

БУДІВНИЦТВО

УДК 624.131.32:622.235.8

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.2/61>

Деревягіна Н.І.

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

Садовенко І.О.

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІН ПАРАМЕТРІВ СТІЙКОСТІ ЛЬОСОВИХ МАСИВІВ ПРИ ВИБУХОВИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

Мета. Встановити закономірності змін фізико-механічних властивостей льосових суглинків Придніпров'я під впливом вибухового навантаження в умовах техногенно зміненого геологічного середовища для оцінки стійкості та прогнозування поведінки ґрунтів при подальшого інженерному освоєнні території.

Методика. Проведено серію лабораторних експериментів на зразках льосових суглинків, відібраних з правобережної частини міста Дніпро. Зразки проаналізовано за їх фізичними параметрами (щільність, вологість, пористість), а також за гранулометричним та хімічним складом. Випробування здійснювались з використанням стабілометра для визначення параметрів міцності до та після вибухового навантаження. Аналізувалися також тиксотропні зміни ґрунтів протягом 35 діб після вибуху.

Результати. Встановлено закономірності зміни міцності у зоні, ущільненої вибухом, де у зоні максимального впливу спостерігалось зростання питомого зчеплення у 2–2,5 рази, яке поступово зменшувалося до природних значень на відстані 13–14 м, а потім – знижувалося нижче за початковий рівень. Протягом 6–7 днів після вибуху відбувалося зростання зчеплення на 25–30%, що підтверджує прояв тиксотропії. Кут внутрішнього тертя змінювався у перші 5–7 діб, після чого стабілізувався.

Наукова новизна. Вперше експериментально встановлено зміни фізико-механічних характеристик льосових суглинків Придніпров'я внаслідок деградації під дією вибухового навантаження. Визначено залежність зміни зчеплення та кута внутрішнього тертя від часу після навантаження, що дозволяє обґрунтувати механізм деградації масиву в умовах техногенного впливу.

Практична значимість. Одержані експериментальні результати можуть бути використані при проектуванні, будівництві та експлуатації інженерних споруд на територіях, що знаходяться під впливом вибухових навантажень. Врахування змін фізико-механічних властивостей ґрунтового масиву дозволяє підвищити безпеку та довговічність об'єктів будівництва, зокрема на специфічних льосових ґрунтах.

Ключові слова: льосові суглинки, вибухове навантаження, зчеплення, кут внутрішнього тертя, ущільнення, техногенез, Придніпров'я.

Постановка проблеми. Необхідність забезпечення стійкості схилів, споруд, оцінки міцності та несучої здатності масивів порід, порушених вибуховим навантаженням, пов'язані зі змінами параметрів ґрунтів у часі та просторі. Особливої актуальності проблема забезпечення стійкості геологічного середовища набуває саме у регіонах із широким розповсюдженням специфічних за своїми властивостями льосових порід, наприклад у Придніпров'ї. Під дією динамічного наванта-

ження структура льосових порід зазнає значних змін, іноді – до повного руйнування їх мікро- та макропористої структури, нерівномірного зниження фільтраційних властивостей, маючи специфічну форму деградації в цілому. Наслідком цього може бути активізація негативних інженерно-геологічних процесів, таких як зсуви, осідання, просідання та в цілому зниження довготривалої стабільності інженерних споруд. Деякі теоретичні та емпіричні передумови до прове-

дення серії лабораторних досліджень льосових порід, характерних для Придніпров'я, висвітлені в роботах [1–4], де позначено суттєво новий підхід у розумінні механізму геодинаміки цих ґрунтів за сучасних умов техногенного навантаження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Проблематика зміни властивостей порід при дії динамічних навантажень (а саме – вибухового генезису), висвітлена у низці наукових робіт, однак в більшості з них увага зосереджена на піщаних та частково глинистих породах, а об'ємне динамічне стиснення тих же льосових порід мало описане у таких умовах. В попередніх дослідженнях [5] недостатньо уваги приділено вивченню фізико-механічних параметрів льосових ґрунтів різних типів та встановлення кореляційних зв'язків процесів об'ємного деформування з відповідними параметрами ґрунтів, а саме речовинним та гранулометричним складом, пористістю або ступенем водонасичення. Були розглянуті окремі питання порушеності льосових порід [4–6], запропоновано індуктивні моделі деградації, їх районування, однак без врахування впливу вибухового імпульсу та розподілу його у масиві. Сучасні дослідження в галузі геології та геомеханіки [5, 7] демонструють, що короточасні імпульсні навантаження, якими по суті є вибухові, викликають локальні зони руйнування структури в пористих масивах, що істотно впливає на їхню несучу здатність. На території правобережної України, багато прикладних завдань, пов'язаних із цим, реалізується саме у льосових ґрунтах [3, 8–9]. Враховуючи вищезазначене, дослідження комплексу гідрогеодинамічних, енергетичних і геомеханічних критеріїв деградації льосових структур з урахуванням їх техногенезу в умовах динамічного навантаження, дозволить отримати принципово нові наукові результати щодо їх стійкості.

Постановка завдання. Тому основною метою цього дослідження є встановлення закономірностей, що характеризують діапазон змін параметрів деградації ґрунтового льосового масиву внаслідок динамічних (а саме – вибухових) навантажень з урахуванням їх техногенезу в різних умовах, що забезпечить комплексний підхід у вирішенні цієї актуальної проблеми і дозволить отримати нові наукові результати щодо механізму їх руйнування.

Виклад основного матеріалу. Територія досліджень розташована на терасованій правобережній частині міста Дніпро, у його південній частині, поблизу Старих Кодаків, і представлена

осадовою товщою антропогенних та верхньопліоценових відкладів, що залягають на кристалічних породах та їх корі вивітрювання, а саме каолінах та дресві, та складаються з пісків північної серії, строкатих та червоно-бурих глин та льосової серії.

Верхня частина розрізу складається з буровато-пальових та світло-бурих крупнопильоватих льосових суглинків із включеннями карбонатів. Їх потужність змінюється в межах 3–5 м. Нижче залягає жовтувато-пальовий крупнопильоватий льосовий суглинок з пропластками викопних ґрунтів, що вказують також на ранні стадії формування ландшафту на цій території. Ці породи карбонатизовані, слабоструктуровані та мають тиксотропні властивості при зволоженні.

На глибині 6–9 м фіксується жовтувато-пальовий легкий суглинок, що у нижній частині переходить у супісок. Цей перехідний горизонт має підвищену водопроникність і знижені міцнісні властивості, фактично створюючи ослаблену зону. Нижче за розрізом залягає прошарок глин потужністю до 3 м та пісок із включенням каоліну. Ці породи алювіального походження, мають середню щільність та знижений вміст органічних домішок. Під алювіальними відкладами залягає тріщинувата кора вивітрювання кислих кристалічних порід, яка створює нижній структурний ярус розрізу.

В цілому, в геологічній будові району досліджень спостерігається значна літологічна неоднорідність, строкате перешарування водопроникних та водотривких горизонтів, де особливої уваги потребують просадні льосові суглинки, оцінка стійкості яких актуальна для прогнозу деформаційних процесів в умовах вибухового впливу.

У якості зразків для експериментів було відібрано різновиди льосового суглинку з наступними параметрами: об'ємна вага 1,8–1,95 г/см³, об'ємна вага скелету 1,7–1,74 г/см³, пористість 35–36%, вологість (вагова) 13–15,5, також було проведено гранулометричний аналіз відібраної проби (рис. 1).

Ці льосові різновиди мають переважно кремнеземисто-глинистий склад з домішками карбонатів та оксидів металів. Основним компонентом є кремнезем (SiO₂), вміст якого змінюється від 55 до 65%. Значна частка оксидів алюмінію (Al₂O₃) становить 10–15%, а оксиди заліза (Fe₂O₃) – 4–7%. Карбонати, представлені в основному оксидом кальцію (CaO) та оксидом магнію (MgO), присутні у кількості 3–7% і 1–3%

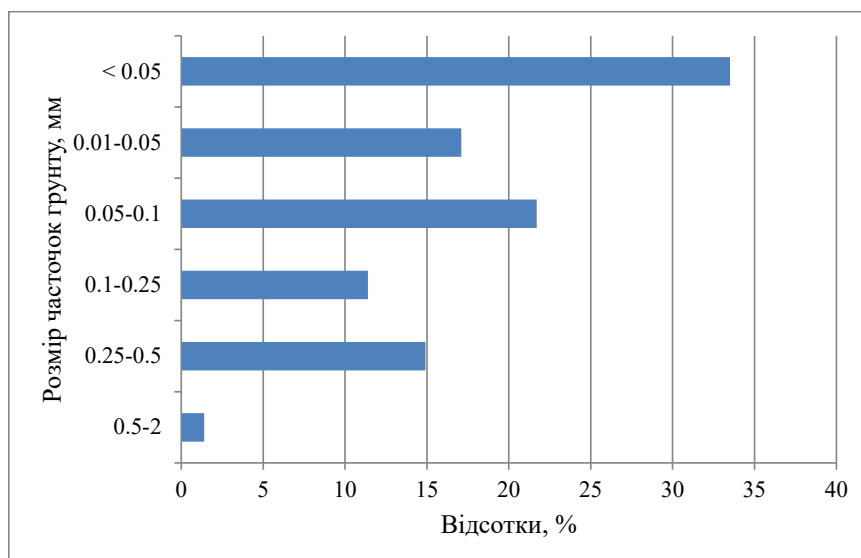


Рис. 1. Результати гранулометричного аналізу відібраних зразків льосового суглинку

відповідно. Вміст лужних елементів, таких як оксид калію (K_2O) та оксид натрію (Na_2O), становить 2–4% і 1–2% відповідно. Втрата при прожарюванні, що включає карбонати, органічні речовини та гігроскопічну воду, може досягати 8–15% [3, 8–9]. Наявність карбонатів свідчить про помірну стійкість до зволоження льосових суглинків.

Вологість ґрунтів є одним з основних факторів, які визначають їх стан при навантаженні, особливо це стосується льосових порід, специфічні властивості яких ускладнюють прогноз їх поведінки як у природних умовах, так і при техногенному навантаженні. В залежності від характеру навантаження – статичного або динамічного, вплив вологості на деформування ґрунту відрізняється у кількісному та якісному відношенні, що пояснюється різницею у механізмі деформації. В умовах статичного навантаження деформація пов'язана зі зміною співвідношення між компонентами ґрунта за рахунок видалення вільної вологості при стабілізації деформацій (процесі консолідації), в умовах динамічного навантаження (наприклад внаслідок вибухів або ударів), за рахунок короткочасної дії надлишкового тиску, деформування таких ґрунтів відбувається в більшості випадків, за умов зменшення вільної пористості, і частково внаслідок пружного стиснення води та мінерального скелету. Таким чином при динамічному навантаженні є поняття оптимальної вологості [5, 9–10], при якій незворотні деформації ґрунтів будуть найбільшими, і для кожного окремого типу ґрунту цей показник не буде постійним, знаходячись в залежності від навантаження та швидкості його дії.

Тут треба зазначити також, що вологість повинна розглядатись як регіональний фактор впливу, бо є відповідні результати досліджень (за Вовком О.О.), які показують суттєві відмінності впливу вибухів у літній час у південних районах України при ваговій вологості ґрунтів від 4 до 9–10% і поблизу Києва, при ваговій вологості ґрунтів 12–16%. Вони показують суттєво різний характер деформування і зміни механічних властивостей ґрунтів різної вологості, речовинного і гранулометричного складу. Це доводить, що вологість повинна враховуватись не суто як змінна при лабораторних або польових дослідженнях, а як регіональний параметр техногенного впливу, що визначає геодинамічну характеристику льосових ґрунтів під дією вибухових навантажень. Таким чином, географічна неоднорідність зволоження повинна враховуватись при розробці моделі прогнозу техногенних деформацій і оцінки інженерно-геологічних ризиків при експлуатації та реконструкції інженерних об'єктів різного призначення, цьому буде присвячений наступний етап наших досліджень.

При впливі вибухової хвилі на масив ґрунту у межах зони непружних деформацій із падінням напруг на фронті одночасно змінюється режим навантаження, тобто знижується його швидкість, наближаючись до квазістатичних умов. На основі аналізу відібраних зразків та відповідних лабораторних досліджень встановлено, що у зв'язних ґрунтах найбільші зміни щільності відбуваються в зоні, що безпосередньо прилягає до виїмки. Відповідно при збільшенні вологості ґрунту ущільнення значно вище (18–20%), а ось при значеннях, близьких до повного водонасичення,

розміри ущільненої зони зростають, а ось зміна самої щільності в цій зоні вже незначна. Схожі дані були отримані у дослідженнях [10–11].

На основі відібраних зразків, було проведено дослідження міцнісних параметрів льосових суглинків, в першу чергу їх зміни в ущільненій вибухом зоні, а також тиксотропних змін у ґрунті при впливі вибухового навантаження. Встановлені значення питомого зчеплення та коефіцієнта тертя методом тривісного стиснення, а саме – використанням TriSCAN (VJTech, Великобританія). Його перевага саме для випробувань льосових порід полягає в максимальному наближенні гідрогеомеханічних режимів випробувань зразків порід до реальних умов стану ґрунтів в масиві. Наведений пристрій дозволяє проводити автоматизований контроль тиску в камері навантаження, лінійних та об'ємних деформацій зразка, а також витрати води, що проходить через зразок у режимі реального часу. Серія випробувань фільтраційних параметрів порід проведена в умовах тривісного стиску при різних значеннях навантажень, геостатичний тиск приймався в діапазонах, що відповідають глибинам відібраних зразків (5–7 м), з природною вологістю, що відповідало реальним умовам льосового масиву. Час випробування складав 24 години. Перед проведенням дослідів проводилося консолідаційне доущільнення зразків при навантаженнях, що відповідали геостатичному тиску, до умовної стабілізації деформацій за чинними нормативами. Зразки були відібрані у проміжку часу 6–7 днів після вибухів на досліджуваній території.

Обробка результатів експериментів дозволила встановити наступне. Величина зчеплення ґрунтів безпосередньо поблизу від стінок вибухової порожнини та далі вглиб масиву, зростає у порівнянні з тим, яку ґрунт мав у природному недеформованому стані, в 2–2,5 разів.

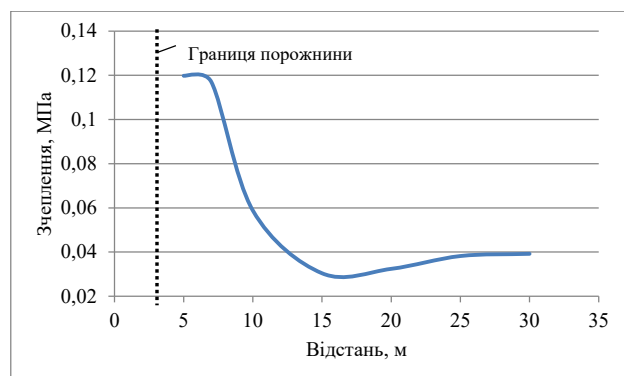


Рис. 2. Зміна значення зчеплення льосових суглинків в залежності від відстані від границі порожнини, утвореної вибухом

За результатами дослідження встановлено, що зміна величини зчеплення (рис. 2), по мірі віддалення від центру вибуху, різко зменшується і приблизно на відстані 13–14 м стає рівною тій, яку ґрунт мав у недеформованому стані. Далі, у глибокому масиві, зчеплення зменшується до величин в 1,5–2 рази менше початкових, а з наближенням до границь зони деформацій знов збільшується до природних величин.

Кут внутрішнього тертя в ущільненій зоні змінюється наступним чином: у контура порожнини (у зоні ущільнення) його величина збільшується на 3–4,5 градуси у порівнянні з початковим до вибуху (рис. 3). Зі збільшенням відстані від цен-



Рис. 3. Зміна значення кута внутрішнього тертя льосових суглинків в залежності від відстані від границі порожнини, утвореної вибухом

тру вибуху величина ϕ зменшується до початкових значень, причому розміри зони його зміни значно менше розмірів зон зміни зчеплення.

Таким чином, зміни міцнісних характеристик льосових суглинків в ущільненій вибухом зоні знакозмінно: ґрунт в деяких зонах тільки набуває додаткову міцність, але й у відповідних зонах втрачає її у порівнянні з початковою, тобто розущільнюється.

Є дані досліджень [11–12], які свідчать про те, що величина зчеплення ґрунту з часом збільшується, причому основний її приріст спостерігається у період часу близько 6–7 днів після вибуху (саме у цей проміжок було відібрано зразки для даного дослідження). За абсолютною величиною приріст зчеплення складає приблизно 25–30% від значень, які спостерігаються одразу після вибухового навантаження, причому найбільш інтенсивно зчеплення збільшується в зоні максимальних деформацій, а менше – в периферійних областях. Через приблизно 30–35 діб після вибухового навантаження може спостерігатись деяке збільшення величини зчеплення, однак швид-

кість цих змін невелика, тому процес тиксотропії можна вважати завершеним. З часом величини кутів внутрішнього тертя ущільненої вибухом зони збільшуються, причому ця зміна зареєстрована лише в період часу перших 5–7 днів, далі зміни ф практично не спостерігаються.

Аналіз результатів досліджень показує, що в деформованих вибухом суглинистих ґрунтах відбуваються тиксотропні зміни, що підтверджується змінами у часі величин зчеплення на ділянках ущільненої зони з незначними об'ємними деформаціями за її межами, де зміни щільності (об'ємної ваги) не відмічено. Ще більш показово описані особливості поведінки ґрунтів проявляються при вибухах зарядів в глинистих ґрунтах та обводнених льосових суглинках [5, 7, 10].

Невелика кількість експериментів дає можливість якісно підтвердити описані вище результати, а також відмітити, що вказані особливості в глинах та обводнених льосових суглинках простежуються більш відчутно. Одночасно зони зі зниженими величинами зчеплення як за абсолютною величиною, так і за розмірами зон розущільнення перевищують отримані для суглинків.

Висновки. 1. Експериментально підтверджено, що вибухове навантаження суттєво впливає на фізико-механічні характеристики льосових суглинків Придніпров'я, викликаючи зміну їхньої щільності, зчеплення та кута внутрішнього тертя. Встановлено, що в зоні безпосереднього

впливу вибуху (поблизу вибухової порожнини) спостерігається зростання питомого зчеплення ґрунту в 2–2,5 рази у порівнянні з його природним станом, далі ця величина поступово зменшується з віддаленням від епіцентру вибуху, досягаючи природних значень на відстані 13–14 м, а потім знижується у певних зонах до рівня 1,5–2 рази менше від початкових значень.

2. Також встановлені знакозмінні закономірності поведінки міцнісних характеристик льосових суглинків в ущільненій вибухом зоні: у деяких ділянках відбувається ущільнення і збільшення міцності, а в інших – розущільнення та зниження міцності. Тиксотропні зміни у льосових суглинках призводять до поступового зростання зчеплення у перші 6–7 днів після вибуху, причому цей приріст становить 25–30% від початкових значень. У подальші 30–35 днів швидкість цих змін значно зменшується, що свідчить про завершення тиксотропного процесу. Зміна кута внутрішнього тертя відбувається в перші 5–7 днів після вибуху, після чого цей параметр залишається практично стабільним, що вказує на незворотність деформаційних процесів у досліджених породах.

3. Одержані результати свідчать про необхідність врахування змін у фізико-механічних параметрах льосових суглинків при проектуванні та експлуатації інженерних споруд на територіях, що зазнають вибухового навантаження, з метою забезпечення їхньої стійкості та довговічності.

Список літератури:

1. Sadovenko I. A., Derevyagina N. I., Podvigina E. O., Zagricenko A. N. Dynamics of loess mass deformation due to technogenic load. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2014. Вип. 45. С. 76–81.
2. Мокрицька Т. П. Формування та еволюція геологічного середовища Придніпровського промислового регіону: монографія. Дніпропетровськ : Ліра, 2013. 278 с.
3. Манюк В. В. Особливості будови четвертинних відкладів у типових розрізах Середнього Придніпров'я. *Вісник Дніпропетровського університету*. Серія: Геологія. Географія. 2014. Вип. 15. С. 2–9.
4. Мокрицька Т. П., Євграшкіна Г. П., Манюк В. В., Бондар О. В., Баранов П. Н., Самойлич К. О. Небезпечні стани та явища у геологічному середовищі на прикладі міст Середнього Придніпров'я: монографія. Дніпро: ПП Акцент, 2019. 205 с.
5. Ремез Н. С. Взаємодія вибухових хвиль з ґрунтами і елементами техноурбоєкосистем. Київ: Центр учбової літератури, 2019. 232 с.
6. Мокрицька Т. П. Індуктивні моделі деградації просадності. *Інженерна геологія*. 2013. № 5. С. 34–38.
7. He L., Jiao Y., Zhang Y., Zheng F., Peng H., Ranjith P. G. Innovative geological–geotechnical zoning framework for urban planning: Wuhan's experience. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*. 2024. Vol. 10. Article 176. <https://doi.org/10.1007/s40948-024-00830-5>
8. Герасимов І. П., Федорчук В. О. Лесові породи України та їхні геологічні особливості. Київ: Наукова думка, 2001. 208 с.
9. Шульга П. О. Четвертинні відклади Лісостепу України: генезис та особливості. Харків: Видавництво ХНУ, 2010. 184 с.
10. Ambrosini D., Luccioni B. Effects of underground explosions on soil and structures. *Underground Space*. 2019. Vol. 5, No. 4. P. 241–251. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2019.09.002>.

11. González-Nicieza C., Álvarez-Fernández M. I., Álvarez-Vigil A. E. та ін. Influence of depth and geological structure on the transmission of blast vibrations. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2014. Vol. 73. P. 1211–1223. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0595-7>.

12. Maheshwari P., Murmu S., Verma H. K. Modeling of blast induced damage distance for underground tunnels. *Proceedings of the Indian Geotechnical Conference 2019* / S. Patel [et al.] (Eds.). Singapore : Springer, 2021. Vol. 137. P. 545–553. (Lecture Notes in Civil Engineering). DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-33-6466-0_57.

Dereviahina N.I., Sadovenko I.O. EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE CHANGES IN THE STABILITY PARAMETERS OF LOESS MASSIFS UNDER EXPLOSIVE LOADS

Purpose. Establishing the patterns of changes in physical and mechanical properties of loess loams of the Dnipro region under the influence of explosive loading in conditions of a technogenically altered geological environment for assessment of stability and prediction of soil behavior during further engineering development of the territories.

Methods. A series of laboratory experiments is conducted on samples of loess loams collected from the right-bank part of the city of Dnipro, specifically from an area damaged by an explosion. The samples are analyzed for their physical parameters (density, moisture content, porosity), as well as for their granulometric and chemical composition. Tests are carried out using the TriSCAN (VJTech) software to determine strength parameters before and after explosive loading. Thixotropic changes in the soils are also analyzed over a period of 35 days following the explosion.

Results. The patterns of strength changes in the zone compacted by the explosion are established, with a 2–2.5-fold increase in specific cohesion observed in the area of maximum impact. This increase gradually decreased to natural values at a distance of 13–14 meters, and then dropped below the initial level. Over the course of 6–7 days following the explosion, cohesion increased by 25–30%, confirming the manifestation of thixotropy. The internal friction angle changed during the first 5–7 days, after which it stabilized.

Scientific novelty. For the first time, changes in physical and mechanical characteristics of loess loams of the Dnipro region due to degradation under explosive loading have been experimentally established. The dependency of cohesion and internal friction angle changes on time after loading is determined, which makes it possible to justify the mechanism of massif degradation under technogenic impact conditions.

Practical significance. The obtained experimental results can be used in the design, construction, and operation of engineering structures in areas affected by explosive loading. Taking into account the changes in physical and mechanical properties of the soil massif allows improving safety and durability of construction projects, particularly on specific loess soils.

Key words: loess loams, explosive loading, cohesion, internal friction angle, compaction, technogenesis, Dnipro region.