

УДК 624.131.38; 624.131.4

Ю.Ф. Тугаенко, докт. техн. наук, профессор

М.В. Марченко, канд. техн. наук, доцент

Л.А. Логинова, канд. техн. наук, инженер

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК УПЛОТНЕНИЯ В ОСНОВАНИЯХ ФУНДАМЕНТОВ ПО ИЗМЕНЕНИЮ ЕМКостей ФАЗ И ФАЗОВЫХ КОМПОНЕНТОВ

АННОТАЦИЯ: Изложена методика определения емкостей фаз и фазовых компонентов в лессовых грунтах одесского региона. По их изменению под влиянием нагрузки от опытных фундаментов в условиях локального замачивания определены характеристики уплотнения и поперечного расширения.

***Ключевые слова:** ЛЕССОВЫЕ ГРУНТЫ; ОПЫТНЫЙ ФУНДАМЕНТ; ЛОКАЛЬНОЕ ЗАМАЧИВАНИЕ; ФАЗОВЫЕ КОМПОНЕНТЫ; ХАРАКТЕРИСТИКИ УПЛОТНЕНИЯ.*

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными практическими заданиями. По действующим стандартам и нормам характеристики для расчета деформаций в грунтах определяются при давлениях не превышающих предела пропорциональности. Практически оцениваются упругие свойства грунтов.

В статье предложена методика определения остаточных деформаций по изменению емкостей фаз и фазовых компонентов.

Анализ последних исследований и публикаций. В последние десятилетия прошлого столетия (60 – 90-е г.г.) проведено значительное количество исследований деформаций в основаниях, как опытных штампов, так и фундаментов зданий и сооружений с измерениями послойных перемещений. Из них только незначительная часть выполнена с определением физического состояния грунтов до начала и после окончания испытаний.

Свойства фазовых компонентов, результаты исследований которых приведены в работах [1–4], в сочетании с данными комплексных исследований деформаций в основаниях фундаментов [5–7], позволяют определять характеристики необратимых деформаций.

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящена статья. Параметры фазовых компонентов пока не применяются для оценки сжимаемости грунтов под влиянием внешней нагрузки. В данной статье, на основании ранее опубликованных результатов натурных исследований, определены показатели их свойств.

Цель работы – использование изменений емкостей фазовых компонентов под влиянием нагрузки и локального замачивания оснований в лессовых грунтах для определения остаточных деформаций.

Введение. Грунты являются дисперсной средой, состоящей из минеральных частиц и пор. Поры заполнены водой и газом. Поэтому грунтовая среда рассматривается как трехфазная система, состоящая из объемов твердых частиц, воды и газа.

В данной статье приведены результаты исследований сжимаемости лессовых грунтов. Твердая фаза является однокомпонентной системой, которая при нагрузках от сооружений считается несжимаемой.

Основными компонентами жидкой фазы являются молекулярная и гравитационная влагоемкости. Максимальная молекулярная для лессовых грунтов достигается при весовой влажности 0,16 и при уплотнении нагрузкой от фундаментов сохраняется, а часть гравитационной – вытесняется. Газ является однокомпонентной системой. Сокращение объема пор сопровождается его эффузией, сжатием и диффузией [1–4].

Изложение основного материала. Результаты исследований деформаций в основаниях опытных фундаментов послужили базой для определения изменений емкостей фаз и фазовых компонентов грунта до начала и после окончания испытаний.

В табл.1 приведены формулы для определения емкостей фаз и их компонентов, а на схеме их соотношения. Каждая емкость является частью единицы объема.

Исследования деформаций опытными фундаментами площадью 1 м² выполнялись в следующей последовательности. Фундаменты устанавливались в прямках размером 2,0x2,0м, разработанных в котловане, по песчаной подготовке толщиной около 5,0 см. Нагрузка прикладывалась ступенями до давления 200 кПа. После стабилизации деформаций в прямок, стенки которого ограждались опалубкой от оплывания, непрерывно подавалась вода. Ее уровень поддерживался с помощью поплавкового затвора, оборудованного на конце шланга, соединенного с емкостью, периодически заполняемой водой. Расход воды

не фиксировался. В процессе замачивания измерялись осадка фундамента, перемещения грунтовых марок и определялась влажность [5–7].

Таблица 1

**Емкости основных фазовых компонентов
в единице объема грунта и их схема**

Фазы и компоненты	Обозначения	Формула определения	
объем частиц	Δm	ρ_d / ρ_s	
объем пор	Δn	$1 - \rho_d / \rho_s$	
объем воды (всего)	Δw	$S_r \cdot \Delta n$	
молекулярной	Δw_m	$S_{r,m} \cdot \Delta n$	
гравитационной	$\Delta w_{зр}$	$\Delta w - \Delta w_m$	
объем газа	Δg	$\Delta n - \Delta w$	

После окончания испытаний и снятия нагрузки в поперечных сечениях оснований отобраны образцы для определения влажности и плотности скелета грунта.

В период локального замачивания основания инфильтрация воды проходила под загруженным фундаментом и за его пределами. Под ненагруженной частью замачиваемого участка повышение капиллярной влагоемкости сопровождается вытеснением газа при сохранении объема пор и прекращается после достижения газонепроницаемости. В выполненных исследованиях значение коэффициента водонасыщения не превышало 0,8.

Деформации уплотнения грунта под внешней нагрузкой при капиллярном увлажнении можно оценивать по изменению емкостей фаз и фазовых компонентов. По результатам выполненных экспериментов их значения определены в природном грунте и под площадью загруженного фундамента после окончания испытаний.

Изложенное иллюстрируется результатами натуральных исследований, в которых определено влияние локального замачивания на изменения емкостей фаз и фазовых компонентов. Ниже приведены данные испытаний грунтов опытными фундаментами площадью 1 м^2 с давлением по подошве 0,2 и 0,35 МПа.

Опытный фундамент №1. Загрузка выполнена до давления 0,2 МПа. Стабилизированная осадка составила 5,3 см. Схема испытаний показана на рис. 1.

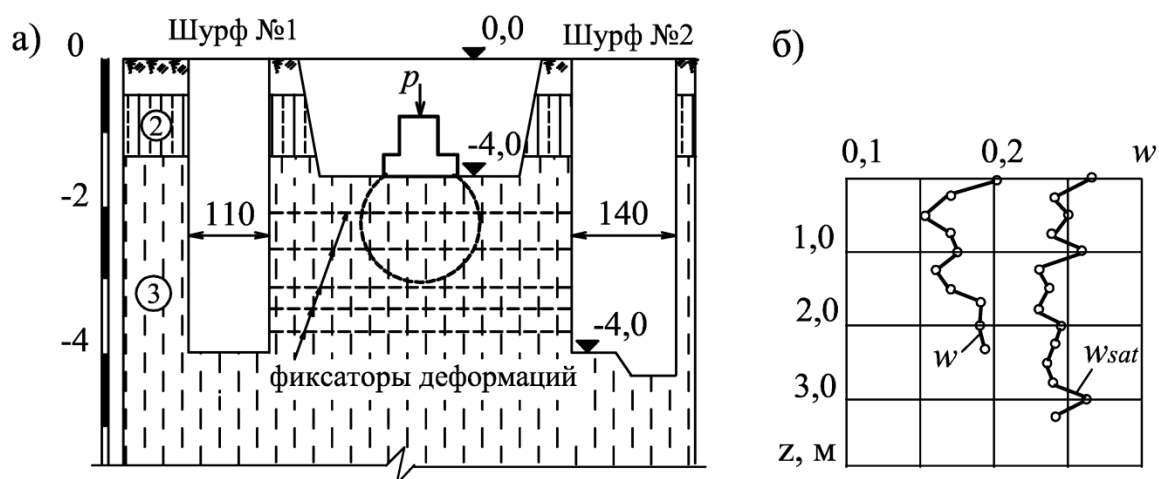


Рис. 1. Схема испытаний грунта опытным фундаментом №1: а) геологическое строение участка; б) влажность грунта

До начала локального замачивания и в его процессе, длившегося 36 суток, определена влажность грунта с интервалом по глубине 0,25 м. Образцы отбирали из двух скважин, расположенных с противоположных сторон опытного фундамента. По полученным данным определено среднее значение для каждой глубины. В процессе замачивания влажность фиксировалось дважды на 12 и 29 сутки после его начала. Данные двух определений близко совпадают. При продолжении замачивания после 12 суток влажность не изменилась. На рис. 1 приведены графики изменения влажности до начала и в процессе замачивания.

Изменения фазовых компонентов в результате локального замачивания за пределами загруженной площади. В процессе перемещения фронта капиллярного увлажнения повышается влагоемкость грунта от капиллярно-стыкового до капиллярно-четочного состояния. При этом происходит защемление газа в порах грунта возникает газопроницаемость грунта [3]. Повышение капиллярной влагоемкости, в результате вытеснения газа прекращается после его защемления, что подтверждается постоянством значений влажностей, определенных через 12 и 29 дней после начала замачивания.

В табл.2 и на рис.2 приведены результаты определения фазовых соотношений до начала и в процессе замачивания.

При отсутствии внешней нагрузки объем пор, заполненных газом, уменьшился на 21% в результате вытеснения его водой. Защемление газа ограничило поступление воды. Коэффициент водонасыщения пор составил 0,71. Весовую влажность, соответствующую этому состоянию следует

считать максимальной капиллярной влагоемкостью. Ее значение в опыте №1 зафиксировано при весовой влажности, равной 0,245, что на 0,085 выше весовой влажности при максимальной молекулярной влагоемкости.

Таблица 2

Изменения емкостей фазовых компонентов при локальном замачивании оснований фундаментов №1 и №2 площадью 1 м²

№	ρ_s г/см ³	p МПа	s см	H_a см	№ nn	ρ_d г/см ³	w д.е.	S_r д.е.	$S_{r,m}$ д.е.	Δm д.е.	Δn д.е.	Δw д.е.	Δw_m д.е.	Δw_{2p} д.е.	Δg д.е.
1	2,64	-	-	-	1	1,38	0,175	0,50	0,46	0,52	0,48	0,24	0,22	0,02	0,24
		-	-	-	2	1,38	0,245	0,70	0,46	0,52	0,48	0,34	0,22	0,12	0,14
		-	-	-	3	1,38	0,16	0,47	0,47	0,52	0,48	0,23	0,23	-	0,25
		0,2	22,7	125	4	1,51	0,20	0,70	0,56	0,57	0,43	0,30	0,24	0,06	0,13
					5	1,55	0,20	0,79	0,60	0,59	0,41	0,31	0,25	0,06	0,10
2	2,68			-	6	1,42	0,19	0,57	0,48	0,53	0,47	0,27	0,23	0,04	0,20
					7	1,62	0,21	0,86	0,66	0,60	0,40	0,34	0,26	0,08	0,06
					8	1,70	0,21	0,98	0,74	0,64	0,36	0,35	0,27	0,08	0,01
		0,35	38,4	162	9	1,68	0,21	0,945	0,72	0,63	0,37	0,35	0,27	0,08	0,02
					10	1,56	0,22	0,82	0,60	0,58	0,42	0,34	0,25	0,09	0,08
					11	1,44	0,22	0,68	0,50	0,54	0,46	0,31	0,23	0,08	0,15

Примечания: ρ_s , p , s , H_a – плотность частиц, давление, осадка, глубина зоны деформации в основании фундамента; ρ_d – плотность скелета в пределах и за пределами зоны деформации; S_r , $S_{r,m}$ – коэффициенты водонасыщения при влагоемкости общей, и молекулярной. Фазовые соотношения: 1, 2 – под незагруженной площадью, в пределах приямка до начала и в конце замачивания; 3, 6 – средние значения после окончания испытаний за пределами зоны деформаций; 4, 7 – по оси фундамента, в пределах зоны деформации; 5, 8 – максимальные значения под подошвой фундамента; 9, 10, 11 – на глубине 80, 140 и 160 см ниже начального положения опытного фундамента №2.

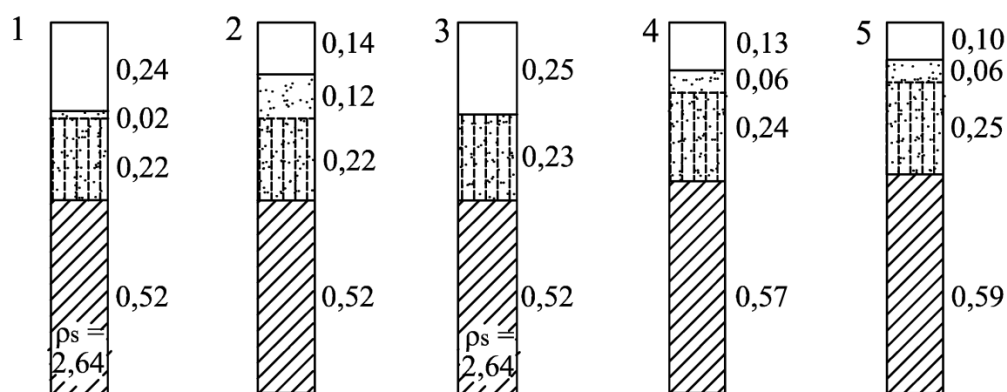


Рис. 2. Емкости фаз и фазовых компонентов в основании фундамента №1

После окончания испытаний в продольном сечении основания отобраны образцы грунта в пределах и за пределами зоны деформации, по которым определены значения плотности скелета грунта и влажности. Схема отбора образцов и результаты определений приведены на рис. 3.

В пределах глубины зоны деформации определение фазовых компонентов выполнены для средних и максимальных значений характеристик. В этом опыте, при локальном замачивании под загруженным фундаментом сокращение объема пор является следствием вытеснения газа.

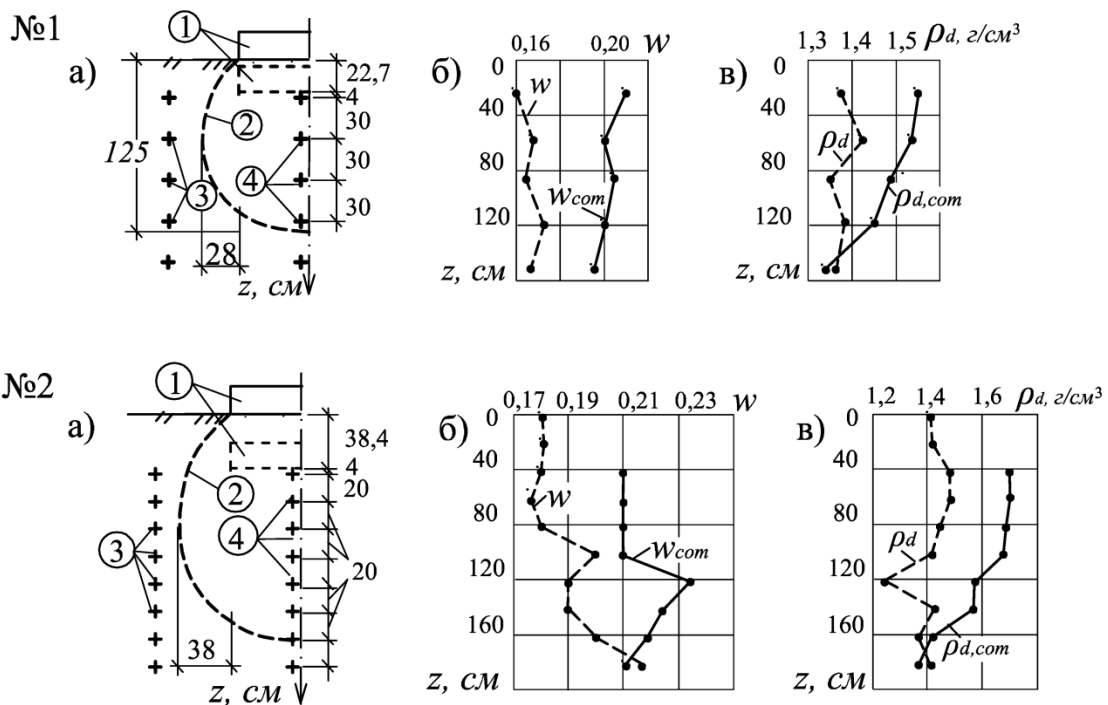


Рис. 3. Результаты определения влажности и плотности скелета грунта в основаниях опытных фундаментов №1и 2: а) схема поперечного сечения основания: 1 – начальное и конечное положение фундамента; 2 – граница зоны деформации; 3, 4 – точки отбора образцов грунта; б); в) графики изменения влажности и плотности скелета по глубине

Опытный фундамент №2 [5; 7]. После стабилизации деформаций при давлении 200 кПа при природной влажности грунтов основания выполнено локальное замачивание. В условиях непрерывного замачивания, давление было повышено ступенями по 50 кПа до 350 кПа.

Результаты определений влажности и плотности скелета приведены в табл.2 и на рис.3. В данном опыте емкости фазовых компонентов определены на разных отметках зоны деформации по оси фундамента,

результаты которых приведены в табл.2 и на рис.4. Из приведенных данных видно, что сокращение объема пор, как и в предыдущем опыте, является следствием вытеснения из пор газа.

В процессе локального замачивания основания при наличии внешней нагрузки происходит уплотнения грунта в результате сокращения объема пор, заполненных газом. Часть объема пор, заполненных молекулярно-связанной и защемленной капиллярной водой, сохраняется. Об этом свидетельствует постоянство объема капиллярной влагоемкости при увеличении плотности скелета грунта, приведенные на рис. 5, а. При этом значение весовой влажности снижается (рис.5, б).

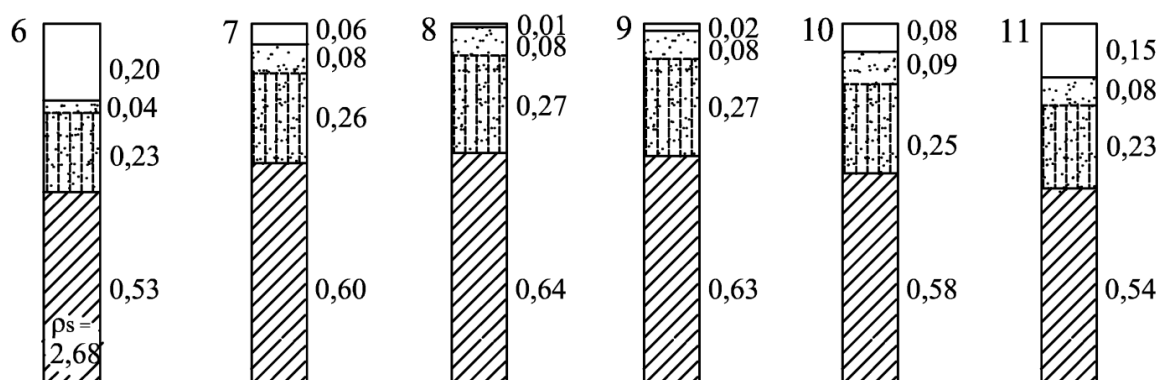


Рис. 4. Емкости фаз и фазовых компонентов в основании опытного фундамента №2 после окончания испытаний

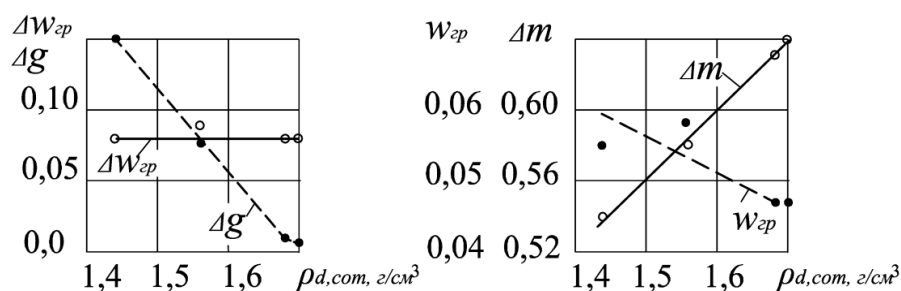


Рис. 5. Графики зависимости емкостей фаз и фазовых компонентов от плотности скелета грунта в опыте №2

При проникании фронта капиллярного увлажнения вглубь основания под фундаментом увеличивается количество воды на контактах между минеральными частицами, формируя ее стыковое состояние (состояние защемленной воды по Н.М. Герсеванову). Ее максимальное значение зафиксировано при весовой влажности около 20...21% или на 0,04...0,05 больше весовой влажности при максимальной молекулярной влагоемкости.

Защемленная емкость капиллярной воды, при ее стыковом состоянии "образует кольцевые миниски вокруг контактов частиц" [3], которые в процессе уплотнения сохраняются. О сохранности защемленной воды может свидетельствовать ее постоянство в пределах зоны деформации.

Максимальные значения весовой влажности при стыковом состоянии капиллярной влагоемкости (w_k) (табл. 3), определены по зависимости:

$$w_k = \Delta w_k \cdot \rho_w / \Delta m \cdot \rho_s \quad (1)$$

Таблица 3

Состояние защемленной воды (капиллярно-стыковое состояние) при среднем и максимальном значении плотности скелета грунта

№ опыта	p МПа	ρ_d г/см ³	$\rho_{d,cp}$ г/см ³	$\rho_{d,max}$ г/см ³	Δw_k	w_k
1	0,2	1,38	1,51	-	0,06	0,04
			-	1,55	0,06	0,039
2	0,35	1,42	1,62	-	0,08	0,049
			-	1,70	0,08	0,047

Примечания: $\rho_{d,cp}$ и $\rho_{d,max}$ – среднее значение плотности скелета в пределах зоны деформации и максимальное – под подошвой фундамента. $\Delta w_{k,c}$ и $w_{k,c}$ – защемленная капиллярная влагоемкость и соответствующая ей весовая влажность.

Уплотнение является следствием сокращения объема пор в результате повышения емкостей минеральных частиц, молекулярно-связанной и капиллярно-защемленной воды в единице объема грунта. Поэтому разница емкостей пор заполненных газом до начала испытаний и после их окончания, при достигнутой стабилизации деформаций, является относительной деформацией уплотнения (ϵ'_n). Произведение ее среднего значения на глубину зоны деформации определяет осадку (s'_n), вызванную уплотнением. Часть осадки от поперечного расширения (s'_v) является разностью при вычитании осадки уплотнения от измеренной остаточной:

$$s'_v = s'_0 - s'_n \quad (2)$$

Выводы:

1. От поверхностного источника замачивания формируется подвешенный горизонт капиллярной влагоемкости.
2. При отсутствии внешней нагрузки повышение влажности продолжается до защемления газа. В проведенных исследованиях

защемление газа зафиксировано при весовой влажности 0,245, что на 0,085 превышает максимальную молекулярную влагоемкость.

3. Под загруженным фундаментом капиллярное увлажнение сопровождается уплотнением, снижающим газо- и водопроницаемость. В выполненных исследованиях весовая влажность при стыковом защемлении воды составила 0,20...0,21, что на 0,04 – 0,05 выше максимальной молекулярной.
4. Относительной деформацией уплотнения ε'_n следует считать отношение сократившегося объема пор к начальному. Для единичного объема ее значением является разность емкостей пор, заполненных газом до и после уплотнения. В выполненных исследованиях эти значения составили 0,12 и 0,14 (опыты №№1 и 2).

Список литературы:

1. Лебедев А.Ф. Почвенные и грунтовые воды / А.Ф. Лебедев // Издание четвертое. – Изд-во Академии Наук СССР. – М. – Л. – 1936. – 314 с.
2. Герсеванов Н.М. Теоретические основы механики грунтов и их практические применения / Н.М. Герсеванов, Д.Е. Польшин. – М.: Стройиздат, 1948. – 274 с.
3. Приклонский В.А. Грунтоведение / В.А. Приклонский, Издание третье. – Ч.1. – М.: Госгеолиздат, 1955. – 430 с.
4. Гольдштейн М.Н. Механические свойства грунтов / М.Н. Гольдштейн. – М.: Стройиздат, 1973. – 375с.
5. Тугаенко Ю.Ф. Экспериментальные исследования совместной работы основания и фундаментов в лессовых грунтах первого типа / Ю.Ф. Тугаенко // Известия вузов: Строительство и архитектура, 1966. – №2. – С.22-31.
6. Тугаенко Ю.Ф. Исследования деформаций в основании опытных фундаментов в лессовых грунтах первого типа / Ю.Ф. Тугаенко // Основания, фундаменты и подземные сооружения. – Сб. науч. раб. – Вып.2. – М.: Высшая школа, 1967. – С.39-49.
7. Тугаенко Ю.Ф. Развитие деформаций в основаниях фундаментов, способы их ограничения и методы оценки / Ю.Ф. Тугаенко. – Одесса: Астропринт, 2003. – 222с.

Ю.Ф. Тугаєнко, д.т.н., професор

М.В.Марченко, к.т.н., доцент

Л.О. Логінова, к.т.н., інженер

Одеська державна академія будівництва та архітектури

**ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК УЩІЛЬНЕННЯ В
ОСНОВАХ ФУНДАМЕНТІВ ПО ЗМІНЕННЮ ЄМНОСТІ
ФАЗ І ФАЗОВИХ КОМПОНЕНТІВ**

АНОТАЦІЯ: Викладено методику визначення ємностей фаз і фазових компонентів в лесових ґрунтах одеського регіону. По їх зміненню під впливом навантаження від дослідних фундаментів в умовах локального замочування визначені характеристики ущільнення і поперечного розширення.

*Ключові слова: ЛЕСОВІ ГРУНТИ; ДОСЛІДНИЙ ФУНДАМЕНТ;
ЛОКАЛЬНЕ ЗАМОЧУВАННЯ; ФАЗОВІ КОМПОНЕНТИ;
ХАРАКТЕРИСТИКИ УЩІЛЬНЕННЯ.*

Y.F. Tugaenko, ScD, Professor

M.V. Marchenko, PhD, Associate Professor

L.A. Loginova, PhD, engineer

Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture

**DETERMINATION OF COMPACTION IN THE GROUNDS OF
THE FOUNDATIONS OF THE CHANGE IN CAPACITANCE
PHASES AND PHASE COMPONENTS**

ABSTRACT: The methods of determining the capacities of phases and phase components in the loess soils of the Odessa region. As they change under the influence of stress experienced by the foundations in terms of the local soaking defined sealing performance and lateral expansion.

Keywords: LOESS SOILS; EXPERIENCE FOUNDATION; LOCAL SOAKAGE; PHASE COMPONENTS; DESCRIPTIONS OF COMPRESSION.