

Гайко Г.І., д.т.н., проф.  
Матвійчук І.О., асп.  
Тарасюк О.С., інж.  
КПІ ім. Ігоря Сікорського Україна

## ВПЛИВ ЗМІНИ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГЕОЛОГІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА НА ФОРМУВАННЯ НАВАНТАЖЕНЬ НА ПІДЗЕМНІ СПОРУДИ МІЛКОГО ЗАКЛАДАННЯ

Haiko H.I., Dr. Eng. Sc., Professor  
Matviichuk I.O., postgraduate student  
Tarasiuk O.S., engineer  
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

## IMPACT OF VARYING PROPERTIES OF GEOLOGICAL ENVIRONMENT ON THE FORMATION OF LOADS AT SHALLOW-LAYING UNDERGROUND STRUCTURES

**Мета.** Дослідження впливу зміни комбінації пористості та вологості ґрунтів на формування навантажень і діючих зусиль у підземних спорудах мілкового закладання.

**Завдання.** Використовуючи механізм формування навантаження на підземні споруди мілкового закладання, обґрунтувати вплив фактору вологості ґрунтів на формування гірського тиску на підземну споруду, а також на формування максимальних згинальних моментів у конструкціях.

**Результат дослідження.** Зібрана база даних геологічного середовища правобережного Києва, яка включала дані зі 362 свердловин і 512 геологічних елементів, глибиною відбору від поверхні до 60 м. Отримані поверхні залежностей питомого зчеплення та модуля деформації ґрунтів від комбінації показника текучості й коефіцієнта пористості для супісків, суглинків та глин. Показаний характер зниження міцнісних показників ґрунтів (модуля деформації та питомого зчеплення) при збільшенні показника текучості. Проведено моделювання розподілу зміщень ґрунтів різної вологості навколо тунелю мілкового закладання і формування навантаження на кріплення тунелю. Побудовані залежності згинальних моментів, що діють у вершині склепіння тунелю, від зміни показника текучості.

**Наукова новизна.** Полягає в розвитку уявлень про механізм формування навантаження на підземні споруди мілкового закладання в змінному геологічному середовищі.

**Висновки та практична значимість.** Отримані залежності питомого зчеплення та модуля деформації ґрунтів від комбінації показника текучості й коефіцієнта пористості для супісків, суглинків та глин. Надані рекомендації по врахуванню можливого збільшення діючих зусиль в підземних конструкціях в залежності від комбінації пористості та вологості ґрунтів.

**Ключові слова:** підземні споруди, геологічне середовище, механіка ґрунтів, показник текучості, формування навантажень, згинальний момент.

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Вирішення територіальних, транспортних, енергетичних та екологічних проблем сучасних мегаполісів може бути успішно здійснене шляхом широкого будівельного освоєння міського підземного простору. При цьому забезпечення надійності та економічної ефективності підземних об'єктів мілкого закладання (найбільш характерних для міського підземного будівництва), стає необхідною умовою інвестиційної привабливості розвитку підземної урбаністики [1–3].

Найбільш доцільною для дослідження підземної інфраструктури великих міст є комплексна природничо-технічна система «геоурбаністика – геологічне середовище», яка охоплює всю складність і різноманітність взаємин технічних і природних чинників розвитку геоурбаністики мегаполісу [4]. Важливою складовою виділеної системи виступає геологічне середовище, яке є багатокомпонентною, дискретною, динамічною природничою системою, яка різноманітно та енергійно взаємодіє з підземними та наземними спорудами. Вона складається з системи геологічних тіл різних рівнів, різного складу, тектонічної порушеності та обводненості [5]. Змінними геомеханічними параметрами геологічного середовища можна вважати такі параметри ґрунтів як об'ємна вага, кут внутрішнього тертя, модуль деформації, коефіцієнт Пуасона, питоме зчеплення, які можуть приймати різні значення в можливих діапазонах змін. Серед найбільш впливових факторів, що зумовлюють цю змінність є комбінація показника вологості (текучості) і коефіцієнта пористості ґрунтів.

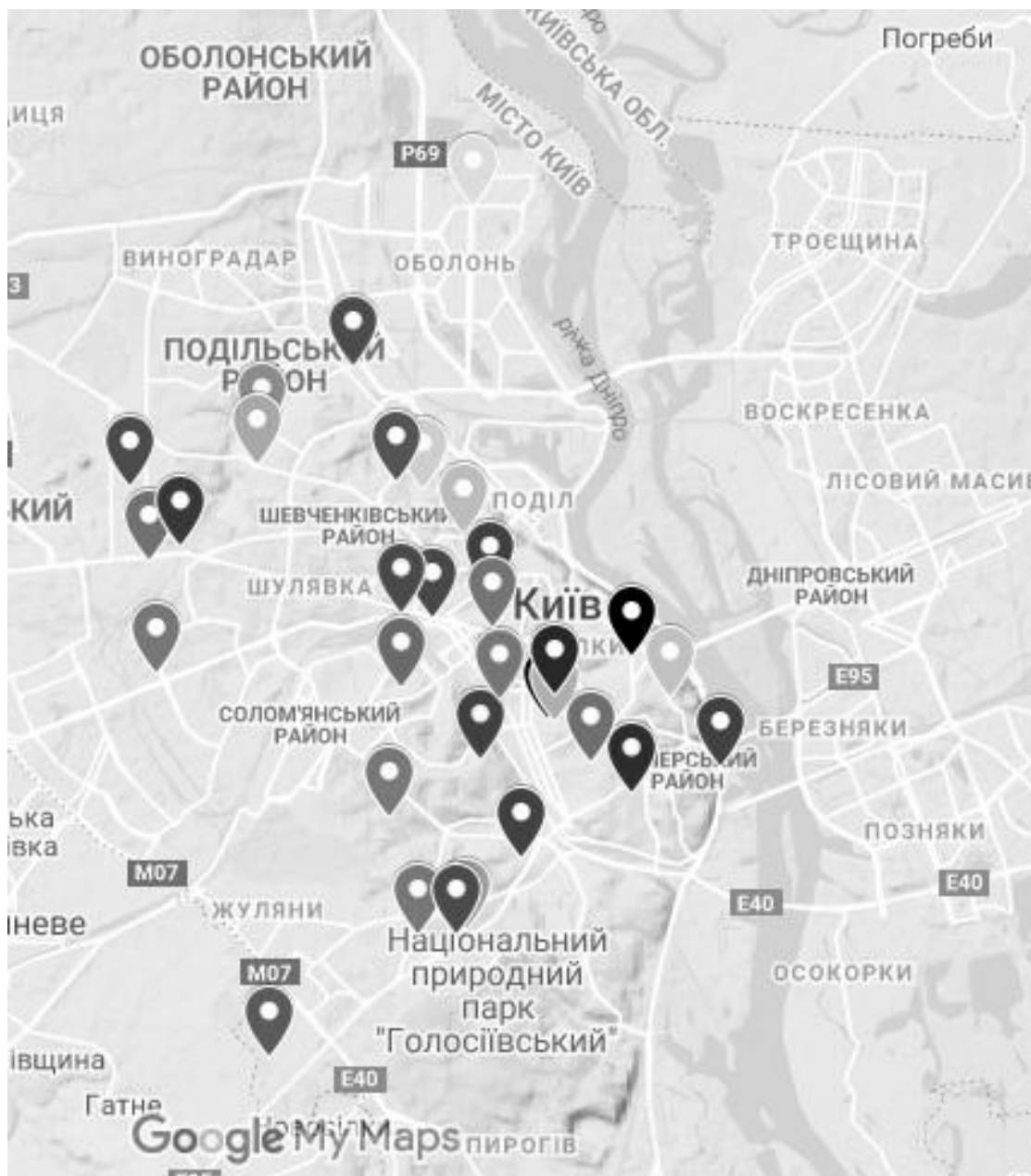
**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Вплив вологості на ґрунти, як геологічне середовище для поверхневих будівельних об'єктів є достатньо добре вивченим, а інструментарій його врахування увійшов до базових проектних методик та нормативних документів [6, 7]. Це зумовлено в першу чергу запобіганням просіданню ґрунту під дією навантажень від будівель і споруд, а також протидією небезпечним зсувним явищам. Для підземного будівництва, зокрема для проектування підземних споруд мілкого закладання, проблему складали лише групи ґрунтів у стані текучості, що було пов'язано зі складністю будівництва в умовах пливунів. Інші категорії вологості не розглядалися як загрозливі, що зменшило увагу до цього фактору. Проте фактор вологості ґрунтів може мати суттєвий вплив на формування гірського тиску на підземну споруду, на величину та розподіл діючого навантаження й формування діючих зусиль у конструкціях, що на сьогодні досліджено недостатньо [8].

Для споруд мілкого закладання базовою гіпотезою гірського тиску є «гіпотеза сил», де навантаження на кріплення підземної споруди розглядається як вага деякого об'єму ґрунту в межах призми сповзання [9, 10]. Сили тертя, що діють на площинах «призми сповзання», зумовлені зчепленням ґрунту (сн, кПа) та модулем деформації (E, МПа), тому зміна цих базових показників при збільшенні вологості може призвести до зростання навантажень і діючих згинальних моментів у конструкціях. Сучасні обчислювальні середовища (приміром PLAXIS) здебільшого використовують геомеханічну модель Кулона – Мора і також істотною мірою реагують на змінення механічних властивостей ґрунтів.

**Постановка завдання** - метою роботи є оцінка впливу комбінації показника вологості (текучості) і коефіцієнта пористості ґрунтів на формування зміщень, навантажень і діючих зусиль в конструкціях підземних споруд мілкого закладання.

## ОСНОВНА ЧАСТИНА

Для формування бази даних геологічного середовища в межах території правобережного Києва авторами зібраний і узагальнений матеріал інженерно-геологічних пошукувань провідних будівельних компаній Києва (локалізація відповідних будівельних ділянок приведена на рис. 1).



*Рисунок 1 – Локалізація місць свердловинного відбору проб ґрунту*

Сформована база даних геологічного середовища в межах правобережного Києва включала дані зі 362 свердловин і 512 геологічних елементів, глибиною відбору від поверхні до 60 м [11]. Фрагмент сформованої бази даних наведений в табл. 1, де всі геологічні елементи були поділені на групи супісків, суглинків і глин та розміщені за величиною показника текучості (від найменшого до найбільшого значення). Розглядалися наступні характеристики ґрунту: вологість природна  $W$ , вологість на межі

розкочування  $W_p$ , число пластичності  $I_p$ , показник текучості  $I_L$ , коефіцієнт пористості  $e$ , кут внутрішнього тертя  $\phi$ , питоме зчеплення  $c_p$ , модуль деформації  $E$ .

**Таблиця 1 – Фрагмент бази даних геологічного середовища правобережного Києва**

Об'єкт	№ ПГЕ (інженерно-геологічного елементу)	Найменування ґрунту	Вологість природна $W$ , д.о.	Вологість на межі розкочування $W_p$ , д.о.	Число пластичності $I_p$ , д.о.	Показник текучості $I_L$ , д.о.	Коефіцієнт пористості, $e$ , д.о.	Щільність ґрунту $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Кут внутрішнього тертя $\phi$ , град.	Питоме шеплення $c_p$ , кПа	Модуль деформації $E$ , Мпа
проспект Перемоги, 67	10а	Супіски, тверді	0,096	0,108	0,04	<0	0,6	1,78	23	14	21
	10б	Супіски піщанисті, пластичні	0,161	0,134	0,05	0,54	0,63	1,86	22	11	18
	10в	Супіски піщанисті, текучі	0,189	0,115	0,03	>1	0,65	1,88	18	7	10
	11а	Суглинки, напівтверді	0,172	0,149	0,14	0,16	0,53	2,03	20	34	29
	11б	Суглинки легкі піщаниті, тугопластичні	0,177	0,14	0,11	0,34	0,56	1,99	17	25	21
	11в	Суглинки легкі піщаниті, м'якопластичні	0,196	0,134	0,1	0,62	0,59	1,98	16	18	17
	11г	Суглинки легкі піщаниті, текучопластичні	0,217	0,132	0,1	0,85	0,61	1,99	13	9	9
	12а	Глини, напівтверді	0,215	0,18	0,22	0,16	0,65	1,95	17	47	24
	21в	Піски пилюваті, щільні	0,183				0,49	2,06	33	5	45

Вплив вологості, який може впливати на величину й розподіл зусиль в підземних конструкціях, в багатьох випадках виражають через показник текучості, тобто через відношення різниці вологостей в природному стані та на межі пластичності до числа пластичності:

$$I_L = \frac{W - W_p}{I_p} \quad (1)$$

де  $W$  – природна вологість;

$W_p$  – межа розкочування (або вологість на межі розкочування);

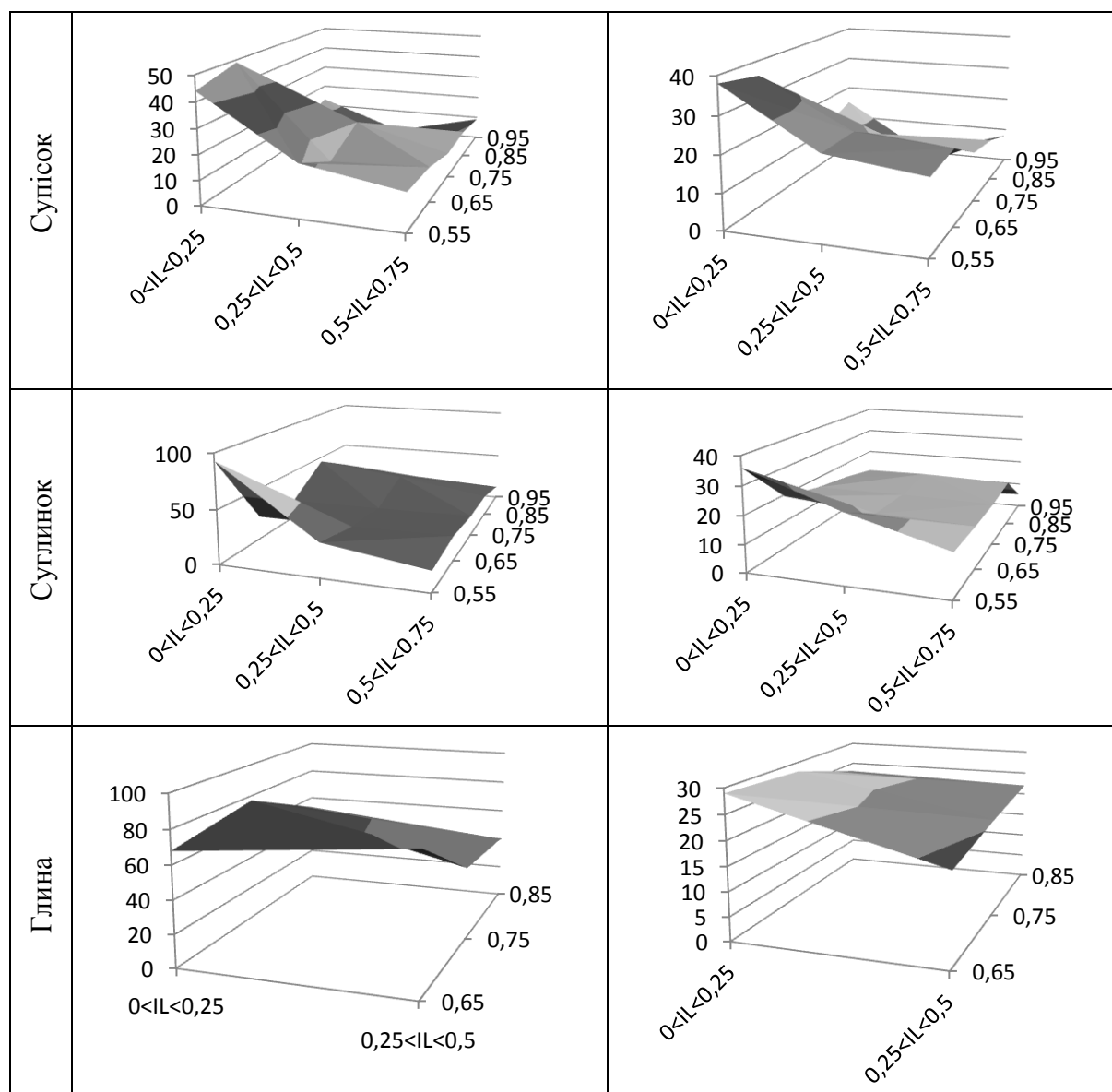
$I_p$  – число пластичності.

Розглянемо нормативний розподіл ґрунтів за показником текучості  $I_L$  для глин і суглинків [7]:

- тверді  $I_L < 0$ ;
- напівтверді  $0 \leq I_L \leq 0,25$ ;
- тугопластичні  $0,25 < I_L \leq 0,50$ ;
- м'якопластичні  $0,50 < I_L \leq 0,75$ ;
- текучепластичні  $0,75 < I_L \leq 1$ ;
- текучі  $I_L > 1$ .

Слід зазначити, що на міцнісні характеристики ґрунтів, а саме на модуль деформації ( $E$ , МПа) та зчеплення ( $c$ , кПа) завжди впливає комбінація показника текучості ( $I_L$ ) та коефіцієнта пористості ( $e$ ), що потребує комплексного розгляду цих показників і певною мірою ускладнює аналіз впливу окремих залежностей.

Опрацювання сформованої бази даних геологічного середовища правобережного Києва дозволило провести аналіз залежностей механічних властивостей супісків, суглинків та глин у залежності від зміни показника текучості ( $I_L$ ) та коефіцієнта пористості ( $e$ ). На рис. 2 показані отримані поверхні цих залежностей.



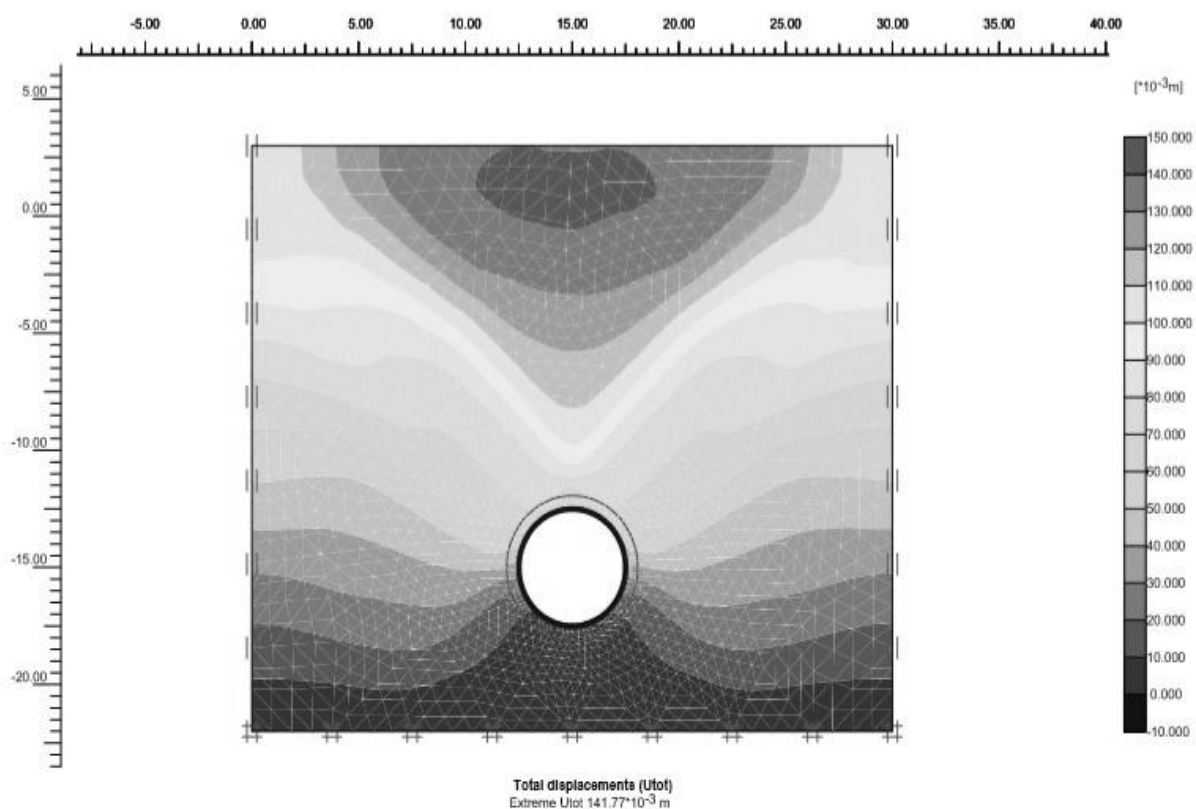
**Рисунок 2 – Поверхні залежностей питомого зчеплення та модуля деформації ґрунтів від комбінації показника текучості й коефіцієнта пористості для супісків, суглинків та глин.**

З отриманих залежностей можна зробити висновок, що для всіх типів ґрунтів спостерігається тенденція зниження їх міцнісних показників (модуля деформації та зчеплення) при збільшенні вологості. Особливо різке падіння показника зчеплення (в 2-4 рази) спостерігається для супісків і суглинків при зміні показника текучості  $I_L$  від 0 до 0,5. В глинах цей спад повільніший, показник зчеплення зменшується в 1,3 – 1,5

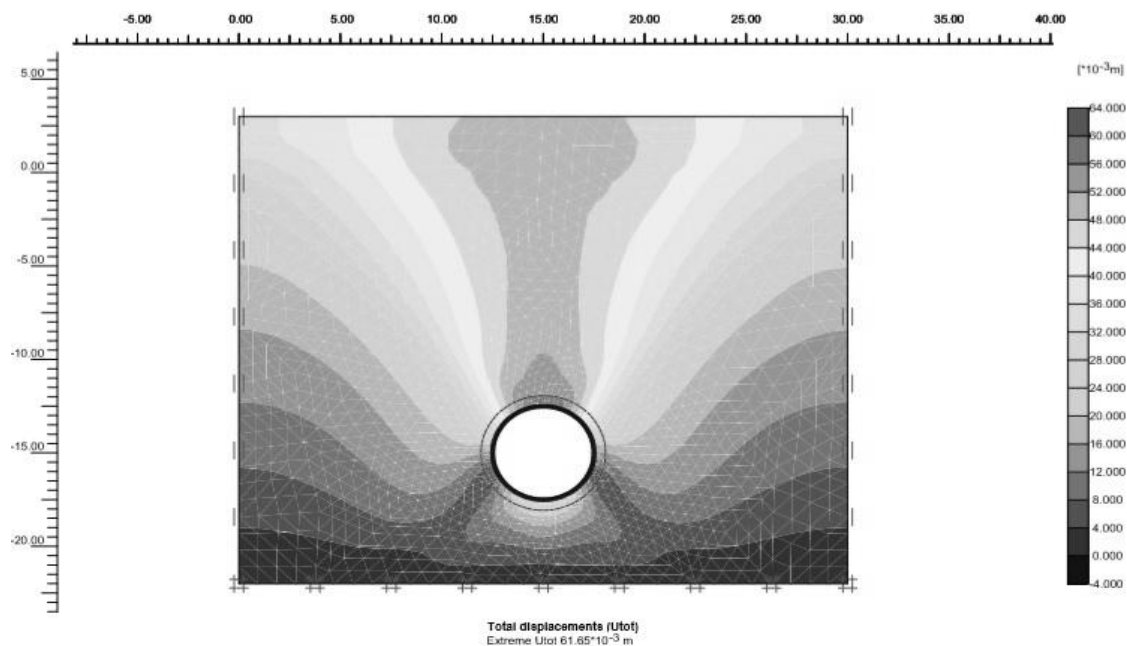
рази. Подібну, тенденцію спостерігаємо і для модуля деформації. Зміна пористості також впливає на характер поверхні залежностей, але не змінює загальну тенденцію зменшення міцністних характеристик ґрунтів.

Для того щоб оцінити вплив зміни вологості на зміщення ґрунту навколо виробки і формування навантаження на оправу, була розглянута задача будівництва тунелю в умовах суцільного суглинистого масиву, який характеризується показниками текучості  $I_L$  від 0,1 до 0,75, діаметр тунелю дорівнює 5 м. Моделювався ґрунтовий масив шириною 30 м, висотою 25 м, глибиною закладання тунелю 20 м. Задача моделювалася в середовищі PLAXIS як поетапний процес. Розрахунок підземної споруди, що взаємодіє з ґрунтовим масивом являє собою складну геотехнічну систему, поведінка якої описувалась згідно моделі Кулона – Мора. Була обрана середня крупність сітки кінцевих елементів трикутної форми.

На малюнках 3, 4 показані результати моделювання тунелю в суцільному суглинистому ґрунтовому масиві з глибиною закладання 20 м при  $I_L = 0,1$  (рис. 3) та  $I_L = 0,75$  (рис. 4). Змінне геологічне середовище моделювалося шляхом введення 5 параметрів: питомої ваги ґрунту, коефіцієнту Пуасона, модуля деформації, питомого зчеплення, кута внутрішнього тертя для фактичних умов, згідно з даними бази даних геологічного середовища.



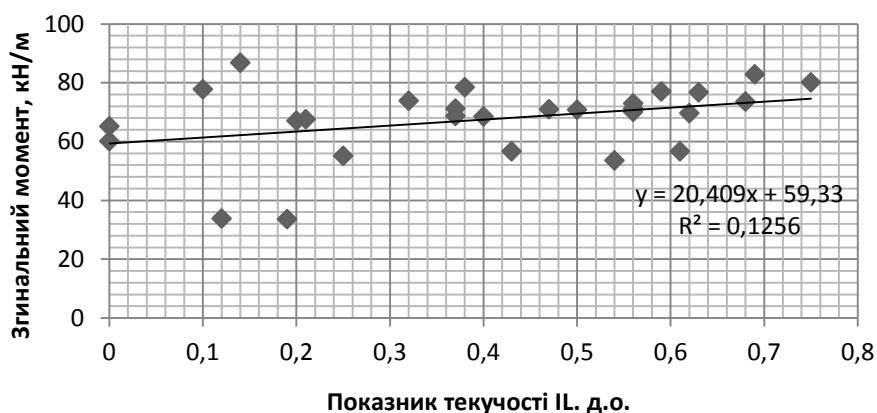
**Рисунок 3 – Модель розподілу зміщень навколо виробки в суглинистому ґрунтовому масиві на глибині 20 м при  $I_L = 0,1$**



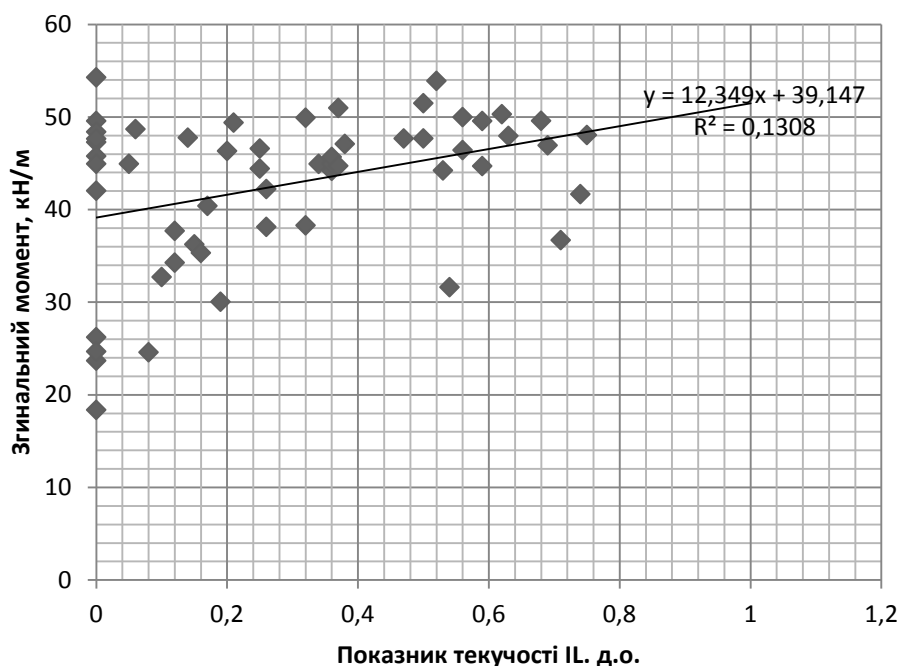
**Рисунок 4 – Модель розподілу зміщень навколо виробки в суглинистому ґрунтовому масиві на глибині 20 м при  $I_L = 0,75$**

Порівняння зміщень навколо виробки в першому (рис. 3) і другому (рис. 4) випадку свідчить про формування в умовах збільшеної вологості суцільної зони зміщень від денної поверхні до оправи тунелю, причому в покрівлі тунелю формується зона інтенсивних зміщень і навантажень. У першому випадку інтенсивні зміщення, які зосереджені поблизу денної поверхні, значно зменшуються з глибиною, а їх вплив на оправу тунелю мінімальний. З огляду на це було важливо дослідити, як змінюється згинальний момент у вершині склепіння тунелю в умовах зміни показника текучості в розглянутих ґрунтах у типових для правобережного Києва межах пористості в діапазоні від 0,55 до 0,85.

Шляхом моделювання в середовищі PLAXIS були отримані значення максимальних згинальних моментів в склепінні тунелю в залежності від показника текучості  $I_L$  для суглинків (рис. 5, 6). При цьому розглядалися дві глибини закладання тунелю 20 м і 10 м.



**Рисунок 5 – Графік залежність згинального моменту від показника текучості для суглинків,  $H=20$  м**



**Рисунок 6 - Графік залежність згинального моменту від показника текучості для суглинків,  $H=10$  м**

Як видно з графіків, зі збільшенням показника текучості спостерігається зростання згинального моменту у вершині склепіння тунелю у 1,2 – 1,4 рази (для суглинків). При цьому слід зазначити, що окремі комбінації факторів пористості і текучості можуть формувати значні відхилення діючих згинальних моментів від середніх значень, формуючи в окремих випадках ще більші внутрішні зусилля в конструкції. Порівняння залежностей на глибинах закладання тунелю 10 і 20 м свідчить, що зі збільшенням глибини закладання тунелю величина згинального моменту очікувано зростає (в 1,4 – 1,5 рази), проте вплив вологості зберігає тенденцію збільшення діючого моменту у вершині склепіння.

## ВИСНОВКИ

Характер зміни модулю деформації та питомого зчеплення ґрунтового масиву, що вміщує виробку мілкового закладання, достатньо коректно описується поверхніми залежностей від комбінації показника текучості та пористості ґрунту, причому зміщення показника текучості ґрунту з діапазону  $0 < I_L < 0,50$  в діапазон  $0,50 < I_L < 0,75$  призводить до формування призми сповзання на всю глибину закладання виробки та збільшення середніх значень згинальних моментів у вершині склепіння виробки в 1,2 – 1,4 рази (в умовах суглинків).

Отримані залежності свідчать про суттєву відмінність формування навантажень і зусиль в конструкціях підземних споруд в умовах змінних показників вологості та пористості ґрунтів. Це слід враховувати в проектних рішеннях шляхом залучення імовірнісних методів прогнозування можливих відхилень від детермінованих показників механічних властивостей геологічного середовища, що закладаються в проект.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Gilbert, P.H. and others. (2013) *Underground Engineering for Sustainable Urban Development*. Washington: The National Academies Press, 230.
2. Гайко, Г.І. (2019) *Комплекс пріоритетних завдань для системного розвитку підземної урбаністики*. Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Форум гірників 2019». Дніпро: НТУ «Дніпровська політехніка», 171-175.
3. Картозія, Б.А. (2015) Освоение подземного пространства крупных городов. Новые тенденции. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*, № 1, 615 – 629.
4. Pankratova, N.D., Savchenko, I.A., Gayko, G.I., & Kravets, V.G. (2018) Evaluating Perspectives of Urban Underground Construction Using Modified Morphological Analysis Method. *Journal of Automation and Information Sciences*. Volume 50, Issue 10, 34-46.
5. Гайко, Г.І., & Кріль, Т.В. (2015) *Типізація геологічного середовища урбанізованих територій при освоєнні підземного простору*. Матеріали XIV міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях». Київ, 173-180.
6. Швець, В.Б., Шашенко, О.М. та ін. (2014) *Механіка ґрунтів. Основи та фундаменти: Підручник*. Дніпро: Пороги, 231.
7. Мінрегіонбуд. (2014) *ДБН А.2.1-1-2014. Інженерні вишукування для будівництва*. Київ: Україна.
8. Гайко, Г.І., Матвійчук, І.О., Білецький, В.С., & Салуга, П.. (2018) Методи прогнозування оцінки сприятливості геологічного середовища будівництву об'єктів підземної урбаністики. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія»*. № 48, 39 – 51.
9. Tajdus, A., Cala, M., & Tajdus, K. (2012) *Geomechanika w budownictwie podziemnym. Projektowanie I budowa tuneli*. Krakow: AGH, 762.
10. Булычев, Н.С. (2000) *От гипотез горного давления к теории расчета подземных сооружений. Подземное строительство в России на рубеже XXI века*. Москва: ТАР, 105.
11. Гайко, Г.І., & Матвійчук, І.О. (2019) *Аналіз залежностей міцнісних властивостей глинистих ґрунтів від зміни вологості*. Матеріали 13-ої міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, аспірантів і студентів «Перспективи розвитку будівельних технологій». Дніпро, 149-152.

## REFERENCES

1. Gilbert, P.H. and others. (2013) *Underground Engineering for Sustainable Urban Development*. Washington: The National Academies Press, 230.
2. Haiko, H.I. (2019) *A complex of priority tasks for systemic development of underground urban construction*. Materials of international scientific-technical conference «Miners forum 2019». Dnipro: NTU «Dnipro polytechnics», 171-175.
3. Kartosiya, B.A. (2015) Developing underground space of large cities. New tendencies. *Mining information-analytical bulletin (scientific technical journal)*, № 1, 615 – 629.

4. Pankratova, N.D., Savchenko, I.A., Gayko, G.I., & Kravets, V.G. (2018) Evaluating Perspectives of Urban Underground Construction Using Modified Morphological Analysis Method. *Journal of Automation and Information Sciences*. Volume 50, Issue 10, 34-46.
5. Gayko, G.I., & Kril, T.V. (2015) *Typization of geological environment of urbanized territories when developing underground space*. XIV international scientific-practical conference «Modern information technologies of managing ecological safety, natural resource usage, emergency measures». Kyiv, 173-180.
6. Shvets, V.B., Shashenko, O.M. et al. (2014) *Soil mechanics. Bases and foundations: Textbook*. Dnipro: Porohy, 231.
7. Ministry of Regional Construction. (2014) *State Construction Norms A.2.1-1-2014. Engineering surveys for construction*. Kyiv: Ukraine.
8. Haiko, H.I., Matviichuk, I.O., Biletsky, V.S., & Saluha, P. (2018) Methods of predictive evaluation of favorability of geological environment for underground urban construction. *Bulletin of V.N. Karazin Kharkiv national university, «Geology. Geography. Ecology» series*. No. 48, 39–51.
9. Tajdus, A., Cala, M., & Tajdus, K. (2012) *Geomechanika w budownictwie podziemnym. Projektowanie I budowa tuneli*. Krakow: AGH, 762.
10. Bulychev, N.S. (2000) *From hypotheses of rock pressure to computational theory of underground construction. Underground construction in Russia at the XXI century frontier*. Moscow: TAR, 105.
11. Haiko, H.I., & Matviichuk, I.O. (2019) *Analysis of dependencies of durability properties in clay soils from varying humidity*. Materials of the 13th international scientific-practical conference of young scientists, postgraduate students and students “Prospects of development of construction technologies”. Dnipro, 149-152.

Стаття надійшла до редакції 30.03.2020.