

Дослідження тиксотропії підводних мулистих ґрунтів

Михайло Сукач¹, Світлана Комоцька²

^{1,2}Київський національний університет будівництва і архітектури
Повітрофлотський проспект 31, Київ, Україна, 03037

¹msukach@ua.fm, <https://orcid.org/0000-0003-0485-4073>,

²komotska.sv@knuba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-8418-5302>

Received: 25.04.2022; Accepted: 30.05.2022

<https://doi.org/10.32347/gbdmm.2022.99.0302>

Анотація. В природному стані тиксотропні явища в ґрунтах найбільш часто виникають при зовнішніх навантаженнях динамічного характеру: землетрусах, вібрації від транспортних засобів, що рухаються, працюючих машин і механізмів. Відомості про дослідження тиксотропії ґрунтів свідчать про те, що при динамічному навантаженні зменшувати міцність і переходити в рідкий стан можуть дисперсні ґрунти різного типу, генезису і віку. Вплив динамічного навантаження особливо суттєвий у випадку слабоущільнених і водонасичених піщаних та глинистих ґрунтів.

При динамічному навантаженні може відбуватися як ущільнення ґрунту і відповідно підвищення його міцності, так і зменшення міцності. Частіше доводиться стикатися з процесами зменшення міцності і розріджування ґрунтів при динамічному впливі. Найбільш вивчені процеси, що відбуваються у водонасичених пісках. Стан розрідження при вібрації виникає внаслідок руйнування контактів між окремими зернами, тривкість піщаного ґрунту падає практично до нуля. Після зняття вібронавантаження піщинки під впливом власної ваги переміщуються вниз, викликаючи стискання рідкої фази. Чим більше піски містять тонкодисперсних часток і органічної речовини, тим довше вони зберігають рідиноподібний стан, тим повільніше відбувається відтискання води і ущільнення. Можливість розрідження піщаних ґрунтів визначається не стільки природною пористістю, скільки напруженим станом ґрунту і характером вібровпливу.

Ключові слова: тиксотропія, водонасичений ґрунт, динамічне навантаження, ущільнення, міцність, пластичність, віброповзучість, коагуляція.

ВСТУП

В глинистих ґрунтах при інтенсивному вібронавантаженні тиксотропні зміни можуть протікати при вологості, меншій від нижньої межі пластичності. Тиксотропія може з'являтися навіть в тих випадках, коли коефіцієнт водонасичення глинистих ґрунтів становить 0,4...0,5 [1, 2]. Тиксотропне розм'якшення глин, що спостерігається при цьому, відбувається за рахунок вільної води, що виникає при трансформації фізично зв'язаної води і вивільненні іммобілізованої води. Консистенція ґрунту стає м'якопластичною або текучою, руйнуються структурні зв'язки. По закінченні вібрації відбувається зворотне явище – зміцнення зв'язків, вільна вода частково або повністю зв'язується. Створюються умови для тиксотропного відновлення структури ґрунту і відповідного його зміцнення.

ВПЛИВ ВІБРАЦІЇ НА МУЛИСТИЙ ҐРУНТ

Існує думка, що при вібрації відбувається повне руйнування структурних зв'язків і у переважної більшості мікроагрегатів формується рівномірна і безладна текстура. Ці явища супроводжуються зміною енергетичного стану і просторового розподілення води в ґрунті. Вода, що переходить у вільний стан, розташовується у вигляді тонких плівок на контактах між твердими частками, що в кінцевому підсумку і призводить до розріджування ґрунтів [3 – 5].

Аналіз проведених раніше досліджень показує, що закономірності тиксотропного

зменшення міцності глинистих ґрунтів вивчені недостатньо, а існуючі свідчення часто суперечать одне одному. Так, на думку одних авторів, зменшення міцності глин і суглинків при динамічному навантаженні практично не залежить від їх мінералогічного і гранулометричного складу. На думку інших, здатність до тиксотропного зменшення міцності при вібрації мають ґрунти певного гранулометричного складу, вологості, з високою структуроутворюючою здатністю [6, 7].

Найбільш суперечливими є свідчення про змінювання зчеплення і внутрішнього тертя глинистих ґрунтів при вібрації. Існує думка, що тиксотропні зміни міцності впливають лише на зчеплення, причому тільки на ту його частину, яка визначається водно-колоїдними (коагуляційними) зв'язками між частками [8]. Так, Р.Г. Балдоян, вивчаючи процес віброповзучості суглинків, прийшов до висновку, що зчеплення падає на 92,7 % (практично до нуля), а кут внутрішнього тертя майже не змінюється. І.Є. Руднева встановила, що при інтенсивній вібрації внутрішнє тертя глинистих ґрунтів зростає, а зчеплення падає. Д.Д. Баркан показав, що при збільшенні віброприскорення коефіцієнт внутрішнього тертя зменшується, асимптотично наближаючись до певної межі, яка залежить від властивостей ґрунту.

Немає однозначної відповіді на питання про те, яким чином реалізується зменшення міцності при вібрації, які при цьому відбуваються зміни в структурі ґрунту [9, 10]. Дослідження Н.В. Ур'єва з віброреології висококонцентрованих дисперсних систем свідчать про те, що в умовах інтенсивної вібрації відбувається ізотропне об'ємне руйнування ґрунту [11]. В той же час є свідчення і протилежного характеру про поведінку при динамічних навантаженнях чутливих до розрідження глин із східної Канади [12, 13]. Руйнування цих глин відбувалося при певній амплітуді коливань. При цьому утворювались вузькі зони зсуву, в яких порушений ґрунт перетворювався в рідину, тоді як решта зразка залишалась незмінною.

Основною причиною існування таких суперечливих експериментальних даних і

теоретичних поглядів різних авторів можна вважати відсутність спільних методів дослідження тиксотропних змінювань в ґрунтах при вібраційному навантаженні. Аналіз публікацій з даного питання дозволяє все ж таки думати, що при вібрації зменшують міцність різні ґрунти – від пісків до глин [14]. Про те, чи є це зменшення міцності тиксотропним, тобто зворотним повністю або частково, говорить наступна поведінка ґрунту. Ступінь зменшення міцності при вібрації визначається енергією взаємозв'язку його структурних елементів і характером вібраційного навантаження. Є припущення, що максимальне зменшення міцності (розріджування) ґрунту відбувається при майже повному збігу частот вимушених і власних коливань гідратованих часток твердої фази, оскільки в основі тиксотропних змін, що спостерігаються в дисперсних системах при вібрації, лежить явище резонансу.

При дослідженні донних мулів Тихого океану, які є слаботиксотропними породами з пластифіковано-коагуляційними структурними зв'язками, Е.А. Вознесенським були зроблені висновки про те, що ці породи здатні до швидкого раптового розрідження при напруженнях, вищих від межі текучості [15]. Під час вібраційного навантаження з частотою 20 Гц і амплітудою до 1 мм розглядувані мули знижують міцність в середньому на 20...50 %. Відновлення їх властивостей відбувається через 6...7 діб, причому міцність підвищується на 15...20 % без зміни вологості, що обумовлено формуванням більш впорядкованої коагуляційної структури. Краще відновлюють міцнісні властивості четвертинні глинисті мули, меншою мірою – карбонатні і більш стародавні еоценові мули, які частково мають кристалізаційні структурні зв'язки [16, 17].

Для глинистих ґрунтів пластичної і текучої консистенції із збільшенням вологості зростає ступінь зменшення міцності при вібрації. Добре відомо, що водонасичені ґрунти у порівнянні з сухими і вологими менш стійкі до динамічного навантаження. Крім того, у водонасичених ґрунтах спостерігається менш значне, ніж у вологих,

затухання коливань із зростанням відстані від їх джерела. Посилення тиксотропного зменшення міцності ґрунтів з підвищенням їх вологості пояснюється зменшенням сил тяжіння, а отже, і енергії зв'язку між частками внаслідок потовщення гідратних оболонок навколо часток. Підвищення вологості глинистих ґрунтів до значень 2...2,5 від межі текучості сприяє більш сильному виявленню тиксотропних властивостей, найбільшому зменшенню міцності і відновленню структури. При більших значеннях вологості відносне зменшення міцності і миттєве зміцнення знижується внаслідок зменшення різниці між зруйнованою і незруйнованою структурами ґрунту [18, 19].

Зниження дисперсності погіршує здатність до тиксотропії, яка перестає виявлятися, коли частки не здійснюють броуновського руху, тобто коли їх розміри перевищують 5 мкм. Відомі дослідження з тонкомолотим порошком кварцу. Змішаний з чистою водою кварцовий порошок має дилатантні властивості ("тягучість") і не є тиксотропним. Але при додаванні невеликої кількості колоїдів маса з кварцового порошку і води стає пластичною і тиксотропною [20, 21].

Для виявлення тиксотропних властивостей необхідна наявність хоча б 1,5...2 % глинистих часток. Чим менші глинисті частки, тим більш тиксотропні ґрунти, що їх вміщують. Із зростанням дисперсності підвищується абсолютна величина тиксотропного зміцнення глинистих ґрунтів. Відносне найбільше зміцнення при певному "оптимальному" гранулометричному складі пояснюється тим, що із зростанням дисперсності поряд із збільшенням кількості часток, здатних до переорієнтації, відбувається зниження міцності зв'язків, що утворюються знов. В результаті неоднорідність гранулометричного складу високодисперсних глинистих ґрунтів сприяє тиксотропному зміцненню [22].

Час тиксотропного зміцнення ґрунтів збільшується із зростанням глинистих часток. Для супісків він складає 10, суглинків 15, глин 25...30 і більше діб. Дослідження процесу зменшення міцності глинистих ґрунтів при динамічному навантаженні показує, що із зменшенням дисперсності ве-

личина втрати міцності зростає при інших рівних умовах.

РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАННЯ

В Київському національному університеті будівництва і архітектури були проведені дослідження тиксотропних властивостей глибоководних мулистих осадків з твердими вкрапленнями при різних режимах вібраційного навантаження ґрунторозробних машин [23, 24]. Встановлено, що залежність міцності донних осадків від частоти коливань має гіперболічний характер. Ступінь послаблення структурних зв'язків ґрунту зростає із збільшенням частоти вібронавантаження, досягаючи максимального значення при частоті 20...25 Гц. Для кожного типу осадків існує певне значення амплітуди і частоти коливань, відповідне такому рівню енергії вібронавантаження, при якому руйнується переважна більшість структурних зв'язків, що визначають міцність ґрунту. Подальше зростання енергії вібронавантаження не викликає помітного їх змінення [25].

В результаті експериментів (Рис.1) встановлено, що міцність глибоководних мулистих осадків при динамічному навантаженні зменшується по відношенню до свого первісного стану в 2,5...3 рази. При цьому тверді вкраплення (залізомарганцеві конкреції) осідають в донний ґрунт на 40...70 % їх діаметра. Встановлено також, що із зростанням вмісту глинистих часток збільшується критичне прискорення вібрації, причому чим щільніший ґрунт, тим сильніше виявляється вплив глинистих часток [26]. В той же час в природі зустрічаються так звані "пливунні" ґрунти, які розріджуються навіть при незначних прискореннях вібрації, маючи високу чутливість до зовнішнього навантаження.

Не зважаючи на те, що з ряду питань про закономірності процесів зменшення міцності при зовнішньому навантаженні і тиксотропного зменшення міцності ґрунтів різної дисперсності існують різні думки, все ж таки можна зробити певні висновки про вплив вібрації на тиксотропні властивості водонасичених ґрунтів.

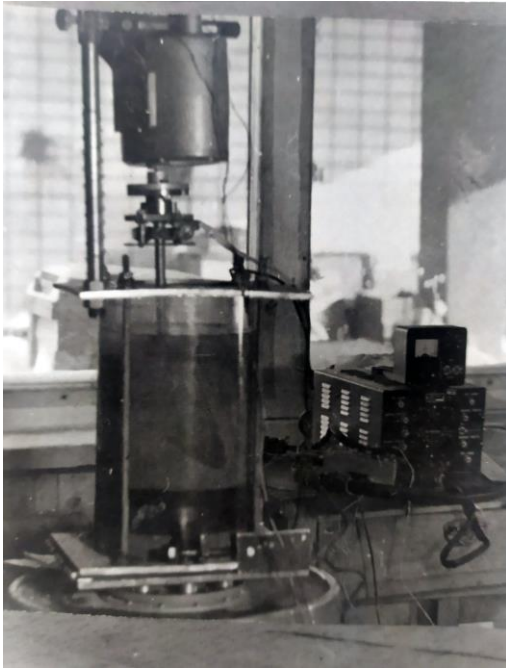


Рис. 1. Випробувальний стенд для дослідження мулистого ґрунту під вібраційним навантаженням

Fig. 1. Test bench for the study of silty soil under vibration load

ВИСНОВКИ

1. Під дією низькочастотної механічної вібрації при відсутності нормальних навантажень зменшують міцність всі дисперсні зв'язні і незв'язні ґрунти. Ступінь зменшення міцності ґрунтів збільшується із зростанням інтенсивності і амплітуди коливань і зменшенням швидкості деформації. Найбільше зменшення міцності відбувається через 5 хвилин від початку вібронавантаження ґрунту. Тому поєднання зсувних напружень вібрації слід розглядати як одну з вірогідних причин зниження стійкості і несучої здібності ґрунтів у природному стані.

2. Ступінь зменшення міцності ґрунту при постійній інтенсивності вібронавантаження визначається відносним інерційним зміщенням мінеральних часток і залежить від співвідношення кількості зруйнованих зв'язків і загального числа зв'язків в ґрунті. Тому зменшення міцності ґрунту збільшується під впливом факторів, які сприяють зменшенню дисперсності і в'язкості (підвищення вологості, вмісту солей в поровому просторі).

3. Припинення вібронавантаження веде до миттєвого відновлення і зміцнення структури водонасиченого донного ґрунту. Во-

но тим значніше, чим сильніше попереднє зменшення міцності ґрунту. Експериментальні дослідження доводять, що тиксотропні зміни в глинистих водонасичених ґрунтах і донних осадах під дією вібрації досить значні, що потребує їх урахування в практиці інженерно-геологічних досліджень, будівельних робіт і проектування ґрунто-розробних машин.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Сукач М.К.** (2001). Реологические модели подводного грунта. Строительное производство, Вип.42, 12-16.
2. **Вялов С.С.** (1978). Реологические основы механики грунтов. Москва, Высшая школа, 447.
3. **Соколовский В.В.** (1969). Теория пластичности. Москва, Высшая школа, 608.
4. **Ставницер Л.Р.** (1969). Деформации оснований и сооружений от ударных нагрузок. Москва, Стройиздат, 126.
5. **Рельтов Б.Ф., Горелик Л.В.** (1968). О применении электромеханического метода к изучению динамического воздействия на водонасыщенный песок. Изв. ВНИИгидротехники им. Б.И. Веденеева, Т.60, 196.
6. **Черный Г. И.** (1979). Изменение физико-механических свойств грунтов при динамических нагрузках. Київ, Наукова думка, 129.
7. **Вознесенский Е.А., Федотов А.Ю., Кешишев В.Н.** (1990). Инженерно-геологические

- исследования глубоководных илов Мирового океана: состояние проблемы (обзор). Инженерная геология, № 1, 3-25.
8. **Сукач М.К.** (1993). Методы и устройства глубоководного исследования морского дна. Киев, КГТУСА, Деп. в ГНТБ Украины 13.07.93, № 1484-Ук 93, 111.
 9. **Stremlan T.N., Spenser S.G.** (1980). Mc Clelland. Offshore Technology Conference, Houston, Vol.2.
 10. **Смолдырев А.Е.** (1978). Методика и техника морских геологоразведочных работ. Москва, Недра, 303.
 11. **Урьев Н.Б.** (1980). Высококонтцентрированные дисперсные системы. Москва, Химия, 319.
 12. **Hirst T.** (1975). Et al. Ocean Engineering, Vol.3.
 13. **Noorany I.** (1977). Under water soil sampling, testing and construction Control. USA, Philadelphia, Vol.10.
 14. **Грязнов Т.А.** (1984). Оценка показателей свойств пород полевыми методами. Москва, Недра, 197.
 15. **Вознесенский Е.А., Федотов А.Ю.** (1991). Динамические свойства глубоководных илов Тихого океана. Инженерная геология, Вып.3, 9-19.
 16. **Тимофеев И.П., Улащик Н.К., Ульянов Е.М.** (1988). Результаты океанических испытаний установки исследования донных грунтов. Горные стационарные установки и машины, Ленинград, ЛПИ, 93-96.
 17. **Воропаев А.А.** (1986). Технические средства инженерно-геологических исследований глубоководных донных отложений. Обзор ВИЭМС (Морская геология и геофизика). Москва, ВИЭМС, 55.
 18. **Сукач М.К., Филонов Ю.П., Новиков Р.Ю.** (2011). Модель пластической деформации грунта при щелевом резании. Гірн., буд., дор. і меліорат. машини, Вып.77, 03-10.
 19. **Deep sea mineral resources investigation in the central-eastern part of the Central Pacific Basin** (1979). J. March, 1976, GH-76-1 Cruise Report 8, Tokyo, Geological survey of Japan, Vol.8.
 20. **Овчинников П.Ф., Круглицкий Н.Н., Михайлов Н.М.** (1972). Реология тиксотропных систем. Київ, Наукова думка, 120.
 21. **Шехтер Е.Ю.** (1983). Методы исследования механических свойств грунтов морского дна. Москва, Недра, 192.
 22. **Ferguson G.H., Mc Clelland B., Bell W.D.** (1977). Seafloore cone penetrometer for deep penetration measurements of ocean sediment strengt. Offshore Technology Conference. Houston, Vol.1.
 23. **Сукач М.К.** (1999). Ідентифікація робочих процесів глибоководних ґрунторозробних машин. Дис... д.т.н., спец. 05.05.04, 346.
 24. **Сукач М.К., Комоцька С.Ю.** (2018). Метод визначення властивостей донних ґрунтів in-situ. Підводні технології, Вип.08, 44-46.
 25. **Сукач М.К.** (1998). Установка для исследования тиксотропии подводных грунтов с включениями конкреций. Известия вузов. Геология и разведка, 1998, № 2, 81-83.
 26. **Сукач М.К.** (1997). Тиксотропія підводних ґрунтів. Гірн., буд., дор. та меліорат. машини, Вып.51, 30-33.

REFERENCES

1. **Sukach M.K.** (2001). Reologicheskie modeli podvodnogo grunta. Stroitel'noe proizvodstvo, Вып.42, 12-16 (in Russian).
2. **Vjalov S.S.** (1978). Reologicheskie osnovy mehaniki gruntov. Moskva, Vysshaja shkola, 447 (in Russian).
3. **Sokolovskij V.V.** (1969). Teorija plastichnosti. Moskva, Vysshaja shkola, 608 (in Russian).
4. **Stavnicer L. R.** (1969). Deformacii osnovanij i sooruzhenij ot udarnyh nagruzok. Moskva, Strojizdat, 126 (in Russian).
5. **Rel'tov B.F., Gorelik L.V.** (1968). O primeneniі jelektromehaničeskogo metoda k izučeniіju dinamičeskogo vozdejstvija na vodonasыshhenyj pesok. Izv. VNIІgidrotehniki im. V.I. Vedeneeva, T.60, 196 (in Russian).
6. **Chernyj G.I.** (1979). Izmenenie fiziko-mehaničeskix svojstv gruntov pri dinamičeskix nagruzkah. Kіiv, Naukova dumka, 129 (in Russian).
7. **Voznesenskij E.A., Fedotov A.Yu., Keshishev V. N.** (1990). Inzhenerno-geologičeskie issledovanija glubokovodnyh ilov Mirovogo okeana: sostojanie problemy (obzor). Inzhenernaja geologija, No.1, 3-25 (in Russian).
8. **Sukach M.K.** (1993). Metody i ustrojstva glubokovodnogo issledovanija morskogo dna. Kiev, KGTUSA, Dep. v GNTB Ukrainy 13.07.93, No.1484-Uk 93, 111 (in Russian).
9. **Stremlan T.N., Spenser S.G.** (1980). Mc Clelland. Offshore Technology Conference, Houston, Vol.2.
10. **Smoldyrev A.E.** (1978). Metodika i tehnika morskix geologorazvedochnyx rabot. Moskva, Nedra, 303 (in Russian).

11. **Ur'ev N.B.** (1980). Vysokokoncentrirovannye dispersnye sistemy. Moskva, Himija, 319 (*in Russian*).
12. **Hirst T.** (1975). Et al. Ocean Engineering, Vol.3.
13. **Noorany I.** (1977). Under water soil sampling, testing and construction Control. USA, Philadelphia, Vol.10.
14. **Grjaznov T.A.** (1984). Ocenka pokazatelej svojstv porod polevymi metodami. Moskva, Nedra, 197 (*in Russian*).
15. **Voznesenskij E.A., Fedotov A.Yu.** (1991). Dinamicheskie svojstva glubokovodnyh ilov Tihogo okeana. Inzhenernaja geologija, Vyp.3, 9-19 (*in Russian*).
16. **Timofeev I.P., Ulashhik N.K., Ul'janov E.M.** (1988). Rezul'taty okeanicheskikh ispytanij ustanovki issledovanija donnyh gruntov. Gornye stacionarnye ustanovki i mashiny, Leningrad, LGI, 93-96 (*in Russian*).
17. **Voropaev A.A.** (1986). Tehnicheskie sredstva inzhenerno-geologicheskikh issledovanij glubokovodnyh donnyh otlozhenij. Obzor VI-JeMS (Morskaja geologija i geofizika). Moskva, VIJeMS, 55 (*in Russian*).
18. **Sukach M.K., Filonov Yu.P., Novikov R.Yu.** (2011). Model' plasticheskoj deformacii grunta pri shhelevom rezanii. Girn., bud., dor. i meliorat. mashini, Vyp.77, 03-10 (*in Russian*).
19. **Deep sea mineral resources investigation in the central-eastern part of the Central Pacific Basin** (1979). J. March, 1976, GH-76-1 Cruise Report 8, Tokyo, Geological survey of Japan, Vol.8.
20. **Ovchinnikov P.F., Kruglickij N.N., Mihajlov N.M.** (1972). Reologija tiksotropnyh sistem. Kiiv, Naukova dumka, 120 (*in Russian*).
21. **Shehter E.Yu.** (1983). Metody issledovanija mehanicheskikh svojstv gruntov morskogo dna. Moskva, Nedra, 192.
23. **Sukach M.K.** (1999). Identifikacija robochih procesiv glibokovodnyh gruntorozrobnih mashin. Dis. d.t.n., spec. 05.05.04, 346 (*in Ukrainian*).
24. **Sukach M.K., Komotska S.Yu.** (2018). Metod viznachennja vlastivostej donnih rruntiv in-situ. Pidvodni tehnologii, Vyp.08, 44-46 (*in Ukrainian*).
25. **Sukach M.K.** (1998). Ustanovka dlja issledovanija tiksotropii podvodnyh grun-tov s

vklyuchenijami konkretij. Izvestija vuzov. Geologija i razvedka, 1998, No.2, 81-83 (*in Russian*).

26. **Sukach M.K.** (1997). Tiksotropija pidvodnih rruntiv. Girn., bud., dor. ta meliorat. mashini, Vyp.51, 30-33 (*in Ukrainian*).

Investigation of thixotropy of underwater silty soils

Mykhailo Sukach¹, Svitlana Komotska²

^{1,2}*Kyiv National University of Construction and Architecture*

Abstract. In the natural state, thixotropic phenomena in soils most often occur under external loads of a dynamic nature: earthquakes, vibrations from moving vehicles, working machines and mechanisms. Data on the study of soil thixotropy indicate that under dynamic load to reduce the strength and go into a liquid state can be dispersed soils of different types, genesis and age. The influence of dynamic loading is especially significant in the case of poorly compacted and water-saturated sandy and clay soils.

At dynamic loading there can be both consolidation of soil and accordingly increase in its durability, and decrease in durability. More often it is necessary to face processes of decrease in durability and thinning of soils at dynamic influence. The most studied processes occurring in water-saturated sands. The state of liquefaction during vibration occurs due to the destruction of contacts between individual grains, the strength of sandy soil drops to almost zero. After removing the vibration load, the grains of sand under the influence of their own weight move down, causing compression of the liquid phase. The more sands contain fine particles and organic matter, the longer they retain a liquid state, the slower the squeezing of water and compaction. The possibility of thinning sandy soils is determined not so much by natural porosity, but by the stress of the soil and the nature of vibration.

Keywords: thixotropy, water-saturated soil, dynamic loading, compaction, strength, plasticity, vibration creep, coagulation.