УДК 624.131.4

**УСЛОВИЯ УПЛОТНЕНИЯ НАСЫПНОГО ГЛИНИСТОГО ГРУНТА**

**В. В. Денисенко,**

кандидат технических наук, доцент кафедры Кадастра и геоинженерии,

Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар

**П. А. Ляшенко,**

кандидат технических наук, профессор кафедры Оснований и фундаментов,

Кубанский государственный аграрный университет, г. Краснодар

тел. +7(995) 204-15-62, e-mail: [denvivi@yandex.ru](https://mail.yandex.ru/lite/compose?to=denvivi@yandex.ru)

*Испытывались пробы пылеватого суглинка в компрессионном приборе. Число циклов испытания ограничивалось условием стабилизации значений коэффициента работы упругой деформации. Предложена методика выделения упруго деформирующейся воды и воды, участвующей в неупругой деформации как фаз агрегатного состояния грунта. Установлено, что с повышением плотности грунта объемное содержание минеральных частиц и упруго деформирующейся воды увеличивается и коррелирует с плотностью скелета грунта, а объемное содержание воды, участвующей в неупругой деформации пробы, практически не изменяется.*

***Ключевые слова:*** *работа деформации, связанная вода, объемное содержание упруго деформирующейся воды, объемное содержание воды, участвующей в неупругой деформации.*

Уплотнение насыпного грунта широко применяют в практике строительства. Грунт уплотняют до максимальной плотности путем статического циклического воздействия на него катком [1]. «По мере роста числа повторностей нагрузки грунт постепенно упрочняется, т.е. величина деформации с каждым разом понижается» [2]. В лабораторном моделировании процесса уплотнения «при многократной компрессии-декомпрессии компрессионные кривые сближаются, обратимая часть деформации уменьшается от цикла к циклу, и кривые стремятся к некоторому стабилизированному положению» [3]. Эти закономерности используются при лабораторном определении максимальной плотности и оптимальной влажности грунта статической циклической нагрузкой. Значения этих величин задают для уплотнения грунта в насыпи, оставляя число циклов величиной, производной от этих величин. Поэтому и правила испытаний в компрессионных приборах не содержат обоснованных рекомендаций по определению числа циклов [2-5].

На самом деле, механическое воздействие при уплотнении, а не только физические свойства грунта, определяет свойства насыпи, и условия уплотнения должны включать его параметры, такие как давление на грунт, режим его приложения, число циклов уплотнения.

Известно, что уплотнение грунта при всестороннем сжатии «происходит за счет изменения относительного содержания в грунте различных фаз» [1]. Обычно выделяют твердую (минеральные частицы), жидкую (поровую воду) и газообразную фазы. В скелете глинистого грунта всегда есть связанная вода на поверхности минеральных частиц. Прочносвязанная вода проявляет упругость на контактах смежных частиц, слабосвязанная вода – вязкость и пластичность [1, 6-11]. Разделяя их по физико-механическим свойствам как друг от друга, так и от свободной воды, можно рассматривать их как отдельные фазы агрегатного состояния вещества [6]. Они по-разному реагируют на механическое воздействие.

Целью настоящей работы является оценка соотношения разных фаз грунта и определение критерия уплотненности в ходе уплотнения при разных значениях влажности.

**Испытание грунта циклической нагрузкой**

В наших опытах статическое приложение циклической нагрузки на пробу глинистого грунта производили путем приложения к ней в компрессионном приборе нагрузки 500 кПа в одну ступень и измерения осадки , затем разгрузки до 5 кПа, также в одну ступень, и измерения расширения пробы , где ,  − число циклов испытания пробы (рисунок 1). Между ступенями нагружения и разгружения выдерживали паузу в 5 минут, после которой измеряли деформацию пробы при индикаторами ИЧ-10 с ценой деления 0,01 мм.

Опыты проводили с одним и тем же грунтом при разных значениях весовой влажности и увеличения ее «до выделения разжиженного грунта через соединения формы» [5], что является признаком достижения оптимальной влажности. Нагружение и разгружение вели в одном режиме, до условной стабилизации значений относительного приращения работы деформации. Грунт − раздробленный пылеватый суглинок, с размерами частиц до 1,0 мм.

В конце испытания каждую пробу взвешивали, измеряли ее высоту, определяли весовую влажности методом высушивания. По данным этих измерений вычисляли плотность, влажность грунта, а также плотность скелета и пористость.

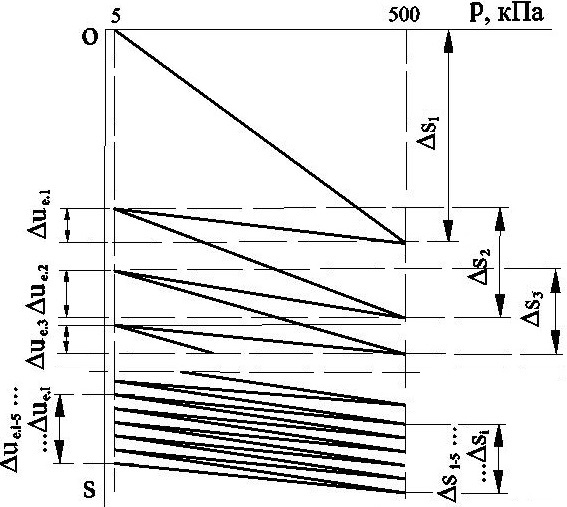


Рисунок 1 – Схема нагружения-разгружения пробы грунта

до стабилизации работы деформации

**Определение числа циклов испытания**

По данным измерений нагрузки и деформаций проб рассчитывали [12] механическую работу объемной деформации уплотнения, включающей упругую  и неупругую части , в расчете на единицу объема грунта в -ом цикле:

, (1)

 . (2)

Работу упругой деформации рассчитывали по упругому расширению по формуле (3).

, (3)

где  и  − осадка и упругое расширение пробы;  и  − высота пробы грунта после уплотнения и упругого расширения в -м цикле нагружения-разгружения, мм (рисунок 1);  – разность начального и конечного значений давления в цикле нагружения-разгружения, принятая постоянной для всех циклов всех проб одного и того же грунта с различной влажностью, кПа.

Введем коэффициент работы упругой деформации грунта:

 , (4)

Опыты показали, что коэффициент работы упругой деформации увеличивается с увеличением числа циклов нагружения-разгружения, стремясь к предельному значению (рисунок 2), где  − полное число циклов для грунта данной влажности.

Рисунок 2 – Изменение коэффициента работы упругой деформации при увеличении

числа циклов нагружения-разгружения пробы № 1

Стабилизация  свидетельствует о достижении максимальной плотности грунта при данной влажности после нескольких циклов нагружения-разгружения. Полное число циклов  может быть разным при разных значениях влажности, но оно должно обеспечивать выполнение общего для них критерия уплотнения. Оценка уплотнения пробы произведена по коэффициенту вариации значений  в последних 6-ти циклах: от  до  (рисунок 2). Условием достаточного уплотнения грунта может быть ограничение коэффициента вариации в последних шести циклах, например, значением 15 %:

. (5)

**Расчеты объемного содержания фаз грунта**

Представим объем минеральной части пробы грунта в виде суммы объемов:

, (6)

где , ,  и  − объем пробы, объемы минеральных частиц без водных оболочек, оболочек упруго деформирующейся воды, воды, участвующей в неупругой деформации, соответственно;  − пористость грунта, вычисленная после высушивания пробы.

Предположим, что объем упруго деформирующейся воды пропорционален объему минеральных частиц (7), а объем воды, участвующей в неупругой деформации, пропорционален сумме объемов минеральных частиц и упруго деформирующейся воды (8):

, (7)

. (8)

Из уравнений (6)-(8) можно вычислить [12] объемное содержание в грунте минеральных частиц без водных оболочек , упруго деформирующейся воды  и воды, участвующей в неупругой деформации :

, (9)

, (10)

, (11)

а также объемное содержание свободной воды :

, (12)

где – влажность пробы грунта после -го цикла нагружения-разгружения; − плотность воды; − плотность минеральных частиц, покрытых пленкой прочносвязанной воды.

При стандартном уплотнении плотность скелета грунта увеличивается с увеличением влажности, соответственно, увеличивается объемное содержание минеральных частиц без водных оболочек и свободной воды (рисунок 3). Объемное содержание упруго деформирующейся воды также увеличивается (рисунок 4), согласно сделанному предположению (7). Объемное содержание воды, участвующей в неупругой деформации остается неизменным, что отражает проявление взаимно противодействующих тенденций: уменьшения ширины микропор и увеличения их суммарной площади [11, 13].

Рисунок 3 – Изменение объемного содержания минеральных частиц

без водных оболочек  и свободной воды 

Рисунок 4 – Изменение объемного содержания упруго деформирующейся

воды и воды, участвующей в неупругой деформации, 

**Выводы**

При уплотнении насыпного грунта статической циклической нагрузкой относительное приращение работы упругой деформации увеличивается, по мере увеличения числа циклов, и асимтотически стремится к предельному значению. Условие приближения к асимптоте − объективный показатель, который может служить критерием достаточного уплотнения грунта и необходимого для этого числа циклов стандартного воздействия на пробу.

Предельное значение относительного приращение работы упругой деформации использовано для расчета фаз агрегатного состояния грунта. Выделены фазы минеральных частиц, упруго деформирующейся воды, воды, участвующей в неупругой деформации, и свободной воды. На примере уплотнения пылеватого суглинка получено, что объемное содержание минеральных частиц, упруго деформирующейся воды и свободной воды увеличивается с увеличением значений влажности проб, а объемное содержание воды, участвующей в неупругой деформации, − практически не изменяется.

Таким образом, определена связь работы деформации пробы грунта с работой деформации упруго деформирующейся воды и воды, участвующей в неупругой деформации, а также предложена методика оценки их объемного содержания.

*Л****итература:***

1. Гольдштейн М.Н. Механические свойства грунтов. – М.: Стройиздат, 1971. – 368 с.
2. Гончарова Л.В. Основы искусственного улучшения грунтов. – М.: МГУ, 1973. – 376 с.

3. Руководство по геотехническому контролю за подготовкой оснований и возведением грунтовых сооружений в энергетическом строительстве. РД 34 15.073-91. Л.: ВНИИГидротехники им. Б.Е. Веденеева, 1991. – 434 с.

4. Методические рекомендации по опробованию лессовых грунтов. – М.: ЦНИИС Минтрансстроя СССР, 1982.

5. Трофимов В.Т., Королёв В.А., Вознесенский Е.А. и др. Грунтоведение. – М.: МГУ, 2005. – 1024 с.

6. Гольдштейн М.Н. Механические свойства грунтов: Основные компоненты грунта и их взаимодействие. – М.: Стройиздат, 1973. – 376 с.

7. Гольдштейн М.Н. Механические свойства грунтов: Напряженно-деформативные и прочностные характеристики. – М.: Стройиздат, 1979. – 304 с.

8. Злочевская Р.И. Связанная вода в глинистых грунтах. – М.: МГУ, 1969. – 176 с.

9. Кульчицкий Л.И., Усьяров О.Г. Физико-химические основы формирования свойств глинистых пород. – М.: Недра, 1981. – 178 с.

10. Нерпин С.В., Чудновский А.Ф. Физика почвы. – М.: Наука, 1967. – 584 с.

11. Осипов В.И., Соколов В.Н., 2013. Глины и их свойства. Состав, строение и формирование свойств. – М.: ГЕОС, 2013. – 576 с.

12. Патент на изобретение РФ № 2699554, G01N 33/24. Способ определения максимальной плотности и оптимальной влажности грунта / П.А. Ляшенко, В.В. Денисенко и др. // Изобретения. Полезные модели, 2019, № 25.

13. Ляшенко П.А., Денисенко В.В. Исследование грунтов методом постоянно возрастающей нагрузки. – Краснодар, КубГАУ, 2018. – 189 с.

V.V. DENISENKO, P.A. LYASHENKO

***THE CONDITIONS OF COMPACTION OF BULK CLAY SOIL***

*Dusty loam samples were tested in a compression device. The number of test cycles was limited by the condition of stabilization of the values ​​of the coefficient of work by elastic deformation. A technique is proposed for isolating elastically deforming water and water participating in inelastic deformation as phases of the state of aggregation of soil. It was found that with an increase in soil density, the volumetric content of mineral particles and elastically deforming water increases and correlates with the density of the skeleton of the soil, and the volumetric content of water involved in inelastic deformation of the sample practically does not change.*

***Keywords:*** *work of deformation, bound water, volumetric content of elastically deforming water, volumetric content of water involved in inelastic deformation*