1,77	0,21
4	0,4	0,07	0,175	0,05	41	3,08	2,05	1,03	0,17

Примечания: 1) $\varepsilon_n = 1 - \rho_d / \rho_{d,com}$; 2) $\rho_{d,com}$ – среднее значение (полу-сумма) плотности скелета под подошвой штампа и на нижней границе зоны остаточных деформаций. Его значение для всех опытов равно $1,62 \pm 0,005$.

Давление p по подошве штампа является предельным, при котором боковое давление q равно структурной прочности грунта, окружающего сжимаемый объем:

$$q = \xi p, \quad (1)$$

где ξ – коэффициент бокового давления.

В этом интервале давлений эпюра послойных относительных деформаций имеет прямолинейный характер (рис. 3, б – линия 3).

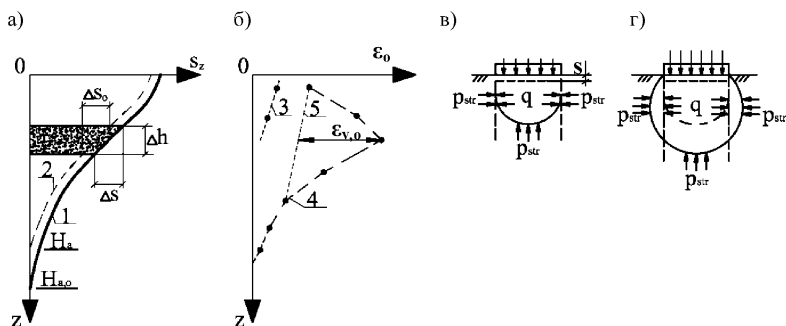


Рис.3. Эпюры: а) – полных (1) и остаточных (2) деформаций по глубине основания; б) – относительных значений остаточных деформаций: (3) – при $q \leq p_{str}$; (4) – при $q > p_{str}$; в) и г) – схемы деформирования грунта при: $q \leq p_{str}$ и $q > p_{str}$, соответственно

III фаза характеризуется уплотнением сжимаемого объема и его поперечным расширением. Происходит искривление эпюры относительных послонных деформаций по глубине. Поперечное расширение наблюдается не по всей глубине зоны остаточных деформаций. Оно не зафиксировано в непосредственной близости от подошвы штампа и нижней части зоны деформации.

Графики относительных деформаций отражают их вертикальное значение вдоль оси z . Если относительные деформации уплотнения нарастают в вертикальном направлении, то поперечное расширение является следствием горизонтальных перемещений, возникающих в результате изменения объема уплотняемого грунта – пластических деформаций. В данной работе пластические деформации определены в направлении оси z по величине осадки, возникшей в результате поперечного расширения.

На графике полных послонных значений относительных деформаций по глубине проводится линия, соединяющая верхнее значение у подошвы штампа с нижним, линейным участком эпюры (на рис. 3, б – линия 5), которая представляет эпюру относительных деформаций уплотнения. Для всех ступеней нагрузки определяется максимальное значение относительных деформаций поперечного расширения $\epsilon_{v.o}$. По результатам определений для каждого опыта строится зависимость $\epsilon_{v.o} = f(p)$.

Ее пересечение с осью p , определяет предельную величину давления, при которой поперечная составляющая вертикального давления q

равна структурной прочности. В этом случае коэффициент бокового давления можно определить по зависимости:

$$\zeta = \frac{P_{str}}{P_q}, \text{ при } q = P_{str} \quad (2)$$

Анализ обработки опытных данных. Ниже рассмотрены результаты четырех исследований, проведенных с разными интервалами времени, после изготовления грунтовой среды (объема) с нарушенной структурой.

На рис. 4 приведены эпюры относительных деформаций по глубине в опыте №2 для четырех ступеней нагрузки.

В табл. 2 приведены результаты определений для четырех опытов.

Таблица 2

Координаты точек зависимостей $\varepsilon_{v,o} = f(p)$

№ опыта	Максимальные значения зависимостей $\varepsilon_{v,o}$ при p , МПа								
	0,08	0,10	0,12	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
1	0,018	0,034	0,041	0,073	0,140	0,23	0,27	—	—
2	—	0,008	—	0,029	0,052	0,102	0,156	0,24	0,29
3	—	—	—	0,06	0,017	0,031	0,05	0,097	0,147
4	—	—	—	—	0,009	0,022	0,029	0,062	0,116

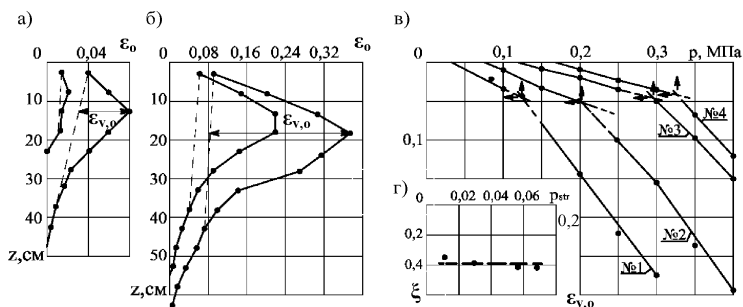


Рис. 4. Графики зависимостей: а) и б) – относительных деформаций по глубине при давлениях 0,1; 0,2; 0,3 и 0,4 МПа в опыте №2; в) – относительных деформаций $\varepsilon_{v,o}$ от давления по подошве штампа; г) – коэффициента бокового давления от величины структурной прочности.

По полученным координатам построены графики зависимости относительных деформаций поперечного расширения $\varepsilon_{v,o}$ от давления по

подошве фундамента, приведенные на рис. 4, в. Их пересечение с осью p определяет величину давления, при котором боковое давление q равно структурной прочности, т.е. предельное давление по подошве фундамента, когда отсутствуют поперечные деформации.

По графикам определены максимальные значения $\varepsilon_{v.o}$ для каждой ступени нагрузки.

Для графиков зависимости $\varepsilon_{v.o} = f(p)$ характерно наличие точки перелома. На первой ветви, при равном приращении давления, увеличение относительной деформации меньше, чем на второй. Это можно объяснить изменением состояния грунта в процессе его деформирования.

В таблице 3 приведены результаты исследований деформативных свойств грунта.

Таблица 3

Результаты исследований деформативных свойств грунта

№ опыта	t , месяцев	Координаты точки перелома зависимостей $\varepsilon_{v.o} = f(p)$				Параметры деформативных свойств грунтов				
		p , МПа	$\varepsilon_{v.o}$	$s_{o,}$ мм	$H_{a,o}$ см	p_{sr} МПа	p_{φ} МПа	ζ	при p_a	
									$s_{o,}$ мм	$H_{a,o}$ см
1	3	0,13	0,046	20	38	0,012	0,035	0,34	0,9	15
2	10	0,215	0,056	18	46	0,03	0,08	0,38	1,1	19
3	23	0,29	0,043	14	40	0,057	0,135	0,42	2,9	21
4	33	0,33	0,068	16	36	0,070	0,171	0,41	2,0	20

В начальном состоянии плотность его скелета – $1,54 \text{ г/см}^3$ при степени влажности 0,87. В точке перегиба плотность скелета достигает $1,6...1,63 \text{ г/см}^3$ при степени влажности, близкой к единице. При этом снижается водопроницаемость. Все это может оказывать влияние на увеличение приращения боковых деформаций. Этот вопрос требует дополнительных исследований.

На рис. 4. приведены результаты полевых исследований по определению коэффициента бокового давления, которые показали близкое совпадение с данными его определения для лессовых грунтов, полученными в лабораторных условиях [3].

Вторая серия полевых работ по определению бокового давления, проведена в верхней толще слабых водонасыщенных грунтов Одесского региона. В статье анализируются результаты шести испытаний: трех – в верхней части водонасыщенной супеси, и трех – на «пятне» штампа

площадью 1 м^2 после его испытаний ступенями до давления по подошве $0,4\text{ МПа}$ на участке, уплотненном тяжелой трамбовкой (рис. 5) [5; 6; 7].

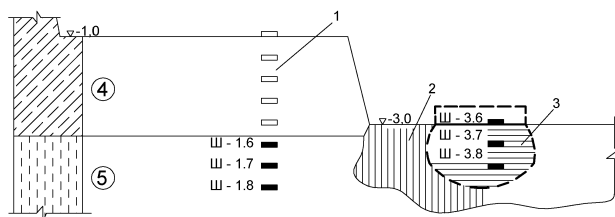


Рис. 5. Схема выполнения полевых испытаний опытных штампов:
1 – природный грунт; 2 – грунт, уплотненный тяжелой трамбовкой;
3 – то же, после статической нагрузки

Результаты исследований представлены на рисунках 6; 7; 8 и в таблицах 4; 5. Графики полных и остаточных значений осадки и глубины зоны деформаций от давления при близких величинах структурной прочности и разной плотности скелета грунта приведены на рис. 6, а и б. Пересечение их остаточных значений с осью давлений определяет величину структурной прочности, значение которой принимается средним.

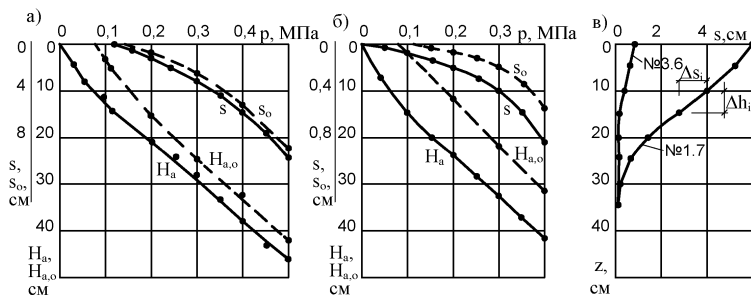


Рис. 6. Результаты испытаний грунтов: а) - зависимость осадки и глубины зоны полных и остаточных деформаций от давления в опыте № 1.7;
б) - то же в опыте № 3.6; в) - эпюры осадок при давлении $0,4\text{ МПа}$ по подошве штампа в опытах №№ 1.7 и 3.6

На рис. 6, в приведены эпюры полных осадок, для них определены величины относительных послойных деформаций для каждого интервала глубин из отношений $\epsilon_i = \Delta s_i / \Delta h_i$, графики изменения которых

даны на рис. 7, а и 7, б. На рис. 7, в видно влияние плотности скелета грунта на величины и распределение по глубине относительных по- слойных деформаций.

Приняв допущение, что при уплотнении грунта эпюра относитель- ных послонных деформаций линейна по глубине, можно выделить ее часть, формирующую поперечное расширение (рис. 7, в – $\epsilon_{v,max}$) [7].

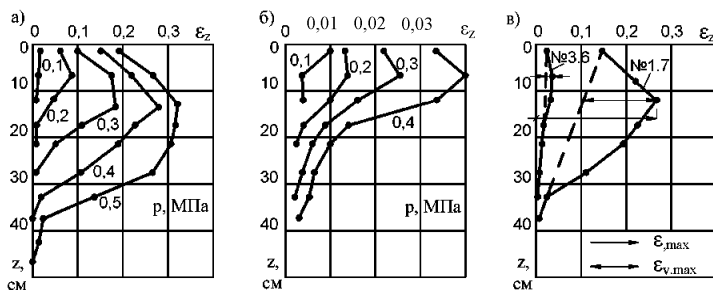


Рис. 7. Изменение эпюр относительных послонных деформаций по глубине с увеличением давления в опытах № 1.7 (а) и № 3.6 (б); в) – то же, при давлении 0,4 МПа по подошве штампа в опытах №№ 1.7 и 3.6.

На рис. 8 приведены графики зависимости их максимальных значе- ний от давления по подошве штампа. Пересечение этих графиков с осью давлений определяет величину нагрузки p_q , при которой отсут- ствуют остаточные поперечные деформации, вызываемые боковым давлением q , вследствие сопротивления окружающего массива проч- ностью структурных связей.

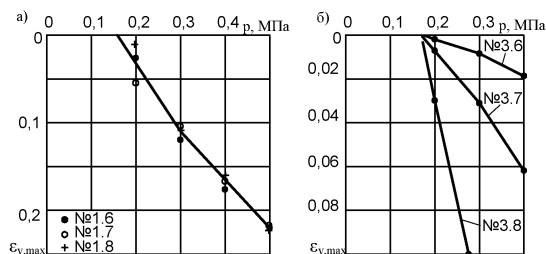


Рис. 8. Границы зависимости максимальных значений относительных деформаций от давления: а) – по результатам серии опытов на грунтах природной структуры (№№ 1.6 - 1.8); б) – на искусственно уплотненном грунте (№№ 3.6 - 3.8)

Следует отметить, что здесь нами условно принято равенство вели- чины структурной прочности в вертикальном и горизонтальном

направлениях. Для трех опытов на грунте природного сложения при близких значениях структурой прочности и плотности скелета, полученные зависимости практически совпадают. Среднее значение p_q для них равно 0,165МПа. Эти результаты приведены на рис. 8,а и в табл.4. Данные свидетельствуют, что с повышением плотности значения относительных деформаций снижаются.

Таблица 4.
Результаты исследований параметров НДС грунта природной структуры

№, № опытов	$\rho_d, \text{г/см}^3$	$\rho_{d, \text{ком}}, \text{г/см}^3$	$p_{\text{ср}}, \text{МПа}$	$\epsilon_{v, \text{max}}$ при p , МПа			p_q , МПа при ϵ_{max}		ξ , при ϵ_{max}	
				0,2	0,3	0,4	ϵ_v	$\epsilon_{v,0}$	ϵ_v	$\epsilon_{v,0}$
				1.6	1,4	1,71	0,1	0,03	0,12	0,18
1.7	1,41	1,70	0,09	0,06	0,11	0,177	0,15	0,14	0,47	0,50
1.8	1,39	1,70	0,08	0,01	0,115	0,16	0,18	0,17	0,50	0,53

Исследования, выполненные на грунте, подвергнутом ударному и статическому уплотнению, приведены на рис. 8, б и в табл. 5.

Таблица 5
Результаты исследований параметров НДС в грунтах, уплотненных тяжелой трамбовкой под «пятном» опытного фундамента

№, № опытов	$\rho_d, \text{г/см}^3$	$\rho_{d, \text{ком}}, \text{г/см}^3$	$p_{\text{ср}}, \text{МПа}$	$\epsilon_{v, \text{max}}$ при p , МПа			p_q , МПа при ϵ_{max}		ξ , при ϵ_{max}	
				0,2	0,3	0,4	ϵ_v	$\epsilon_{v,0}$	ϵ_v	$\epsilon_{v,0}$
				3.6	1,65	1,67	0,093	0,003	0,009	0,018
3.7	1,52	1,58	0,077	0,008	0,03	0,064	0,16	0,15	0,48	0,51
3.8	1,45	1,50	0,073	0,03	0,12	–	0,165	0,15	0,44	0,46

Пересечения полученных зависимостей с осью давлений определяет значение вертикального давления, при котором его горизонтальная составляющая уравнивается структурной прочностью окружающего массива грунта. Коэффициентом бокового давления является отношение бокового давления q и соответствующего ему давления по

подошве штампа p_q , тогда, с учетом отсутствия деформаций поперечного расширения, при $q=p_{str}$ коэффициент поперечного расширения принят по соотношению

$$\xi = p_{str} / p_q$$

где p_{str} – определяется по графикам зависимости остаточных значений осадки и глубины зоны деформации от давления (рис. 6,а и 6,б); p_q – определяется по графикам зависимости послонных относительных деформаций по глубине от давления.

Выводы

1. Под влиянием внешней нагрузки грунты ниже подошвы фундамента (штампа) деформируются. Деформации наблюдаются в пределах ограниченного сжимаемого объема: сверху – подошвой фундамента; по периметру – вертикальной поверхностью; по его контуру снизу – границей зоны деформации.

2. На графиках зависимости осадки от давления наблюдаются три фазы, характеризующие особенности деформирования грунтов:

2.1. В пределах первой фазы зависимость близка к линейной и отражает, преимущественно, упругие деформации. Осадка является следствием сжатия грунтов без разрушения структурных связей.

2.2. В пределах второй фазы, наряду с упругими, наблюдаются остаточные деформации вследствие уплотнения грунтов. Уплотнение происходит в пределах сжимаемого объема. Поперечному расширению препятствует структурная прочность окружающего грунта.

2.3. В пределах третьей фазы наблюдаются упругие деформации, деформации уплотнения и поперечного расширения. Поперечное расширение происходит при боковом давлении, превышающем структурную прочность окружающего грунта. Его следствием является выпор в стороны, за пределы поверхности, ограничивающей сжимаемый объем. Вокруг поверхности выпора возникает вторичная зона уплотнения.

Summary

The basic principles of methods for determination of interconnection of the structural strength, the coefficients of lateral pressure and lateral extension according the results of research in the field. Taking into account the proposed deformation parameters, the features of phases of soil resistance to external loads reviewed.

Литература

1. Герсеванов Н.М. Опыт применения теории упругости к определению допускаемых нагрузок на основе экспериментальных работ / Труды МИИТа. Выпуск 15. 1930.
2. Герсеванов Н.М., Польшин Д.Е. Теоретические основы механики грунтов и их практические применения. М.: Стройиздат, 1948. 248с.
3. Григорян А.А. О боковом давлении в лессовых грунтах. // Основания фундаменты и механика грунтов. 1960. №4. С. 20 – 21.
4. Цытович Н.А. Вопросы теории и практики строительства на слабых водонасыщенных грунтах. Таллин, 1965. С. 5 – 17.
5. Тугаенко Ю.Ф., Марченко М.В. Методика определения параметров деформаций глинистых грунтов // Инженерная геология. АН СССР. 1984. №1. С. 86 – 94.
6. Тугаенко Ю.Ф., Марченко М.В. Некоторые особенности развития деформаций в основаниях опытных фундаментов // Инженерная геология. АН СССР. 1988. №3. С. 46 – 54.
7. Тугаенко Ю.Ф. Трансформация напряженно-деформируемого состояния грунтов основания и ее учет при проектировании фундаментов. Одесса: Астропринт, 2011. 120 с.
8. Авторское свидетельство СССР 1065531. Глубинная марка. / Тугаенко Ю.Ф., Стоянова Т.И., Марченко В.М., Ткалич А.П. Заявл. 6.04.82; Оpubл. 07.01.1984. Бюл. №1.
9. Марченко М.В., Войтенко И.В., Мосичева И.И., Рабочая Т.В., Марченко А.М. Корреляционная связь показателей сжимаемости и коэффициента Пуассона в слабых грунтах // Проблемы механики грунтов и фундаментостроения в сложных грунтовых условиях / Тр. Международной науч.-техн. конф., Т. 3. – Уфа: БашНИИСтрой, 2006. С. 189-194.
10. Ji. Seusek. Field test of soil deformation beneath foundation // Труды V Дунайско-Европейской конференции по механике грунтов и фундаментостроению. - Т.3: ЧСССР. - Братислава, 1977. С. 275 – 287.