

## ЗАСТОСУВАННЯ ФАЗОВОЇ МОДЕЛІ ОЦІНКИ ЗАЛИШКОВИХ ДЕФОРМАЦІЙ В ЛЕСОВИХ ҐРУНТАХ

Тугаєнко Ю.Ф., Марченко М.В., Логінова Л.О.

*У статті викладені особливості будови лесової товщі Одеського регіону і деякі характеристики фізичного стану ґрунтів. Ґрунти є фазовим середовищем. Наведені характеристики фаз і їх зміни під впливом зовнішнього навантаження. Співвідношення фаз і фазових компонентів дозволяють прогнозувати значення деформацій під впливом зовнішнього навантаження. Можливість застосування фазової моделі для визначення характеристик стисливості і її висока вірогідність обґрунтовані результатами комплексних досліджень процесів деформування ґрунтів в основі двох дослідних фундаментів площею 1,0 м<sup>2</sup>.*

**Ключові слова:** лесові ґрунти, фундамент, навантаження, фазова модель оцінки деформацій.

## ПРИМЕНЕНИЕ ФАЗОВОЙ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В ЛЕССОВЫХ ГРУНТАХ

Ю.Ф. Тугаенко, М.В. Марченко, Л.А. Логинова

*В статье изложены особенности строения лессовой толщи Одесского региона и некоторые характеристики физического состояния грунтов. Грунты являются фазовой средой. Приведены характеристики фаз и их изменения под влиянием внешней нагрузки. Соотношение фаз и фазовых компонентов позволяют прогнозировать значения деформаций под влиянием внешней нагрузки. Возможность применения фазовой модели для определения характеристик сжимаемости и ее высокая достоверность обоснованы результатами комплексных исследований процессов деформирования грунтов в основаниях двух опытных фундаментов площадью 1,0 м<sup>2</sup>.*

**Ключевые слова:** лессовые грунты, фундамент, нагрузка, фазовая модель оценки деформаций.

## THE USE OF THE PHASE STRUCTURAL MODEL OF THE PERMANENT DEFORMATIONS IN THE LOESSIAL SOILS

Yu.F. Tugaenko, M.V. Marchenko, L.A. Loginova

*The structural features of the loessial soils in the Odessa region and some characteristics of the soil physical condition are given in this research article. Soils are phase system. The characteristics of the phases and their changes under the influence of an external load. The ratio of phases and phase components allow to predict the values of deformation under the influence of an external load. The possibility of using of the phase structural model for determination of the compressibility characteristics and its high confidence were based by the results of the multi-method research of soil deformation processes of two pilot foundations with the area of 1,0 m<sup>2</sup>.*

**Keywords:** loess soils, foundation, load, strain evaluation phase model.

### Вступ

У діючих нормах для визначення осідання фундаментів використовується пружно-пластична розрахункова модель деформування ґрунтів в основах фундаментів. Вона побудована на ряді припущень. Ґрунтове середовище прийняте однорідним, ізотропним лінійно-деформуємим півпростором з умовним обмеженням стиснутої товщі в основах фундаментів, яке не враховує характеристики ущільнення.

Фазова модель заснована з урахуванням змін фізичного стану ґрунтів під впливом зовнішнього навантаження. Її застосування дозволяє враховувати всі види деформацій, які спостерігаються в ґрунтах основ.

Процеси ущільнення ґрунтів під впливом зовнішнього навантаження є наслідком скорочення об'єму пор в результаті збільшення щільності їх скелету.

В ґрунтового середовищі, яке є фазовою системою, процес ущільнення супроводжується зміною ємностей фазових елементів в одиниці об'єму ґрунту.

Вперше, для визначення характеристик стисливості в лабораторних умовах К.Терцагі застосував коефіцієнт пористості, який є відношенням фазових елементів: об'єму пор до об'єму мінеральних часток. Його зміна зі зростанням тиску в графічній формі отримала назву компресійної кривої. Такий принцип оцінки стисливості має назву фазової розрахункової моделі [1; 2]. Молекулярна і затиснена частини води не витісняються в процесі ущільнення ґрунтів, що встановлено дослідженнями [3; 4; 5].

Стаття присвячена методикі розрахунку осідання фундаментів, яка розроблена з використанням фазової розрахункової моделі, а також є альтернативною до чинного умовного методу.

**Метою статті** є використання фазової розрахункової моделі для визначення характеристик стисливості ґрунтів і осідання фундаментів під впливом навантаження в умовах локального замочування основи, що складена лесовими ґрунтами.

### Основна частина

*Особливості лесових ґрунтів Одеського регіону і їх характеристики.* Лесові породи в Одеському регіоні, який розташований в міжріччі Південний Буг – Дністер Західного Причорномор'я, залягають повсюдно і відсутні тільки в зонах долинно-балкових вріз (заплави, надзаплавні тераси річкових долин, днища балок та ін.). Потужність лесової товщі коливається від 6,0 до 25,0 м. Її будова складається з шарів лесових суглинків (середніх і важких) і супісків (легкі суглинки), які чергуються між собою. Гранулометричний склад представлений дрібними піщаними, пілуватими і глинистими частинками. Узагальнені середні значення вмісту фракцій наведені в табл.1.

Таблиця 1 – Гранулометричний склад лесових відкладень

Лесові суглинки	Середні значення вмісту фракцій в %		
	2 – 0,05 мм	0,05–0,005 мм	<0,005мм
легкі	16,9	69,72	13,38
середні	9,55	73,40	17,05
важкі	9,95	65,65	24,4

Лесові відкладення характеризуються невисокою природною вологістю, значення якої нижче межі розкочування. Винятком є райони міст в межах житлової забудови, в яких лесова товща обводнена. У таблиці 2 наведені деякі характеристики ґрунтів цього регіону.

Таблиця 2 – Значення характеристик лесових відкладень

Лесові суглинки	Середні значення				
	$n$ , д.е.	$w_p$ , д.е.	$w_L$ , д.е.	$h_k$ , м	$k_\phi$ , м/сут
легкі	0,50	0,18	0,31	3,55	1,54
середні	0,47	0,19	0,34	-	0,072–1,05
важкі	0,41	0,19	0,35	3,92	0,046–0,077

Примітки:  $n$  - пористість;  $w_p$  і  $w_L$  - межі пластичності та текучості; НК - висота підняття капілярної кайми над рівнем підземних вод;  $k_\phi$  - коефіцієнт фільтрації

*Характеристика фаз.* Грунтове середовище є трифазною системою, що складається з твердої, рідкої і газоподібної фаз. Кожна фаза має фізичні властивості, що впливають на деформування ґрунтів під дією навантажень від будівель і споруд.

*Тверда фаза.* При оцінці стисливості ґрунтів їх мінеральні частинки вважаються нестисливими. Умовно ця фаза є однокомпонентною. Вона складається з суміші мінеральних часток різних розмірів. На властивості твердої фази впливають мінералогічний склад, форма частинок і їх дисперсність. З підвищенням дисперсності збільшується питома поверхня ґрунтового середовища. Всі ці фактори впливають на взаємодію частинок скелету з поровою водою.

*Рідка фаза* представлена водою, що знаходиться в порах. Вода нестислива. Її стан оцінюється наступними основними компонентами: молекулярною, капілярною і гравітаційною вологоємністю. Складові фазових компонентів рідкої фази схематично показані на рис. 1

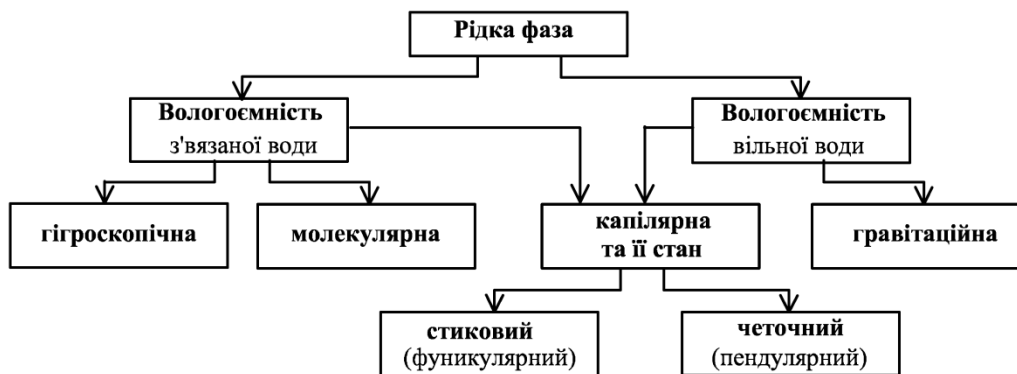


Рисунок 1 – Схема фазових компонентів рідкої фази

Молекулярна вологоємність складається з двох оболонок (плівок) міцно-пов'язаної, гігроскопічної і пухкозв'язаної води. Обидва види утримуються на поверхні частинки електро-молекулярними силами. Мінерали заряджені негативно. Молекули води є диполями. З боку атома кисню – негативно зарядженими, а з боку двох атомів водню – позитивно [2].

*Характеристики молекулярної вологоємності.* А.Ф. Лебедевим [3] експериментально встановлена неможливість її відділення від частинок ґрунту при силі тяжіння в  $7 \cdot 10^4$  разів, що перевищує гравітаційну. Таким чином, молекулярно-зв'язана вода в процесі ущільнення під впливом зовнішнього навантаження від споруди не витісняється з пор ґрунту.

Переміщення молекул зв'язаної води відбувається під впливом електро-молекулярних сил від частки з більшою товщиною плівки до частинок з меншою її товщиною, незалежно від напрямку сил гравітації. Товщина плівок молекулярно-зв'язаної води визначається умовно і залежить від розміру, форми частинок і їх мінералогічного складу. У різних авторів наведені відомості про товщину плівок значно відрізняються.

В.А. Приклонський з цього приводу зазначає, що "...Существующие в литературе данные о толщине пленок весьма противоречивы. Это объясняется, в частности, трудностью определения удельной поверхности породы, большой изменчивостью толщины пленок в зависимости от характера внешней среды, наличием воды, внутри решеток многих минералов и др. .... По данным разных исследователей, толщина пленок воды на поверхности твердого тела колеблется от долей до нескольких микрон. Можно думать, что вследствие микронеровностей на поверхности минеральной частицы толщина пленки воды на разных участках этой поверхности различна...". "...наибольшая толщина пленки с аномальными свойствами была определена Б.В. Дерягиным (1936) для химически чистой воды на поверхности мусковита; она достигла 2,1 мкм, т.е. около 7600 диаметров молекулы воды" [5].

Н.М. Герсевановим відзначено вплив оболонок молекулярно-зв'язаної води на механічні властивості ґрунтів "...В точках контактов молекулярная оболочка несколько сдавлена в зависимости от сил, передающихся от частицы к частице от внешней нагрузки, в результате чего частицы являются склеенными между собой в точках контакта благодаря молекулярным оболочкам. Это обстоятельство является причиной связности ґрунтов таких

как глина, суглинки, илы. Связные грунты обладают силой сцепления, которая обуславливает сопротивление грунта сдвигу и растяжению" [4].

У табл. 3 наведені значення товщини плівок і кількості рядів молекул води в межах їх товщини.

Максимальна кількість води, що утримується мінеральними частинками ґрунту, А.Ф. Лебедевим названа максимальною молекулярною вологоємністю.

"Обладая свойствами, близкими к свойствам твердых тел пленки воды при небольшой их толщине затрудняют взаимное перемещение частиц, обуславливая высокое статическое трение между ними и облегчая их взаимное притяжение. С увеличением толщины пленок влияния их на механические свойства смеси частиц меняется. Толстые пленки, наоборот, уменьшают трение между частицами, облегчают их взаимное перемещение" [5]. Ці властивості можуть бути одним із критеріїв, що визначають структурну міцність лесових ґрунтів, яка знижується при підвищенні вологості.

Таблица 3 – Характеристика плівок молекулярної води

Автори	Товщина плівки, нм	Кількість рядів молекул води	Джерело
А.Ф. Лебедев	6...56	20...200	[3]
Н.М. Герсеванов	250...500	900...1800	[4]
В.А. Приклонський	5...10	18...36	[5]

Примітка: розмір молекули води 0,276 нм (нанометра).

"...Максимальная молекулярная влагоемкость используется: 1) как классификационная характеристика; 2) как величина, очень близкая, к так называемому нижнему пределу пластичности" [5]. Її значення залежить від ступеня дисперсності. Для крупного піску відповідає 2% ваговій вологості, а для тонкодисперсних глин досягає 45%. Для лесів максимальна молекулярна вологоємність досягається при 16% ваговій вологості [4]. У лесових ґрунтах Одеського регіону значення ваговій вологості при максимальній молекулярній вологоємності на 2 ... 3% менше вологості на межі розкочування.

Капілярна вода віднесена А.Ф. Лебедевим до гравітаційної. Однак, за деякими своїми властивостями, вона відрізняється тим, що займає проміжне положення між молекулярною і гравітаційною. Гравітаційна вода заповнює великі пори і порожнечі і переміщується в ґрунтах під впливом сили тяжіння. Відмінністю капілярної води є її підйом над рівнем підземних вод проти сил тяжіння. Вода з капілярної зони не витикає в виробітки і порожнечі. Температура її замерзання нижче нуля.

В.А. Приклонський зазначає "... О механизме передвижения капиллярной воды, в частности подъема ее против силы тяжести в мелкозернистых породах нет единого мнения" [5].

А.Ф. Лебедевим виділено два види капілярної води: капілярно-підняту і капілярно-підвішену.

Капілярно-піднята формується над рівнем підземних вод. У лесових ґрунтах піднімається на висоту до 3,0...4,0 м. При постійному горизонті дзеркала підземних вод висота її підняття зберігається незмінною, а при випаровуванні швидко відновлюється.

Капілярно-підвішена утворюється в зоні аерації від поверхневих джерел живлення (зрошення, витоків водогінних комунікацій, штучному замочуванні при випробуваннях фундаментних конструкцій). Ця вода не має зв'язку з підземною. Після припинення зволоження, в результаті випаровування її рівень знижується. А після тривалого випаровування може зникнути.

Стан капілярної вологоємності експериментально досліджено в піщаних ґрунтах [3]. Лесові відкладення складаються, в основному, з пилуватих частинок, що мають форму піщаних, але значно менших розмірів. Тому отримані результати використані для оцінки стану капілярної вологоємності в лесових ґрунтах. Ці ж результати використані А.Ф. Лебедевим для оцінки стану капілярної вологоємності в ґрунтах і отримали назву фунікулярний і пендулярний [3] (у В.А. Приклонського – стиковий і четочний).

При капілярно-стиковому стані навколо точок контактів між мінеральними частинками ґрунту з плівками молекулярної води утворюються кільцеві (кругові) меніски. Газ в порах вільно сполучається з атмосферним. Ця частина капілярної води отримала назву – стан з затисненою водою (за Н. М. Герсевановим). Її схема приведена на рис.2.

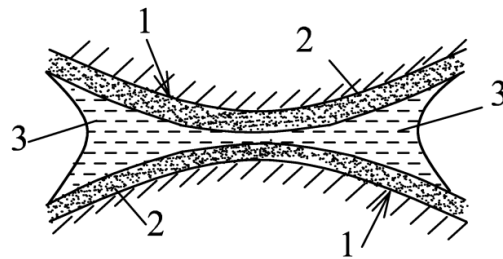


Рисунок 2 – Схема кільцевого меніску навколо контакту двох частинок: 1 – поверхня частинок; 2 – молекулярна вода; 3 – капілярно-стикова, затиснена вода

При капілярно-четочному стані води відбувається защемлення газу в порах ґрунту. Подальше збільшення капілярної вологості після досягнення стикового стану заповнює частину пор і витісняє газ, одночасно знижуючи газопроникність. При досягненні четочного стану затиснений газ перешкоджає подальшому підвищенню капілярної вологості. Можна вважати, що четочний стан є межею максимальної капілярної вологості. Н.М. Герсевановим четочний стан визначено як стан з затисненим повітрям. Схеми стикового і четочного стану капілярної вологості представлені на рис.3.

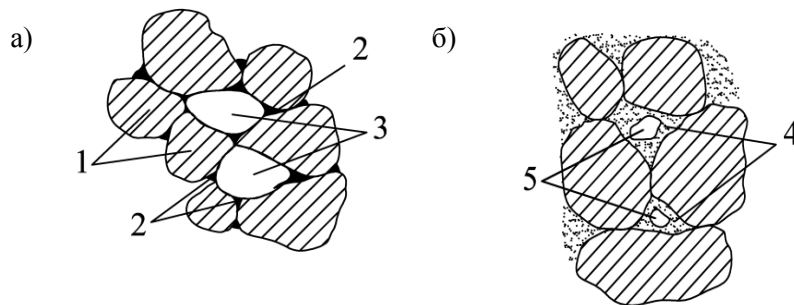


Рисунок 3 – Схеми стану капілярної вологості: а) капілярно-стиковий; б) капілярно-четочний: 1 – мінеральні частинки; 2 – капілярно-стиковий стан (затиснена вода); 3 – вільний газ; 4 – капілярно-четочний стан; 5 – затиснений газ в порах

Граничні значення вологості при стиковому і четочному станах капілярної вологості залежать від виду ґрунтів та їх дисперсності. У виконаних дослідженнях їх значення для лесових супісків одеського регіону (ПЕ-3) відповідає ваговій вологості близької до значень 0,21 і 0,25 [7].

Газоподібна фаза умовно прийнята однокомпонентним середовищем, яке може перебувати у вільному і розчиненому станах. Під впливом зовнішнього навантаження, при скороченні об'єму пор в процесі ущільнення, відбувається зміна об'єму цієї фази в результаті еффузії, стиснення і дифузії.

В межах зони аерації газ, що знаходиться в порах ґрунту, має склад атмосферного з домішкою водяної пари і в деяких випадках містить газ органічного походження. Відношення об'єму пор, які заповнені газом, до всього об'єму має назву коефіцієнт аерації [2].

В порах природного ґрунту можна виділити два стану газу: вільний і защемлений. У вільному стані поровий газ сполучається з атмосферним. При його затисканні знаходиться в вигляді замкнутих бульбашок, оточених водою. "... Он не сообщается с наружной атмосферой и находится под несколько повышенным давлением. Путем простого

механического воздействия на породу такой воздух удалит не удастся. При сжатии породы под действием внешней нагрузки заземленный воздух сообщает ей дополнительную упругость, принимая на себя часть внешней нагрузки" [5]. Газ в стисненому стані сприяє витісненню води з пор. Частина його в розчиненому вигляді видаляється з витісненою водою.

Відношення об'єму розчиненого газу до об'єму води при даній температурі і тиску величина постійна і має назву коефіцієнт розчинності. Його значення при атмосферному тиску і температурі 10°C дорівнює 0,02 [2]. При зниженні порового тиску об'єм стисненого газу збільшується з одночасним виділенням його розчиненої частини.

Методика визначення характеристик залишкових деформацій за фазовою моделлю деформування ґрунтів. Модель для розрахунку осідання була запропонована К. Терцагі в 1925 р. За М.Н. Гольдштейном вона отримала назву фазової (1971 р.). Її сутність полягає в наступному: 1) мінеральні частинки скелету вважаються нестисливими; 2) вода нестислива; 3) ущільнення ґрунту відбувається в результаті скорочення об'єму пор, при збереженні об'єму мінеральних часток; 4) осідання ґрунту, пори яких заповнені водою, протікає зі швидкістю її витіснення. Для визначення стисливості ним введена додаткова характеристика – коефіцієнт пористості. Його значенням є відношення об'єму пор до об'єму частинок скелету:  $e = V_n / V_s$ . Від зовнішнього навантаження відбувається скорочення об'єму пор при збереженні об'єму частинок, а значення коефіцієнта пористості зменшується. Графік залежності коефіцієнта пористості від тиску, який побудований за результатами випробувань – компресійна крива – використовується для визначення стисливості в лабораторних умовах до теперішнього часу. На рис. 4 представлена схема цього методу.

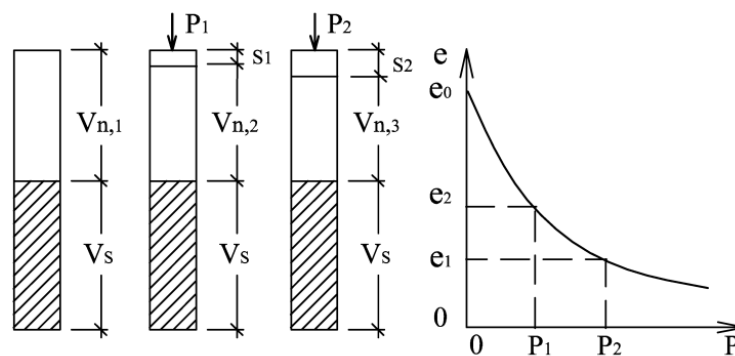


Рисунок 4 - Схема фазової розрахункової моделі К. Терцагі для визначення стисливості ґрунтів: а) схема зміни об'єму пор; б) компресійна крива

У розрахунковій моделі К. Терцагі не враховані особливості фізичних властивостей ґрунтів, які встановлені в наступні роки [1-5]. До них відносяться наявність молекулярно-зв'язаної і затисненої води. Ця вода в процесі ущільнення не витісняється з пор. Значний вплив на процес ущільнення справляє затиснений газ [2-5; 7].

Значення молекулярної вологоємності залежить від дисперсності ґрунтів і може коливатися в залежності від геологічних і кліматичних умов. Для лесових ґрунтів, її максимальне значення досягається при ваговій вологості, що дорівнює 0,16 і відповідає заповненню 45...50% об'єму пор [7]. Затиснена частина води формується в процесі ущільнення в умовах капілярного зволоження. Її максимальна кількість в проведених дослідженнях досягнута при ваговій вологості, яка перевищує на 0,04 ... 0,05 вологості при максимальній молекулярній вологоємності [7]. Таким чином, з урахуванням затисненого газу, тільки до 20% об'єму пор може скоротитися в результаті ущільнення.

За даними випробувань ґрунтів основ штампами і дослідними фундаментами площею  $1...10\text{м}^2$  залишкове осідання є наслідком двох складових: ущільнення і поперечного розширення стисненого ґрунту. Стисливість при ущільненні слід оцінювати по зміні співвідношень фаз і фазових компонентів в межах умовної одиниці об'єму ґрунту.

Ємність будь-якого фазового елемента в межах умовного одиничного об'єму є величиною відносною і визначається часткою одиниці від початкового об'єму. Тому ємність скороченого об'єму пор є відносною деформацією ущільнення  $\varepsilon'_n$ .

Визначити характеристики ущільнення можна по одній з двох методик. За скорочення ємності витисненого газу, або за сумою прирощення ємностей, мінеральних частинок, молекулярної і затисненої частини гравітаційної вологоємності (рис.5).

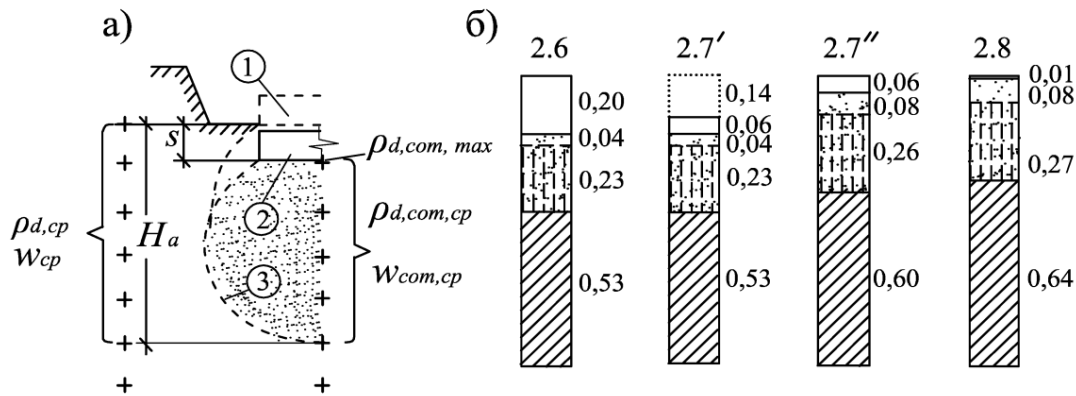


Рисунок 5 – Схема поперечного перерізу основи дослідного фундаменту №2:

1, 2 – початковий і кінцевий стан фундаменту; 3 – межа зони залишкових деформацій;

$\rho_{d,com,cp}$ ,  $W_{com,cp}$  – середні значення в ущільненій основі, по осі фундаменту;

$\rho_{d,com,max}$  – максимальне значення; б) схема фаз і фазових елементів в досліді №2

За першою методикою прийняті допущення: 1) ущільнення відбувається в результаті скорочення ємності пор і, як наслідок, зменшення одиниці об'єму; 2) ємність мінеральних часток не змінюється; 3) молекулярна вологоємність і частина затисненої вологоємності (при її наявності) не витісняються з пор; 4) одиничний об'єм скорочується на величину ємності витисненого газу; 5) значення ємності витисненого газу в одиниці об'єму ґрунту дорівнює відношній деформації ущільнення (рис.5, б поз. 2.7').

Друга методика заснована на збільшенні ємностей фазових елементів в межах незмінній одиниці об'єму ґрунту. Прийнято наступні допущення: 1) в результаті ущільнення збільшуються ємності частинок ґрунту, молекулярно-зв'язаної води і капілярної вологоємності до її стикового стану; 2) сума прирощень цих ємностей визначає відносну деформацію ущільнення. Вона дорівнює ємності витисненого газу, визначеного за першою методикою (рис.5, б поз. 2.7'').

Максимально можливе значення відношньої деформації ущільнення в умовах лесових ґрунтів високої вологості  $\varepsilon'_n$  дорівнює сумі ємностей газу і частини капілярної вологоємності, що перевищує максимальне значення його стикового стану.

Частина залишкового осідання від поперечного розширення  $s_v$  визначається за залежністю:

$$s_v = s_o - s_n \quad (1)$$

де  $s_o$  - осідання від залишкових деформацій;  $s_n$  - частина осідання у результаті ущільнення.

Коефіцієнт поперечного розширення  $\nu$  визначається по залежності:

$$\nu = s_{\nu} / 2s_o \quad (2)$$

Залежність (2) отримана при допущенні, що поперечне розширення розподілено рівномірно по периметру площі стисненого об'єму в межах глибини зони деформації замість «бочкоподібного», який спостерігається в експериментах [8].

*Методи оцінки характеристик залишкових деформацій.* Наведені аргументи засновані на результатах натурних досліджень. В роботі [7] наведені дані спостережень процесів деформування ґрунтів і зміни їх стану після закінчення випробувань в основах двох фундаментів площею 1,0 м<sup>2</sup>. Випробування проведені на різних ділянках, розташованих в межах м. Одеси. Їх підшва заглиблена не більше 0,20 м нижче покрівлі лесового супіску (ПЕ-3).

У таблиці 4 наведені деякі результати вимірювань фазових елементів в досліді № 1 і 2. Відносну деформацію  $\epsilon'_n$  можна визначити за однією з двох методик: по скороченню об'єму пор або сумі прирощень фазових елементів в одиниці об'єму. На рис 5, б приведена схема зміни фазових ємностей в досліді №2. За першою методикою в одиниці об'єму умовно вважаються незмінними всі фазові елементи, крім газу. Його витиснення супроводжується зменшенням одиниці об'єму. Ємність витисненого газу чисельно дорівнює відносній деформації ущільнення (рис.5, б, пункти 2.6 і 2.7 ').

Таблиця 4 - Параметри стану ґрунтів в основі фундаментів №№1 та 2

№	$p$ МПа	$s$ см	$H_a$ см	$\rho_d$ г/см <sup>3</sup>	$w$	$S_r$	$S_{r,m}$	$\Delta m$	$\Delta n$	$\Delta w$	$\Delta w_m$	$\Delta w_{zp}$	$\Delta g$
1.3	-	-	-	1,38	0,16	0,47	0,47	0,52	0,48	0,23	0,23	-	0,25
1.4	0,2	22,7	125	1,51	0,20	0,70	0,56	0,57	0,43	0,30	0,24	0,06	0,13
1.5	0,2	-	-	1,55	0,20	0,79	0,60	0,59	0,41	0,31	0,25	0,06	0,10
2.6	-	-	-	1,42	0,19	0,57	0,48	0,53	0,47	0,27	0,23	0,04	0,20
2.7	0,35	38,4	162	1,62	0,21	0,86	0,66	0,60	0,40	0,34	0,26	0,08	0,06
2.8	0,35	-	-	1,70	0,21	0,98	0,76	0,64	0,36	0,35	0,27	0,08	0,01

Примітки: 1) Позначення в номері (№) – перша цифра - номер досліді; а друга – номер позиції в табл.2, з роботи [7]. 2) 1.3 і 2.6 – значення параметрів: – в природних ґрунтах; 1,4 і 2,7 середні значення в межах глибини зони деформації; 1,5 і 2,8 – максимальні значення на позначці підшви фундаменту. В даному досліді середнє значення відносної деформації ущільнення складає 0,14.

Другою методикою враховуються фазові зміни в межах одиниці об'єму. Відносною деформацією є сума прирощень ємностей мінеральних частинок, молекулярної вологості і затисненої частини гравітаційної вологості (при максимальному значенні стикового стану). Ці зміни показані на рис.5, б (2,6 та 2,7 ") і в таблиці 5.

Застосування фазової моделі дозволяє з достатньою достовірністю визначати характеристики стисливості ґрунтів, осідання фундаментів і прогнозувати їх можливу величину.

Так, наприклад, в основі фундаменту №1 об'єм пор заповнених газом до ущільнення складав 0,25. Це значення відповідає відносній деформації, при можливості максимального



ущільнення. При тиску 0,2 МПа середнє значення об'єму пор в межах глибини зони деформації знизилося на 0,12 біля 50% від максимально-можливого.

Таблиця 5 - Зміна середніх значень ємностей фазових компонентів в основах завантажених фундаментів

№ ф-ту	$p$ , кПа	№	$\Delta m$	$\Delta n$	$\Delta w$	$\Delta w_m$	$\Delta w_{ep}$	$\Delta g$
1	0,0	1.3	0,52	0,48	0,23	0,23	0,0	0,25
	200	1.4	0,57	0,43	0,30	0,24	0,06	0,13
	"+" "-"		+0,05	-0,05	+0,07	+0,01	+0,06	-0,12
2	0,0	2.6	0,53	0,47	0,27	0,23	0,04	0,20
	350	2.7	0,60	0,4	0,34	0,36	0,08	0,06
	"+" "-"		+0,07	-0,07	+0,07	+0,03	+0,04	-0,14

Примітки: 1. Ємність фазових компонентів до ущільнення: 1,3, 2.6; і після – 1.4, 2.7. 2. "+" – збільшення; "-" – зменшення.

В досліді № 2 максимальне потенційно-можливе значення відносної деформації дорівнює 0,20. При тиску під подошвою фундаменту 0,35 МПа, середнє значення відносної деформації в межах глибини зони деформації склало 0,14 при досягненні середньої щільності скелету ґрунту  $\rho_d = 1,62 \text{ г/см}^3$ , а під подошвою фундаменту - 0,19, при середній щільності скелету ґрунту  $1,7 \text{ г/см}^3$ . Середнє значення відносної деформації в межах глибини зони деформації склало 70% від максимально можливого, яке зафіксоване на позначці подошви фундаменту.

У табл. 6 наведені результати визначення характеристик стисливості ґрунтів за зміною значень щільності скелету і ємностей фазових елементів.

Таблиця 6 – Визначення залишкових деформацій, які визначені за зміною щільності скелета і фазових характеристик

№	Дослідні дані				Характеристики залишкових деформацій							
					За щільністю скелету				за фазовою моделлю			
	$p$ кПа	$s$ см	$H_a$ см	$\varepsilon$ -	$\varepsilon_n$ -	$s_n$ см	$s_v$ см	$v$ -	$\varepsilon'_n$ -	$s'_n$ см	$s'_v$ см	$v'$ -
1	0,20	22,7	125	0,18	0,086	10,8	11,9	0,26	0,12	15,0	7,7	0,17
2	0,35	38,4	162	0,24	0,123	20,0	18,4	0,24	0,14	22,7	15,7	0,20

Примітки:  $\varepsilon = s/H_a$ ;  $\varepsilon_n = 1 - \rho_d/\rho_{d,com}$ ;  $\varepsilon'_n = \Delta g - \Delta g_{com}$ ;  $s_v = s_o - s_n$ ;  $v = s_v/2s_o$

У характеристиках залишкових деформацій, які визначені за значеннями щільності скелету ґрунту не враховується вплив молекулярної вологості і ємності затисненої частини капілярної води. Застосування фазової моделі дозволяє підвищити достовірність їх визначення.

### Висновки

- Ємність газу, що заповнює вільну частину пор, є максимально можливим значенням відносної деформації ущільнення. Її досягнення може бути обмежене затисненням газом.
- В основі дослідного фундаменту №2, потенційно можливе значення відносної деформації склало 0,20. Після закінчення випробувань на глибині близько 20 см нижче подошви

фундаменту при тиску 0,35 МПа її значення знизилося на 0,19 до 0,01 (біля 95%), а середнє значення в межах зони на 0,14 (біля 70% ).

- У лесових ґрунтах одеського регіону вагова вологість при максимальній молекулярній вологоємності на 2...3% менш вологості на межі розкочування.

### **Використана література**

1. Гольдштейн М.Н. Механические свойства грунтов / М.Н. Гольдштейн. – М.: Издательство литературы по строительству, 1971. – 368с.
2. Гольдштейн М.Н. Механические свойства грунтов / М.Н. Гольдштейн. – М. –Стройиздат, 1973. – 375с.
3. Лебедев А.Ф. Почвенные и грунтовые воды / А.Ф. Лебедев. – Издание четвертое. – Изд-во Академии Наук СССР. – М. – Л. – 1936. – 314 с.
4. Герсеванов Н.М. Теоретические основы механики грунтов и их практические применения // Н.М. Герсеванов, Д.Е. Польшин. – М.: Стройиздат, 1948. – 274 с.
5. Приклонский В.А. Грунтоведение / В.А. Приклонский. – Издание третье. – Ч.1.– М.: Госгеолитиздат, 1955. – 430 с.
6. Пономар В.С. Особенности строения и физико-механические свойства лесовых пород западного Причерноморья / В.С. Пономар, В.М. Мигуля // Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии Украины. – К.: «Будівельник», 1974. – С.10–17.
7. Тугаенко Ю.Ф. Определение характеристик уплотнения в основаниях фундаментов по изменению фаз и фазовых компонентов / Ю.Ф. Тугаенко, М.В. Марченко, Л.А. Логинова // Основы та фундаменти: Міжвідомчий науково-технічний збірник. – Вип.37. –К.:КНУБА, 2015. – С.201-210.
8. Тугаенко Ю.Ф. Развитие деформаций в основаниях фундаментов, способы их ограничения и методы оценки / Ю.Ф. Тугаенко. – Одесса: Астропринт, 2003. – 222с.

*Тугаєнко Юрій Федорович* – д-р техн. наук, професор, професор кафедри основ і фундаментів Одеської державної академії будівництва та архітектури.

*Марченко Михайло Васильович* – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри основ і фундаментів Одеської державної академії будівництва та архітектури.

*Логинова Людмила Олександрівна* – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри основ і фундаментів Одеської державної академії будівництва та архітектури.

*Тугаєнко Юрій Федорович* – д-р техн. наук, професор, професор кафедри оснований и фундаментов Одесской государственной академии строительства архитектуры.

*Марченко Михаил Васильевич* – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры оснований и фундаментов Одесской государственной академии строительства архитектуры.

*Логинова Людмила Александровна* – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры оснований и фундаментов Одесской государственной академии строительства архитектуры.

*Tugaenko Yuri* – Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Bases and foundations Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture.

*Marchenko Michael* – Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Department of Bases and foundations Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture.

*Loginova Lyudmila* – Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Department of Bases and foundations Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture.