

## ВПЛИВ ВОЛОГОЄМНОСТІ ЛЕСОВИХ ҐРУНТІВ НА ПРОЦЕСИ ЇХ УЩІЛЬНЕННЯ УДАРНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

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

*У статті розглянуті можливі види і стан води і газу в лесових ґрунтах, а також виконана оцінка їх вологоємності і газоємності. Показана залежність ущільнення від зміни фазових співвідношень ґрунтового середовища. Виконані узагальнення та аналіз впливу фізичних показників лесових ґрунтів і коефіцієнту водонасичення, як базового, на кількісні та якісні параметри процесу їх ущільнення.*

**Ключові слова:** ударне навантаження, ущільнення, фазові співвідношення, щільність скелету, вологість, вологоємність

## ВЛИЯНИЕ ВЛАГОЕМКОСТИ ЛЕССОВЫХ ГРУНТОВ НА ПРОЦЕССЫ ИХ УПЛОТНЕНИЯ УДАРНОЙ НАГРУЗКОЙ

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

*В статье рассмотрены возможные виды и состояние воды и газа в лессовых грунтах, а также выполнена оценка их влагоемкости и газоёмкости. Показана зависимость уплотнения от изменения фазовых соотношений грунтовой среды. Выполнены обобщение и анализ влияния физических показателей лессовых грунтов и коэффициента водонасыщения, как базового, на количественные и качественные параметры процесса их уплотнения.*

**Ключевые слова:** ударная нагрузка, уплотнение, фазовые соотношения, плотность скелета, влажность, влагоемкость.

## INFLUENCE OF MOISTURE CONTENT OF LOESS SOILS PROCESSES OF THEIR SEALS SHOCK LOAD

Y. Tugaenko, M. Marchenko, L. Loginova

*In the article studies the possible types and condition of the water and gas in the loess soils, as well as the estimates of their water capacity and gas-saturations. It also shows the correlation between the sealing and changes in soil phase ratio. The generalization and analysis of the influence of loess soils physical parameters and water saturation ratio as the basis on quantitative and qualitative parameters of the process of soils sealing carried out.*

**Keywords:** shock load, seal, phase ratio, the density of the skeleton, humidity, moisture content.

### Вступ

У будівельній практиці для ущільнення просідаючих ґрунтів широко застосовуються важкі трамбівки. У загальному випадку ґрунтове середовище є трифазною системою. На процеси ущільнення, при інших рівних умовах, впливають склад, стан і вид ґрунтів, їх фізичні характеристики, структурна міцність, вода і газ, що заповнюють пори і ін. При цьому визначальними є фазові співвідношення ґрунтового середовища.

Метою роботи є дослідження впливу фазових співвідношень і, зокрема, вологоємності лесових ґрунтів на параметри процесу його ущільнення ударним навантаженням.

Вплив фазових співвідношень на процеси ущільнення. Ущільнення або скорочення обсягу пор ґрунту супроводжується витисненням з них газу і води. Можливість їх видалення в процесі ущільнення скорочується і викликає, в свою чергу, зниження газо- і водопроникності. На проникність ґрунтів впливають такі фактори, як: вологоємність, гранулометричний склад, форма і розмір часток скелету, зміна щільності і вологості і ін. Класифікацію вологоємності для лесових ґрунтів можна представити умовною схемою, наведеною на рис. 1:

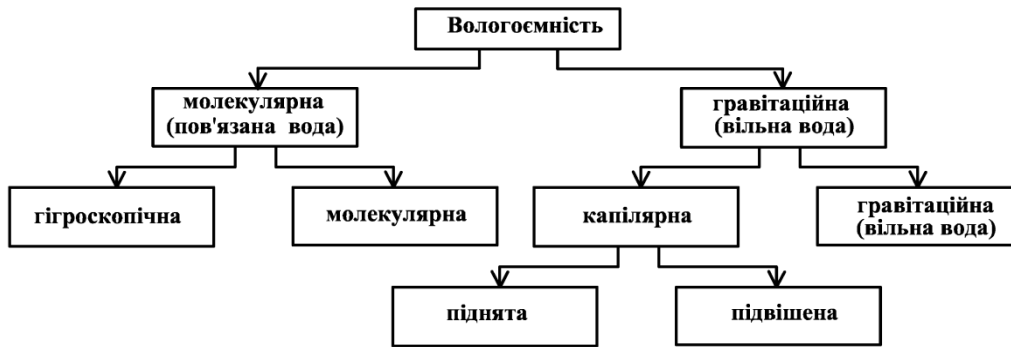


Рисунок 1 – Класифікація вологоємності ґрунтів

*Порова вода.* Її стан і вплив на процеси ущільнення. Вода, що знаходиться в порах ґрунту, може бути молекулярно-зв'язаною і вільною (гравітаційною). Її кількість оцінюється вологістю і вологоємністю, яка визначається коефіцієнтом водонасичення. При наявності тільки молекулярно-зв'язаної води глинистий ґрунт може знаходитися в твердому і напівтвердому стані. Вільна вода визначає його пластичний та текучий стан. На підставі результатів експериментальних досліджень, класифікація ґрунтових вод вперше запропонована А.Ф. Лебедєвим [1].

*Молекулярна вологоємність.* Кількість молекулярно-зв'язаної води оцінюється максимальною молекулярною вологоємністю. Навколо кожної мінеральної частинки її електростатичним полем утримуються плівки міцно- і пухкозв'язаної води, які не видаляються в процесі ущільнення і зберігаються в ущільненому ґрунті.

В лесових ґрунтах плівка міцнозв'язаної води визначає гігроскопічну вологоємність. Її товщина, за різними даними, коливається від одного до 15...20 рядів молекул води, розмір якої становить 0,276 нм (нанометра). Максимальна гігроскопічна вологоємність може досягати величини 8,0%.

Пухкозв'язана (плівкова) вода утримується електромолекулярними силами зчеплення. Вона не може бути видалена механічним шляхом. Її товщина, за опублікованими матеріалами, змінюється від 20...30 рядів молекул води до декількох сотень. Максимальна молекулярна вологоємність у лесів може досягати значення 16 %. Товщина плівок для лесових ґрунтів не є стабільною, а безперервно коливається в залежності від змін, що відбуваються в зоні аерації [2, 3, 4].

*Капілярна вологоємність.* Її значення визначається кількістю води, що міститься в капілярній каймі. Для лесових супісків капілярне водонасичення відбувається при вологості, що перевищує максимальну молекулярну вологоємність ( $w > 0,16$ ;  $Sr > 0,44$ ).

### Результати досліджень

А.Ф. Лебедєвим виділено два види капілярної води: капілярно-піднята і капілярно-підвішена. Капілярно-піднята утворює капілярну кайму над рівнем підземних вод. В її межах насичення пор водою знижується до покрівлі. В наших дослідженнях висота капілярної кайми в лесових ґрунтах досягала 3,5...4,0 м. Визначення характеристик фізичного стану лесового супіску в межах капілярної кайми на ділянці будівництва целюлозно-паперового комбінату, розташованого на першій надзаплавній терасі, в 200 м від лівого берега р. Дунай в Ізмаїльському районі, свідчать про зниження капілярної вологоємності над рівнем підземних вод. Зафіксовано зменшення коефіцієнту водонасичення від 0,97 біля рівня підземних вод до 0,71 м на відстані 2,0...3,0 м вище його позначки [5, 6].

Капілярно-підвішена вода з'являється в зоні аерації як результат атмосферних опадів, або накопичується внаслідок господарської діяльності: зрошення, витoki з водонесучих комунікацій та ін.

Випробування фундаментних конструкцій в умовах замочування створює локальну зону капілярно-підвишеного зволоження. Місцеве обводнення основи дослідних фундаментних конструкцій утворює під ними ґрунтові масиви з капілярно-підвищеною водою. На одному з майданчиків в м. Одесі виконані дослідження з визначення характеристик опору ґрунтів при випробуванні буронабивної палі в умовах локального замочування її основи. Паля випробувана тричі з інтервалами між випробуваннями 37 і 29 діб. Перед першим випробуванням замочування

тривало 3 тижні з витратою води близько 80 м<sup>3</sup>. Перед другим і третім - тривалість замочування склала по два тижні з витратою води відповідно близько 45 і 40 м<sup>3</sup>. При загальній витраті води рівній 165 м<sup>3</sup> значення коефіцієнту водонасичення за глибиною коливалися від 0,76 до 0,84 [7].

При випробуваннях дослідних фундаментів, в умовах тривалого замочування їх основ, середнє значення коефіцієнта водонасичення не перевищувало 0,75. Так, в дослідженнях процесів деформування ґрунтів в основі дослідного фундаменту площею 1,0 м<sup>2</sup> при тривалості безперервного замочування протягом 36 діб, вологість в середньому підвищилася від 0,17 до 0,24, що відповідає зміні коефіцієнта водонасичення від 0,49 до 0,69 [5].

До вільної (гравітаційної) відноситься вода, що знаходиться в порах, і переміщається під дією сили тяжіння. В основному, це вода в крупних порах, тріщинах і порожнинах. Під впливом сили тяжіння вона може переміщатися в порах – рухома вільна вода, або знаходитися в замкнених пустотах і порах – нерухома. За певних умов вона переходить в капілярний стан [1]. В лесових породах з високою пористістю (до 50...55%), вільна вода в порах спостерігається, як правило, нижче рівня підземних вод.

*Газова складова обсягу пор.* Вплив газової складової залежить від складу і стану ґрунтового середовища, що визначають її газо- і водопроникність. Процес ущільнення супроводжується зменшенням об'єму пор, наслідком якого є витиснення газу, а також його часткове защемлення і стиснення. Кількість газу, що заповнює пори ґрунтового середовища, надалі будемо називати газоємністю.

Витиснення газу в процесі ущільнення ґрунту залежить від його газопроникності, на значення якої впливають форма і розмір частинок, щільність скелету і вологоємність. При рівній вологості газопроникність знижується при зменшенні розміру частинок. При розмірі часток менше 0,5 мм газопроникність практично зникає при вологості рівній 20...30% об'єму пор [3].

*Вплив газо- і вологоємності на процеси ущільнення ударним навантаженням.* Особливістю ударного навантаження є умовно-миттєва її передача на ущільнену поверхню. При короткочасному ударному імпульсі відбувається скорочення обсягу пір при взаємному переміщенні частинок ґрунту в результаті руйнування структурних зв'язків на контактах мінеральних часток.

Наслідком скорочення обсягу пор є витиснення з них води і газу. Вода практично нестислива, а газ стискається. При кожному ударному імпульсі відбувається стиснення газу. Його видалення із пор залежить від газопроникності породи, яка знижується з підвищенням щільності і вологості. В процесі зниження газо- і водопроникності стиск затисненого газу створює додатковий тиск на порову воду, сприяючи її витисненню. Зниження проникності ґрунту обмежує скорочення обсягу пор. В табл. 1 і на рис. 2 наведені узагальнені нами результати опублікованих досліджень визначення впливу початкової вологоємності лесових ґрунтів на характеристики ущільнення.

Таблиця 1 – Характеристики стану ґрунтів до і після ущільнення важкими трамбівками

№№	Місто	Індекс	Характеристики стану ґрунтів						$P_{mp}$ , кПа	Джерела	
			до ущільнення			після ущільнення					
			$w$ , д.о.	$\rho_d$ , г/см <sup>3</sup>	$S_r$ , д.о.	$\rho_d$ на глибині, м					$S_r$ , д.о.
						0,0	0,5	серед.			
1	Грозний	1	0,175	1,42	0,53	1,73	1,68	1,61	0,85	16	[11]
2	Волжський К-А Волгоградськ. обл. К-Б	2.1	0,105	1,53	0,36	-	1,87	1,78	0,74	15,1	[9, 13]
		2.2	0,106	1,65	0,36	-	2,03	1,86	0,98	15,1	
3	Тольяті	3	0,105	1,53	0,37	1,98	1,83	1,76	0,91	25	[8]
4	Ізмаїл, відм.5,0 Одеськ. обл, відм.4.3.	4.1	0,20	1,39	0,69	1,68	-	1,61	0,88	15	[6]
		4.2	0,22	1,37	0,70	1,73	-	1,57	1,0	15	
5	Набережні челни	5	-	1,54	-	1,87	1,82	1,75	-	29,2	[10]
6	Нафтотермінал Одеськ. обл.	6.1	0,14	1,44	0,48	1,82	-	1,74	0,8	27,6	[9; 13]
		6.2	0,11	1,40	0,34	2,04	-	1,78	1,0	27,6	
		6.3	0,12	1,40	0,34	1,90	-	1,84	0,79	48,0	
7	Ростов на Дону Волгодонськ	7.1	0,145	1,42	0,41	1,90	1,87	1,78	0,93	20	[12]
		7.2	0,165	1,48	0,53	1,80	1,75	1,72	0,89	20	

Примітка: глибина визначення показана від позначки ущільненої поверхні, а середнє значення – в межах глибини зони ущільнення

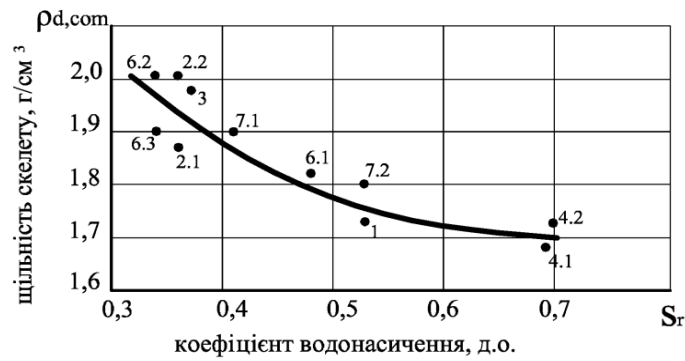


Рисунок 2 – Залежність максимального значення щільності скелету ущільненого ґрунту від коефіцієнту його водонасичення. Цифрами показані індекси із таблиці 1

При ущільненні ґрунту з вологістю, що не перевищує максимальної молекулярної вологоємності, висока газопроникність забезпечує видалення газу в процесі ущільнення. Обсяг зв'язаної води зберігається. В результаті ущільнення максимальні значення щільності скелета на позначці покривлі ущільненого масиву досягають значень 1,9 ... 2,0 г/см<sup>3</sup>.

З підвищенням капілярної вологоємності при  $S_r = 0,4...0,55$  знижується газопроникність і з'являється затиснений газ, що перешкоджає максимальному ущільненню. В цьому інтервалі максимальні значення щільності скелета досягають 1,75...1,85 г/см<sup>3</sup>. При коефіцієнті капілярної водонасиченості  $S_r$  в інтервалі від 0,55 до 0,7 максимальні значення щільності скелета після ущільнення не перевищують 1,75 г/см<sup>3</sup>.

Підвищення капілярної вологоємності призводить до зміни таких параметрів ущільненого ґрунту, як структурна міцність, водо- і газопроникність. Наявність капілярної води сприяє прояву гідравлічних імпульсів в поровій воді при кожному ударі трамбування, які руйнують структурні зв'язки між мінеральними частинками. Защемлення і стиснення газу обмежує скорочення обсягу пор. В результаті виникають поперечні деформації, які є наслідком зміни форми ущільненого обсягу. Пониження ущільненої поверхні є наслідком двох процесів: ущільнення і поперечного розширення.

В табл. 2 наведені результати визначення впливу зміни вологості на параметри процесу ущільнення лесових ґрунтів.

Таблиця 2 – Вплив вологості на параметри ущільненого ґрунту

Індекс	w, д.о.	s <sub>com</sub> , см	H <sub>y</sub> , м	H <sub>com</sub> , м	ρ <sub>d</sub> , г/см <sup>3</sup>	ρ <sub>d,com</sub> , г/см <sup>3</sup>	ε, д.о.	ε <sub>n</sub> , д.о.	s <sub>n</sub> , см	s <sub>n</sub> / s <sub>com</sub> д.о.	s <sub>v</sub> , см	v, д.о.
1	0,175	43	2,2	1,77	1,42	1,61	0,195	0,118	26	0,60	17	0,20
4.1	0,20	64	2,5	1,86	1,40	1,55	0,256	0,097	24	0,38	40	0,31
6.2	0,115	69	3,45	2,76	1,41	1,72	0,20	0,18	62	0,90	7	0,05
7.2	0,116	52	3,70	3,18	1,48	1,70	0,141	0,13	48	0,92	4	0,04

Примітки: w; ρ<sub>d</sub>; ρ<sub>d,com</sub> – середні значення вологості і щільності скелета ґрунту до і після ущільнення, в межах глибини ущільнення; s<sub>com</sub> – пониження ущільненої поверхні – осідання в результаті ущільнення; ε = s<sub>com</sub> / H<sub>y</sub> – загальна відносна деформація; H<sub>y</sub> - глибина ущільнення; H<sub>com</sub> – потужність ущільненого ядра; ε<sub>n</sub> = 1 - ρ<sub>d</sub> / ρ<sub>d,com</sub> – відносна деформація ущільнення; s<sub>n</sub> = ε<sub>n</sub> · H<sub>y</sub> – частина осідання внаслідок ущільнення; s<sub>v</sub> = s<sub>com</sub> - s<sub>n</sub> – частина осідання, викликана поперечним розширенням; v = s<sub>v</sub> / 2s<sub>com</sub> – коефіцієнт поперечного розширення.

При вологості менше максимальної молекулярної вологоємності (близько 16 % для лесових ґрунтів) плівка зв'язаної води навколо частинок не впливає на процеси ущільнення, які супроводжуються зниженням пористості. Висока газопроникність сприяє вільному видаленню газу із пор ґрунту. Ущільнення відбувається переважно під площею підшви трамбівки (близько 90 %) з незначним поперечним розширенням (індекси 6.2 і 7.2 табл. 2).

При наявності гравітаційної (капілярної) вологоємності з її збільшенням підвищується вплив мікрогідралічних імпульсів в порах ґрунту, викликаних ударом від падіння трамбівки. Наявність капілярної вологоємності знижує газо- і водопроникність ґрунтів, сприяючи значному підвищенню внутрішньопорового тиску. В ущільненому обсязі, поряд з ущільненням, з'являються деформації поперечного розширення. Так при оптимальній вологості (1, табл. 2) - 60% величини загального зниження ущільненої поверхні є наслідком ущільнення, а 40 % – результат поперечного розширення. При 20 % - відповідно 38 і 62 % (4.1. Табл. 2).

### Висновки

- На процеси динамічного ущільнення лесових ґрунтів впливає їх вологоємність.
  - При вологості рівної або менше максимальної молекулярної вологоємності ущільнення відбувається, переважно, під площею підшви трамбування (до 90 % від об'ємного осідання) при незначному поперечному розширенні ущільненого обсягу.
  - Максимальна щільність скелету ґрунту може досягати величини  $2 \text{ г/см}^3$ , при середньому значенні в межах ущільненого ядра близькому  $1,7 \text{ г/см}^3$ .
- Наявність гравітаційної (капілярної) вологоємності знижує можливість ущільнення. Виникають поперечні деформації, що зростають із підвищенням вологості, що є наслідком зміни форми ущільненого обсягу.
  - При вологості 0,175, отриманої після попереднього зволоження, максимальна щільність скелету після ущільнення склала  $1,72 \text{ г/см}^3$  при середньому значенні  $1,61 \text{ г/см}^3$ . При вологості 0,20 - відповідно  $1,61$  і  $1,55 \text{ г/см}^3$ .
  - Зниження поверхні ущільненого ґрунту за рахунок зменшення пористості при його вологості 0,12 склало 90 % від загальної величини зниження. Збільшення вологості ґрунту змінює це співвідношення, відповідно: 0,175 – 60 % і 0,20 – 38 %.

### Використана література

1. Лебедев А. Ф. Почвенные и грунтовые воды / А. Ф. Лебедев. – Издание четвертое. – Издательство 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. – М.: Госгеолиздат, 1955. – Часть первая. – 430 с.
4. Бабков В. Ф. Основы грунтоведения и механики грунтов / В. Ф. Бабков, А. В. Гербурт-Гейбович. – Издание второе. – М.: Высшая школа. – 1964. – 366 с.
5. Тугаенко Ю.Ф. Исследования деформаций в основаниях опытных фундаментов в лёссовых грунтах первого типа / Ю. Ф. Тугаенко // Основания, фундаменты и подземные сооружения. – Сб. научн. раб. – Выпуск 2. М.: Высшая школа. – 1967. – С. 39 – 49.
6. Тугаенко Ю. Ф. Некоторые особенности уплотнения просадочных грунтов тяжелыми трамбовками / Ю. Ф. Тугаенко // Основания и фундаменты. – К.: Будівельник. – 1969. – Выпуск 2. – С. 99 - 103.
7. Тугаенко Ю. Ф. Методика и результаты исследований сопротивления грунтов нагрузке, приложенной к буронабивной свае / Ю. Ф. Тугаенко, А. П. Ткалич, А. Р. Гевондян // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Выпуск 18. – Одеса, 2005. – С. 260-264.
8. Галицкий В. Г. Опыт уплотнения лёссовых просадочных грунтов на строительстве в г. Тольятти / В. Г. Галицкий, И. Н. Круглов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1970. – № 4. – С. 17 - 19.
9. Тугаенко Ю. Ф. Опыт уплотнения просадочных грунтов на объектах Одесского морского нефтеперевалочного комплекса "Терминал"/ Ю. Ф. Тугаенко, В. А. Поберий, Л. И. Зильбер. – Будівництво України. – 1998. – № 4. – С. 34 - 36.
10. Уплотнение просадочных грунтов / Крутов В. И., Галицкий А. Г., Мусаэлян А. А. [и др.]; под ред. В. И. Крутова. – М.: Стройиздат. – 1974. – 207 с.
11. Швец В. Б. Исследование эффективности уплотнения лёссовых грунтов тяжелыми трамбовками / В. Б. Швец // Сборник трудов совещания по строительству на лёссовых грунтах. – Киев, 1960. – С. 261 - 273.
12. Зотов В. А. Уплотнение лессовых грунтов Ростовской области трамбовками повышенной

массы / В. А. Зотов, О. Е. Приходченко, Н. В. Воляник [и др.] // Закрепление и уплотнение грунтов в строительстве. Тезисы докладов на X Всесоюзном научно-техническом совещании. - М: Стройиздат. – 1983. – С.142 – 143.

13. Тугаенко Ю. Ф. Развитие деформаций в основаниях фундаментов, способы их ограничения и методы оценки / Ю. Ф. Тугаенко. – Одесса: Астропринт, 2003. – 222 с.

**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.

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

**Тугаенко Юрий Федорович** – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры оснований и фундаметов Одесской государственной академии строительства и архитектуры.

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

**Логинова Людмила Александровна** - канд. техн. наук, инженер, доцент кафедры оснований и фундаметов Одесской государственной академии строительства и архитектуры.

**Tugaenko Yuri F.** - Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Bases and foundations Odessa state academy of civil engineering and architecture.

**Marchenko Michael V.** - Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Department of Bases and foundations Odessa state academy of civil engineering and architecture.

**Loginova Lyudmila A.** - Cand. Sc. (Eng.), Engineer, Assistant Professor of the Department of Bases and foundations Odessa state academy of civil engineering and architecture.