

**Т. В. Кріль**

## **ЗМІНИ МІЦНІСНИХ ТА ДЕФОРМАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ ҐРУНТІВ ПРИ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ НА ЗАБУДОВАНИХ ТЕРИТОРІЯХ**

**T. V. Kril**

### **CHANGES OF STRENGTH AND DEFORMATION INDEXES OF GROUND AT DYNAMIC LOADINGS ON BUILT-UP TERRITORIES**

В умовах щільної міської забудови ґрунти перебувають під впливом статичних і динамічних навантажень, що приводить до змін їхніх фізико-механічних властивостей. Приведені відомості з дослідження змін міцнісних показників ґрунтів при техногенних динамічних навантаженнях. Розглянуто вплив коефіцієнта пористості й вологості на зміну зчеплення й кута внутрішнього тертя зв'язаних ґрунтів. Дано узагальнені результати змін властивостей основних компонентів геологічного середовища території м. Київ.

*Ключові слова:* ґрунти, динамічний вплив, зчеплення, кут внутрішнього тертя, вологість.

В условиях плотной городской застройки ґрунты находятся под влиянием статических и динамических нагрузок, что приводит к изменениям их физико-механических свойств. Приведены сведения по исследованию изменения прочностных показателей ґрунтов при техногенных динамических нагрузках. Рассмотрено влияние коэффициента пористости и влажности на изменение сцепления и угла внутреннего трения связанных ґрунтов. Даны обобщенные результаты изменений свойств основных компонентов геологической среды территории г. Киев.

*Ключевые слова:* ґрунты, динамическое воздействие, сцепление, угол внутреннего трения, влажность.

In the conditions of dense city building ground are under influence of the static and dynamic loadings, that results in the changes of their physical-mechanical properties. Research of changes of strength indexes of ground at the technogenetic dynamic loadings are resulted. Influence of porosity factor and humidity on the change of cohesion and angle inside friction of fixed ground is considered. The generalized results of property changes of basic components of geological environment of Kyiv territory are given.

*Keywords:* ground, dynamic influence, cohesion, angle inside friction, humidity.

#### **ВСТУП**

На урбанізованих територіях спостерігається зростання кількості та різноманітності джерел, які створюють динамічні впливи на ґрунти основ (збільшення транспортних потоків — як наземних, так і підземних), широке розповсюдження будівельних робіт (улаштування паль, ущільнення трамбуванням, застосування будівельних механізмів із вібраційною дією). Серед них найбільший внесок у вібраційний фон міста реалізується рухом транспорту [5].

В місцях дії навантажень динамічного характеру відбувається генерування деформацій ґрунтової системи та виникнення переміщень, що являє собою деякий процес. Маси частинок ґрунту у процесі деформування набувають прискорень, це призводить до того, що на ґрунтові частинки діють додаткові сили — сили інерції, і в масиві ґрунту виникають коливання.

Рівень вібрації як процесу розповсюдження коливань у ґрунтовому середовищі визначається амплітудами коливань і спектральним складом. Найбільших прискорень ґрунтові частинки

набувають при таких домінуючих частотах: біля автомагістралі — 10–20 Гц; залізниці — 10–30 Гц; метрополітену (наземного, підземного) — 30–60 Гц; трамвайної колії — 20–45 Гц.

Наслідками впливу техногенних динамічних навантажень на геологічне середовище є зміни фізико-механічних властивостей ґрунтів та порушення рівноважного стану у ґрунтовому масиві, зниження його стійкості як основ та вміщуючого середовища інженерних споруд.

Зміни властивостей ґрунтів як компонента геологічного середовища разом з існуючими інженерно-геологічними умовами можуть спричинити активізацію інженерно-геологічних процесів (провали, зсуви та ін.) [5].

Утворення значних осідань фундаментів, а також занурення в ґрунт паль, шпунта тощо під дією динамічних навантажень може відбуватися не тільки через ущільнення ґрунту, але також внаслідок зменшення його міцності, через зменшення сил тертя і зчеплення, діючих між частинками ґрунту. Частинки ґрунту набувають рухливості, і ґрунт за своїми механічними влас-

тивостями стає схожим на в'язку рідину. Зменшення сил тертя і зчеплення, таким чином, приводить до зменшення опору ґрунту зовнішнім навантаженням.

Для вивчення властивостей ґрунтів при динамічних навантаженнях досліді проводять переважно у лабораторних умовах, де ґрунти піддають дії вібрації у вільно відсипаному стані або у спеціальних приладах, які дозволяють змінювати вологість ґрунтів та додавати зовнішнє привантаження. При експериментальних дослідях у польових умовах вібрація на ґрунт передаються за допомогою потужних віброштампів та віброплатформ.

Під динамічними властивостями розуміють групу фізико-механічних властивостей ґрунтів, які визначають їх реакцію на динамічні навантаження. Для кількісної характеристики динамічних властивостей ґрунтів застосовують дві достатньо широкі групи показників [3].

Основними показниками міцнісних та деформаційних властивостей ґрунтів, які використовуються у будівельних розрахунках і визначають міцність основ під забудовою, є кут внутрішнього тертя, зчеплення та модуль деформації. Вивченням змін міцнісних та деформаційних властивостей ґрунтів при різних типах динамічних навантажень займалися Д. Д. Баркан, Г. І. Чорний, О. О. Вовк, В. Г. Кравець, Н. Д. Красніков, В. Н. Кутергін та ін.

#### ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

На урбанізованих територіях ґрунти основ будівель і споруд знаходяться в умовах особливого напружено-деформованого стану. Особливість полягає у сумарній дії багатьох типів навантажень та впливів, основні з яких такі: статичні навантаження від ваги вище розташованих споруд, вага ґрунтової товщі, навантаження та динамічні впливи при новому будівництві на суміжних ділянках, підняття або зниження рівня підземних вод, вплив підземних споруд (метрополітен, підземні переходи), динамічні навантаження при експлуатації метрополітену.

Ґрунти природних основ під тривалою дією статичних навантажень від ваги міських будівель та споруд змінюють свою структуру та фізико-механічні властивості. Відбуваються такі техногенні зміни: збільшується щільність, модуль деформації, кут внутрішнього тертя, питоме зчеплення, зменшується вологість, пористість, коефіцієнт пористості, показник текучості.

Найчастіше активізація інженерно-геологічних процесів (зсуви, значні нерівномірні осідання), спричинена спільною дією статичного та динамічного навантажень, спостерігається в тих випадках, коли у якості основ виступають незв'язні ґрунти — піски, навіть із невеликою пористістю. Статичні випробування таких ґрунтів пробними навантаженнями або у компресійному приладі показують, що вони мають значний опір, набагато більший, ніж у зв'язних ґрунтів, типу вологих глин. Тому піски середньої й вище середньої щільності вважаються міцним видом природних основ. Однак при одночасній дії статичних та динамічних навантажень піски та аналогічні до них незв'язні ґрунти, як це показує практика промислового будівництва, можуть істотно зменшити опір зовнішнім навантаженням.

Фізичні процеси, що обумовлюють зміну властивостей ґрунту при динамічних навантаженнях, зокрема зменшення опору навантаженням, дотепер чітко не з'ясовані.

При дії вібрацій виникаючі в ґрунті фізичні явища спричиняють зменшення сил тертя і зчеплення в ньому.

Очевидно, що ущільнення незв'язного ґрунту під час вібрацій може відбуватися лише в тому випадку, якщо під дією вібрування зменшуються сили, що утримують частинки ґрунту в початковому стані рівноваги. Внаслідок зменшення цих сил при динамічних навантаженнях початкове (до вібрацій) стійке розташування частинок ґрунту порушується, вони переміщуються одна відносно іншої, прагнучи під дією сил ваги й зовнішнього навантаження зайняти нові, більш стійкі положення, в результаті чого ґрунт ущільнюється. Але між частинками ґрунту діють сили тертя і зчеплення; отже, зазначене відносне переміщення частинок ґрунту, що відбувається при ущільненні його вібруванням, може виникнути лише в результаті зменшення сил тертя й зчеплення.

На втрату ґрунтами міцності при динамічних навантаженнях впливає велика кількість взаємозв'язаних факторів. Це зовнішні (параметри динамічного впливу) — прискорення коливальних, частота; внутрішні фактори — мінеральний склад, структура, стан, фізико-хімічні властивості; третя група факторів залежить від особливостей будови масиву.

У загальному випадку, міцність знижується через руйнування структури ґрунту, що відбувається при зміщенні часток ґрунту при колюван-

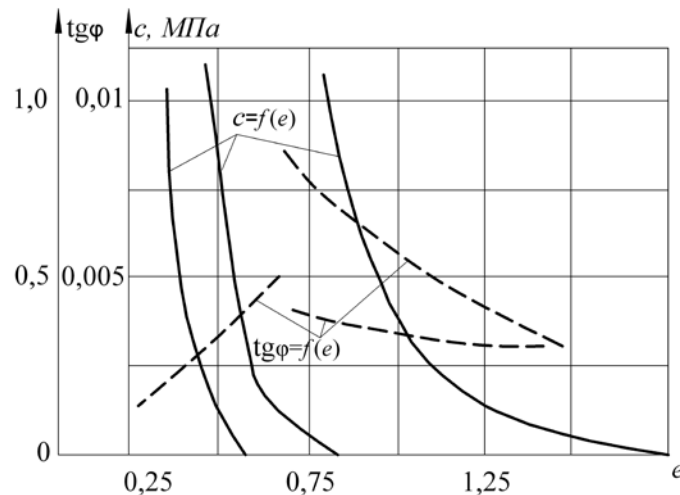


Рис. 1. Зчеплення (суцільні криві) та коефіцієнт внутрішнього тертя (штрихові криві) суглинків порушеної структури після впливу динамічних навантажень

1 — за даними випробувань на зріз; 2 — за розрахунком напружень розвантажувальної кривої

нях, збуджених джерелами динамічних навантажень.

Основними факторами, що визначають величини сил зчеплення і коефіцієнта тертя, є щільність, яка характеризується коефіцієнтом пористості ( $e$ ) і вологість ґрунтів.

Зчеплення зв'язних ґрунтів при збільшенні вагової вологості ( $W_v$ ) різко знижується (рис. 1). Характер зменшення й абсолютна величина його в кожному конкретному випадку залежать від складу, генетичних умов утворення та інших факторів, тобто для кожного типу ґрунту необхідно визначити кількісні залежності, властиві тільки йому [2, 8].

При випробуваннях на зріз зразків ґрунту — суглинків (при відносній вологості  $W_v > 0,4$ ), які раніше зазнали динамічних навантажень, у роботі [8] встановлена така закономірність зміни зчеплення залежно від величини об'ємної деформації (рис. 1). При невеликих об'ємних деформаціях (до 0,01–0,015) спостерігалось зниження зчеплення до 0,7–0,8 його первинної величини. При подальшому ущільненні ґрунту зчеплення зростало, досягаючи початкової величини при об'ємній деформації 0,02–0,025, а потім значно перевищувало її.

У сухих ґрунтах при  $W_v < 0,4$  істотного зростання зчеплення не спостерігалось. У найбільш сухих ґрунтах (при  $W_v < 0,3$ ) у міру зростання навантаження зчеплення має тенденцію до зниження до величини близької до нуля. Особливо чітко це виявляється в лесах.

У зв'язних ґрунтах збільшення щільності (зменшення коефіцієнта пористості) приводить до більш тісного зіткнення частинок. Товщина шарів води, що оточують частинки в тонкодисперсних ґрунтах, порівнянна з величиною частинок. Ці шари слугують змащенням, зменшуючи коефіцієнт внутрішнього тертя. У зв'язних ґрунтах збільшення щільності в результаті зовнішніх навантажень викликає як зниження, так і підвищення зчеплення. Логарифм зчеплення ущільнених зразків ґрунту пропорційний об'ємній масі  $\gamma$  і обернено пропорційний коефіцієнту об'ємної вологості [46].

При збільшенні пористості зчеплення різко знижується (рис. 2). Дані про зміну коефіцієнта внутрішнього тертя мають суперечливий характер: в одних випадках зменшення пористості супроводжується його зменшенням, в інших — збільшенням. У піщаних ґрунтах ця залежність також неоднозначна. При рівному ступені ущільнення у природних умовах та при зсуві може відбуватися або ущільнення, або розуміщення пісків. Збільшення вологості приводить до зниження коефіцієнта внутрішнього тертя [2, 3, 6, 7].

А. А. Баркан, порівнюючи графічні залежності величин зсуву та зусиль зсуву, отриманих при відсутності вібрації з графіками при наявності останньої, зробив висновок, що вібраційна дія суттєво впливає на опір зсуву ґрунту. В усіх дослідках при наявності динамічного впливу кут нахилу кривої «зусилля зсуву – зсув» на початку менший, ніж у дослідках без впливу вібрації.

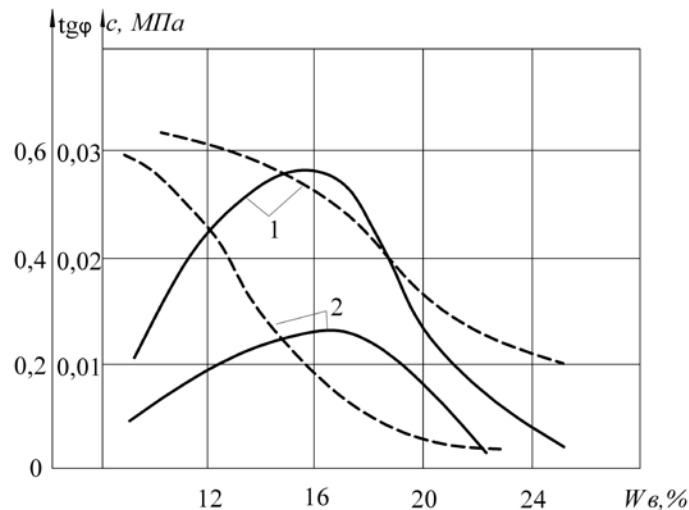


Рис. 2. Залежність величин сил зчеплення (суцільні криві) та коефіцієнта внутрішнього тертя (штрихові криві) від коефіцієнта пористості

Оскільки модуль зсуву пропорційний тангенсу кута нахилу кривої, то пружний опір зсуву ґрунту при вібруванні менший, ніж без вібрації. Так само коефіцієнт внутрішнього тертя при вібрації має нижчі значення, ніж в умовах дії тільки статичних навантажень.

Отримані А. А. Барканом залежності у роботі [1] дозволяють зробити висновок, що при збільшенні прискорень коливань величина коефіцієнта внутрішнього тертя зменшується до певної межі, яка залежить від властивостей ґрунту. До того ж у вологих ґрунтах дія динамічних навантажень у більшій мірі впливає на зменшення коефіцієнта тертя, ніж у сухих. Це можна пояснити тим, що абсолютне значення сил зчеплення між частинками піску, зволоженого до 10–12% вагової вологості, значно вищі, ніж у піску, який знаходиться у повітряно-сухому стані. При збільшенні сил зчеплення у ґрунті зменшується вплив вібрації на зміни фізико-механічних властивостей.

На забудованих територіях техногенних динамічних впливів зазнає приповерхневий шар літосфери в середньому на глибину до 20–50 м, а з урахуванням будівництва й експлуатації метрополітену, відкачувань артезіанських вод і т. п. — до глибин 100–300 м [4, 5].

Товщі такої потужності складені переважно дисперсними ґрунтами піщаних та глинистих різновидів. Вони по-різному будуть реагувати на динамічні навантаження. В залежності від параметрів навантаження та властивостей ґрунтів можна спостерігати їх ущільнення, зниження опору зсуву, руйнування структурних

зв'язків. Винятком є скельові та напівскельові породи (крім тріщинуватих та вивітрілих), властивості яких практично не змінюються при дії вібраційних хвиль, в яких через їх пружні властивості весь вплив передається від джерел через середовище на інженерні об'єкти. Водонасичені дисперсні ґрунти, навпаки, є найбільш чутливими до зовнішніх динамічних навантажень, в них можуть проявлятися різні специфічні явища.

У геологічному середовищі території м. Київ основними компонентами є четвертинні відклади. Породи старшого віку використовуються в місцях, де четвертинні відклади відсутні або їх потужність незначна — 2–5 м; при висотному будівництві, де котловани розробляють на всю потужність четвертинного покриву; при проведенні трас метрополітену глибокого закладання. Відмітною особливістю цих відкладів є невитриманість літологічного складу та потужностей. Вони виступають основами і середовищем будівель та споруд та зазнають динамічних навантажень, а також інших техногенних впливів, розповсюджених на території міста. У таблиці з використанням даних робіт [2, 4, 7, 8] подаються зведені дані про зміни їх фізико-механічних властивостей.

**ВИСНОВКИ**

Під впливом динамічних навантажень, виникаючі в ґрунті фізичні явища спричиняють, в залежності від літологічного складу, зменшення кута внутрішнього тертя на 0,5–16% від початкової величини, зчеплення на 3–14% та

Таблиця. Зміни властивостей основних компонентів геологічного середовища території м. Київ [2, 4, 7, 8]

Компоненти		Потужність, м	Геоморфологія на прив'язка	Вид використання*	Характер змін*	Зниження міцнісних та деформаційних характеристик після впливу динамічних навантажень**		
Геолого-генетичний тип	Літологічні типи					Зчеплення, с, МПа	Кут внутрішнього тертя, φ, град.	Модуль деформації, Е, МПа
Намивні відклади, tH	Пухкі д/з, с/з піски	1–10	Лівий берег, частково правий	ОС, ПТ	У, ПС, З, ЗГ	—	$\frac{1,5 - 2}{5 - 6,6}$	$\frac{0,1 - 1,6}{0,5 - 7,5}$
Сучасні алювіальні відклади заплав, aH	Супіски	3–70	Русло, заплава, надзаплавні тераси Дніпра та приток	ОС, СР, КК	ПС, ПВ, НМ, З	$\frac{0,001 - 0,003}{5 - 14}$	$\frac{0,6 - 2,2}{3 - 10}$	$\frac{0,52 - 1,56}{4 - 12}$
	Суглинки					$\frac{0,003 - 0,014}{3 - 11}$	$\frac{0,84 - 2,9}{4 - 14}$	$\frac{0,4 - 2,4}{3,3 - 20}$
Покривні лесові відклади, edvP <sub>III</sub> H	Суглинки	5–20	Правий берег, водорозділ, схили	ОС, СР	У, ПС, СП, Х, З	$\frac{0,001 - 0,0017}{4,5 - 8}$	$\frac{1,0 - 3,4}{5 - 16}$	$\frac{0,95 - 1,8}{5,3 - 10}$
Неогенові відклади бурих глин, N <sub>2</sub> cb	Важкі та щільні глини з вапняковими вклюдченнями	0–15	Те ж саме	ОС, СР	У, ПС, СП	$\frac{0,002 - 0,009}{3 - 10}$	$\frac{0,06 - 0,36}{0,5 - 3}$	$\frac{1,2 - 5}{6 - 25}$

Примітка: д/з — дрібнозернистий; с/з — середньозернистий.

\* ОС — основа інженерних споруд, СР — середовище для підземних споруд, ВВ — водовідбір, КК — корисна копалина, У — ущільнені, РУ — розущільнені, ПС — порушеної суцільності, ПТ — планування території, СП — створення пустот, ПВ — навив, Х — зміни хімічного складу, З — забруднення, ЗГ — зміни структури та гранулометричного складу.

\*\* У чисельнику — діапазон змін в абсолютних величинах, у знаменнику — у відсотках до початкової величини.

модуля деформації на 0,5–25%. Основними факторами, що визначають величини змін сил зчеплення і кута внутрішнього тертя є щільність, яка характеризується коефіцієнтом пористості і вологість ґрунтів.

На сучасному етапі не існує чітких залежностей, які кількісно відображали б зміни міцнісних та деформаційних характеристик при динамічних навантаженнях. Дослідним шляхом їх можна встановити для конкретних ділянок, оскільки такі рівняння включають багато змінних: вологість, коефіцієнт пористості, мінеральний та гранулометричний склад, потужність масиву, силові характеристики джерел динамічного впливу.

1. Баркан Д. Д. Динамика оснований и фундаментов. — М.; Л.: Стройвоенмориздат, 1948. — 412 с.
2. Вовк А. А., Черный Г. И., Смирнов А. Г. Деформирование сжимаемых сред при динамических нагрузках. — Киев: Наук. думка, 1971. — 175 с.

3. Вознесенский Е. А. Динамическая неустойчивость грунтов. — М.: Эдиориал УРСС, 1999. — 264 с.
4. Демчишин М. Г. Геологическая среда Киева // Геол. журн. — 1991. — № 2. — С. 14–24.
5. Кріль Т. В. Вібраційний вплив на геологічне середовище міст // Геол. журн. — 2008. — № 2. — С. 91–99.
6. Кріль Т. В. Явище розрідження у ґрунтах та фактори, що на нього впливають // Зб. наук. пр. Ін-ту геол. наук НАН України. — 2009. — Вип. 2. — С. 261–264.
7. Кутергин В. Н. Закономерности изменения свойств глинистых грунтов при вибрации. — М.: Наука, 1989. — 143 с.
8. Черный Г. И. Изменения физико-механических свойств грунтов при динамических нагрузках. — Киев: Наук. думка, 1979. — 132 с.

Інститут геологічних наук НАН України, Київ  
E-mail: kotkotmag@mail.ru

Рецензент — док. техн. наук М. Г. Демчишин