

**ДЕФОРМАТИВНІ ВЛАСТИВОСТІ ГРУНТОПОЛІМЕРНОГО КОМПОЗИТУ:  
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ****Зверєва А.С.** аспірант,

farwww@ukr.net, ORCID: 0000-0002-4832-3760

**Плугін А.А.** д.т.н., професор,

aaplugin@gmail.com, ORCID:0000-0002-6941-2076

**Мірошніченко С.В.** к.т.н., доцент,*Український державний університет залізничного транспорту*

c197.9000@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7328-5209

**Резніченко І.В.** інженер

ТОВ «Новий град», riv.spt@gmail.com

**Анотація.** Одним із способів підвищення несучої здатності ґрунтів є їх закріплення ін'єктуванням розчинів, що тверднуть. Для супісків більш застосовним є ін'єктування поліуретанових матеріалів. У разі їх ін'єктування відбувається розрив шарів ґрунту з його ущільненням і віджиманням води та утворення армуючих тіл.

Попередніми дослідженнями встановлено, що поліуретановий матеріал в результаті ін'єктування проникає у ґрунт і утворює ґрунтополімерний композит. Утворений композит має набагато більший, ніж у ґрунту, модуль деформації. Проте авторами не виявлено літературних даних про його величину, тому дослідження залежності модуля деформації ґрунтів від вологості ґрунту в закріпленому поліуретановим матеріалом та природному стані є актуальним завданням.

Статичним випробуванням піддавали зразки-моделі незакріпленого і закріпленого ґрунту. Для кожного зразка-моделі та навантаження за різними величинами вологості  $W$  визначено модулі деформації  $E$ . Для кількісної оцінки впливу закріплення на деформативність ґрунту прийнято коефіцієнт збільшення модуля деформації від закріплення  $K_E$ . Порівняння отриманих величин  $K_E$  з показниками консистенції  $I_L$  дослідженого супіску дозволило зробити висновок, що  $K_E$  залежить від вологості  $W$  та показниками консистенції  $I_L$  та, отже, від вихідного (природного) стану ґрунту.

**Ключові слова:** закріплення, ґрунтополімерний композит, модель, деформативність, модуль деформації.

**Вступ.** Здатність основ будівель та споруд опиратись навантаженням визначається фізико-механічними властивостями ґрунтів, які дуже залежать від їх вологості [1-4]. У [2-7] показано, що особливо несприятливими навантаженнями, характерними для об'єктів залізничного транспорту, є динамічні та вібраційні, які можуть призвести до швидких осідань основ, складених перезволоженими глинистими ґрунтами та супіском.

Одним із способів підвищення несучої здатності ґрунтів є їх закріплення ін'єктуванням розчинів, що тверднуть [2-4]. У разі ін'єктування рідкого скла (силікатизація) або водорозчинних карбамідних смол (смолизація) закріплення ґрунту досягається за рахунок їх просочення [4]. Тому застосовність силікатизації та смолизації для супісків ускладнена їх низькою проникністю [3]. Для таких ґрунтів більш застосовним є ін'єктування поліуретанових матеріалів. У разі їх ін'єктування відбувається розрив шарів ґрунту з його ущільненням і віджиманням води та утворення армуючих тіл.

**Аналіз останніх досліджень.** Попередніми дослідженнями встановлено, що поліуретановий матеріал в результаті ін'єктування проникає у ґрунт з його розривом на блоки, ймовірно по усадочним тріщинам і їх зародкам, і утворює ґрунтополімерний композит. Утворений композит є неоднорідним, проте має набагато більший, ніж у ґрунту, модуль деформації. Проте авторами не виявлено літературних даних про його величини.

Тому дослідження залежності модуля деформації ґрунтів від параметрів ін'єктування поліуретанових матеріалів є актуальним завданням.

**Мета досліджень** – визначення кількісної оцінки підвищення модуля деформації  $E$  за рахунок закріплення ґрунтів з низькою проникністю. Визначення коефіцієнта підвищення модуля деформації від закріплення  $K_E$ .

**Матеріали та методика досліджень.** Досліджено ґрунтополімерний композит, утворений ін'єктуванням двокомпонентного поліуретанового матеріалу SPT<sup>®</sup> у супісок з границею пластичності  $W_p = 0,14$ , границею текучості  $W_L = 0,17$ , числом пластичності  $I_p = 0,03$ . Авторами розроблено оригінальну методику досліджень з побудовою залежностей відносної деформації моделей незакріпленого та закріпленого (композиту) ґрунту від статичного та динамічного навантаження. Методику викладено у [8, 9].

Статичним випробуванням піддавали два зразки-моделі незакріпленого ґрунту (в умовно природному стані) П.1, П.2 і три зразки-моделі композиції (закріпленого ґрунту) З.1, З.2, З.3. Випробування здійснювали за різною вологістю ґрунту від 15 % (у тугопластичній консистенції) до 6,9 % (у твердій консистенції). Навантаження збільшували повільно, ступенями кроком по 16 КПа, кожен з яких витримували по 5 хвилин, і доводили до напруження 150 КПа. Після останнього ступеня навантаження знімали (крім ваги штампу). Навантаження кожного зразка-моделі здійснювали з його різною вологістю декілька раз (від одного до чотирьох) для кожної величини вологості. У випадку двох або більше раз навантажень до позначення зразка-моделі додавали цифру, яка відповідала порядковому номеру навантаження, наприклад, З.1-2 – друге за порядком навантаження зразка-моделі З.1.

**Результати статичних випробувань ґрунтополімерного композиту.** Під час випробувань відзначено, що ін'єктування в супісок вологістю 15 % зменшило його вологість до 11,5 % за рахунок відтиснення води та ущільнення. Результати досліджень у вигляді графіків залежностей відносної деформації  $\varepsilon$  від напруження  $\sigma$  наведені на рис. 1 а, б, в.

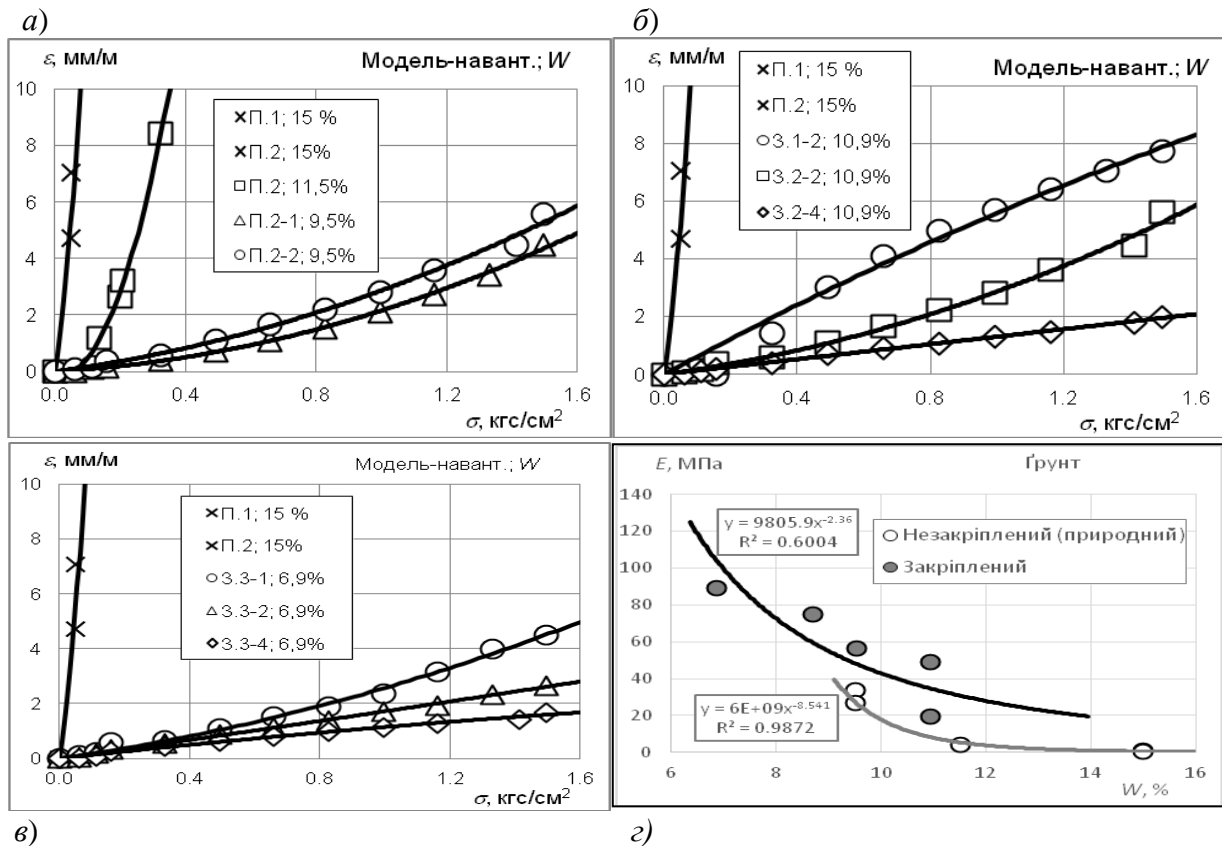


Рис. 1. Отримані в результаті статичних випробувань моделей незакріпленого П.1, П.2 і закріпленого З.1, З.2, З.3 ґрунту з різною вологістю  $W$  залежності: а, б, в – відносної деформації  $\varepsilon$  від стискаючого напруження  $\sigma$ ; г – модуля деформації  $E$  від вологості  $W$  під час вторинного навантаження (після зняття первинного без видалення штампу)

Для кожного зразка-моделі та навантаження за різними величинами вологості  $W$  визначено модуль деформації  $E$ , які наведені у табл. 1. Із табл. 1 видно, що для закріпленого ґрунту модуль деформації під час другого навантаження більший, ніж для первинного навантаження, що пояснене обтисненням верхнього шару ґрунту зразка-моделі штампом. Тому для подальшого аналізу прийнято результати випробувань за вторинним навантаженням, залежності модуля деформації  $E$  від вологості  $W$  для якого наведені на рис. 1, в.

Із рис. 1 і табл. 1 видно, що закріплення ґрунту суттєво знижує його деформативність (підвищує модуль деформації). Модуль деформації незакріпленого ґрунту за вологості  $W = 15\%$  складає 0,5–0,7 МПа. В результаті закріплення ґрунту модуль деформації збільшується за  $W = 10,9\%$  – до не менше 11,2 МПа, за  $W = 6,9\%$  – до не менше 33,4 МПа.

Таблиця 1 – Результати статичних випробувань зразків-моделей незакріпленого П.1, П.2 і закріпленого 3.1, 3.2, 3.3 ґрунту

Стан ґрунту	Зразок-модель	Порядковий номер навантаження	Вологість $W$ , %	Модуль деформації $E$ , МПа
Природний	П.1	1	15	0,7
		1	15	0,5
	П.2	1	11,5	3,9
		1	9,5	33,5
		2	9,5	26,8
Закріплений	3.1	1	10,9	11,2
		2	10,9	19,4
	3.2	1	10,9	19,2
		2	10,9	49,0
		1	8,7	37,5
	3.3	2	8,7	74,9
		1	9,5	33,4
		2	9,5	56,2
		1	6,9	58,3
		2	6,9	89,0

Проте в не меншому ступені модуль деформації підвищує осушення ґрунту: за  $W = 11,5\%$  – до 3,9 МПа, за  $W = 9,5\%$  – до не менше 33,5 МПа.

Залежності модуля деформації  $E$  від вологості  $W$ , наведені на рис. 1, з [9], добре апроксимуються ступеневими рівняннями з коефіцієнтами кореляції 0,99 для незакріпленого та 0,60 для закріпленого ґрунту. За цими рівняннями, наведеними на рис. 1, з, розрахували таблицю 2 із залежностями  $E$  від  $W$  для незакріпленого та закріпленого ґрунту.

Аналіз даних табл. 2 дозволив запропонувати для кількісної оцінки впливу закріплення на деформативність ґрунту коефіцієнт збільшення модуля деформації від закріплення  $K_E$  – відношення модуля деформації закріпленого ґрунту до модуля деформації ґрунту у природному стані за однакової вологості. Величини цих коефіцієнтів наведені у табл. 2 і на рис. 2.

Із табл. 2 і рис. 1, з видно, що за сухого стану ґрунту (супіску) з вологістю, меншою 8,6%, закріплення не збільшує його модуля деформації (не знижує деформативності). Для більш вологих ґрунтів відзначається збільшення модуля деформації за рахунок закріплення, за вологості: 10% – у 2,5 рази (від 17,3 до 42,8 МПа); 14% (границя пластичності) – у 20 разів (від 0,98 до 19,4 МПа); 15% (середина границь пластичного стану) – у 30 разів (від 0,54 до 16,4 МПа); 16% (границя текучості) – від нульового значення до 12,2 МПа.

Порівняння отриманих величин  $K_E$  з показниками консистенції  $I_L$  дослідженого супіску дозволило зробити висновок, що  $K_E$  залежить від вологості  $W$  та показника консистенції  $I_L$

та, отже, від вихідного (природного) стану ґрунту. Коефіцієнт підвищення модуля деформації  $K_E$  ґрунту від закріплення складе для ґрунтів консистенції: твердої – від 1 (ефекту немає) до 7; напівтвердої – від 7 до 27; тугопластичної – від 27 до 37; м'якопластичної – від 37 до 49; текучепластичної – від 49 до 65; текучої – від 65 до 130.

Таблиця 2 – Залежність від вологості  $W$  модуля деформації  $E$  природного (незакріпленого) і закріпленого ґрунту (супіску з границею пластичності 14 % і границею текучості 16 %) та коефіцієнту підвищення модуля деформації ґрунту від закріплення

Вологість ґрунту $W$ , %	Показник консистенції $I_L$	Консистенція ґрунту у природному (незакріпленому) стані	Модуль деформації ґрунту $E$ , МПа		Коефіцієнт збільшення модуля деформації $K_E$ від закріплення
			природного	закріпленого	
8,6	-1,79	тверда	60,3	60,4	1
12	-0,67		3,65	27,83	7,63
14,1	0	напівтверда	0,98	19,35	19,8
14,8	0,25		0,63	17,10	27,3
15	0,33	тугопластична	0,54	16,44	30,3
15,5	0,50		0,41	15,21	37,1
16	0,67	м'якопластична	0,31	14,12	45,2
16,3	0,75		0,27	13,61	49,7
17	1	текучепластична	0,19	12,23	65,7
19	1,67	текуча	0,07	9,41	130,6

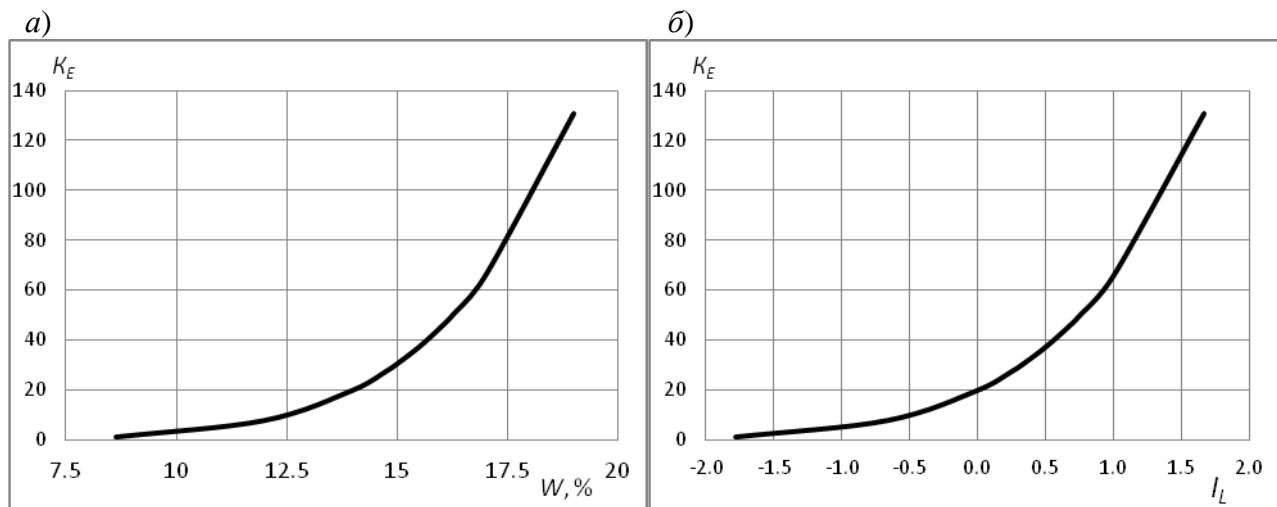


Рис. 2. Залежність коефіцієнту підвищення модуля деформації від закріплення  $K_E$  від характеристик ґрунту у природному стані: а – вологості  $W$ ; б – показника консистенції  $I_L$

**Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку.**

В результаті експериментальних досліджень встановлено, що закріплення ґрунту ін'єктуванням поліуретану суттєво підвищує модуль його деформації  $E$  як ґрунтополімерної композиції. Для кількісної оцінки підвищення  $E$  запропоновано використовувати коефіцієнт підвищення модуля деформації від закріплення  $K_E$  – відношення модуля деформації  $E$  ґрунтополімерної композиції до  $E$  природного ґрунту за однакової вологості.

$K_E$  залежить від вихідного (природного) стану ґрунту, зокрема, його вологості  $W$  та показника консистенції  $I_L$ , і складає для ґрунтів консистенції: твердої – від 1 (ефекту немає) до 7; напівтвердої – від 7 до 27; тугопластичної – від 27 до 37; м'якопластичної – від 37 до 49;

текучепластичної – від 49 до 65; текучої – від 65 до 130. Розроблено таблицю для визначення  $K_E$  і  $E$  супісків в залежності від вихідного (природного) стану ґрунту, зокрема, величин його  $W$  та  $I_L$ .

Проводяться дослідження впливу закріплення на здатність ґрунтополімерної композиції опиратись динамічним – ударним та вібраційним навантаженням.

### Література

1. Plugin A. Independent diagnostic computer systems with the ability to restore operational characteristics of construction facilities / A.Plugin, L.Trykoz, O.Herasymenko, A.Pluhin, V.Konev // *Diagnostyka*, 2018. – Vol. 19. – no. 2. – p. 13–23. DOI: 10.29354/diag/83009
2. Плугін А.М. Розрахунки несучої здатності і технологія закріплення основ будівель і споруд залізничного транспорту: Навч. посібник / А.М.Плугін, А.А.Плугін, Л.В.Трикоз, О.С.Саяпін, О.С.Герасименко, О.А.Плугін; за ред. А.М.Плугіна. – Харків: УкрДАЗТ, 2011. – Ч.1. – 150 с.; 2012. – Ч.2. – 274 с.
3. Плугін А.А. Відновлення експлуатаційних властивостей основ, фундаментів, заглиблених і підземних споруд: Навч. посібник / А.А.Плугін, Л.В.Трикоз. – Харків: УкрДАЗТ, 2005. – 141 с.
4. Ржаницын Б.А. Химическое закрепление грунтов в строительстве. – Москва: Стройиздат, 1986. – 264 с.
5. Плугін А.М. Підсилення конструкцій та будівель / А.М. Плугін, С.В. Мірошніченко, І.Г. Корнієнко, О.В. Афанасьєв. – Харків: УкрДАЗТ, 2012. – 124 с.
6. Шагин А.Л. Реконструкция зданий и сооружений / А.Л.Шагин, Ю.В. Бондаренко, Д.Ф.Гончаренко, В.Б.Гончаров; Под. ред. А.Л.Шагина. – Москва: Высшая школа, 1991. – 352 с.
7. Савйовский В.В. Ремонт и реконструкция гражданских зданий // В.В. Савйовский, О.Н. Болотских. – Харків: Ватерпас, 1999. – 288 с.
8. Плугін А.А. Деформативні властивості ґрунтополімерного композита: Методика експериментальних досліджень / А.А. Плугін, С.В. Мірошніченко, А.С. Зверєва, І.В. Резніченко. – Харків: УкрДУЗТ, 2018. – С. 44-52. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.182.2018.159929>
9. Improved bearing resistance of soil foundations of buildings with injectable polyurethane composites // S. Miroschnichenko, D. Plugin, O. Kalinin, I. Reznichenko, A. Zvierieva // *MATEC Web of Conferences* 230, (2018). DOI: 10.1051/mateconf/201823003013

### References

- [1] A. Plugin, L. Trykoz, O. Herasymenko, A. Pluhin, V. Konev, "Independent diagnostic computer systems with the ability to restore operational characteristics of construction facilities" *Diagnostyka*, Vol. 19, no. 2, p. 13–23, 2018. DOI: 10.29354/diag/83009
- [2] A.M. Plugin, A.A. Plugin, L.V. Trykoz, O.S. SayapIn, O.S. Gerasimenko, O.A. Pluhin, *Rozrahunki nesuchoyi zdatnosti i tehnologiya zakriplennya osnov budivel i sporud zaliznchnogo transportu*. Kharkiv, UkrSURT, 2012.
- [3] A. Plugin, L. Trykoz, *Vidnovlennya ekspluatatsiynih vlastivostey osnov, fundamentiv, zagliblenih i pidzemnih sporud*. Kharkiv, UkrSURT, 2005.
- [4] B.A. Rzhanytsyn, *Khimicheskaya fiksatsiya pochv v stroitel'stve*. Moskva, Stroyizdat, 1968.
- [5] A.M. Plugin, S.V. Miroschnichenko, I.H. Korniyenko, O.V. Afanas'yev, *Pidsylennya konstruktsiy ta budivel'*. Kharkiv, UkrDAZT, 2012.
- [6] A.L Shagin, YU.V. Bondarenko, D.F.Goncharenko, V.B.Goncharov, *Rekonstruktsiya zdaniy i sooruzheniy*. Moskva: Vysshaya shkola, 1991.
- [7] V.V Savyovskiy, O.N. Bolotskikh, *Remont i rekonstruktsiya grazhdanskikh zdaniy*. Kharkiv: Vaterpas, 1999.
- [8] A.A. Plugin, S.V. Miroschnichenko, A.S. Zvierieva, I.V. Reznichenko, *Deformativni vlastyvosti gruntopolimernoho kompozytu: metodyka eksperymental'nuch doslidzhen'*.

- Kharkiv: UkrDUZT, p. 44-52, 2018. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.182.2018.159929>  
[9] S. Miroshnichenko, D. Plugin, O. Kalinin, I. Reznichenko, A. Zvierieva. *Improved bearing resistance of soil foundations of buildings with injectable polyurethane composites*. MATEC Web of Conferences, Vol. 230, 2018. DOI: 10.1051/mateconf/201823003013.

## ДЕФОРМАТИВНЫЕ СВОЙСТВА ГРУНТОПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТА: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Зверева А.С.**, аспирант,

farwww@ukr.net, ORCID: 0000-0002-4832-3760

**Плугин А.А.**, д.т.н., профессор,

aaplugin@gmail.com, ORCID:0000-0002-6941-2076

**Мирошниченко С.В.**, к.т.н., доцент,

*Украинский государственный университет железнодорожного транспорта*

c197.9000@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7328-5209

**Резниченко И.В.**, инженер

*ТОВ «Новый град»*

riv.spt@gmail.com

**Аннотация.** Одним из способов повышения несущей способности грунтов является их закрепление инъектированием растворов, которые твердеют. В случаях использования силикатизации или смолизации закрепление грунта достигается за счет их пропитки. Поэтому применение силикатизации и смолизации для супеси усложнено их низкой проницаемостью. Для таких грунтов более применимым является инъектирование полиуретановых материалов. В случае их инъектирования происходит разрыв слоев грунта с его уплотнением и отжиманием воды и образованием армирующих тел.

Предыдущими исследованиями установлено, что полиуретановый материал в результате инъектирования проникает в грунт с его разрывом на блоки, вероятно по усадочным трещинам, и образует грунтополимерный композит.

Образованный композит имеет гораздо больший модуль деформации, чем в грунте. Но авторами не обнаружено литературных данных про его величину, поэтому исследования зависимости модуля деформации грунтов от влажности грунта в закрепленном полиуретановым материалом и в природном состоянии является актуальным заданием. Статическим испытаниям подвергали образцы-модели незакрепленного и закрепленного грунта. Испытания осуществляли при разной влажности грунта от 15 % (в тугопластичной консистенции) до 6,9 % (в твердой консистенции). Нагрузку увеличивали медленно, ступенями шагом по 16 КПа, каждую из которых выдерживали по 5 минут, и доводили до напряжения 150 КПа. Для каждого образца-модели и нагрузки по разным величинам влажности  $W$  определены модули деформации  $E$ . Для количественной оценки влияния закрепления на деформативность грунта принят коэффициент увеличения модуля деформации от закрепления  $K_E$ .

Сравнение полученных величин  $K_E$  с показателями консистенции  $I_L$  исследованного супеска позволило сделать вывод, что  $K_E$  зависит от влажности  $W$  и показателя консистенции  $I_L$  и, следовательно, от исходного (естественного) состояния грунта. Коэффициент повышения модуля деформации  $K_E$  грунта от закрепления составит для грунтов консистенции: твердой – от 1 (эффекта нет) до 7; полутвердой – от 7 до 27; тугопластичной – от 27 до 37; мягкопластичной – от 37 до 49; текучепластичной – от 49 до 65; текучей – от 65 до 130.

**Ключевые слова:** закрепление, грунтополимерный композит, деформативность, модуль деформации.

**DEFORMATIVE PROPERTIES OF SOIL POLYMER COMPOSITE  
EXPERIMENTAL STUDIES AND PROSPECTS OF LONG-TERM CONDITIONS**

**Zvierieva A.S.**, post-graduate student,  
farwww@ukr.net, ORCID: 0000-0002-4832-3760

**Plugin A.A.**, Doctor of Engineering, Professor,  
aaplugin@gmail.com, ORCID:0000-0002-6941-2076

**Miroshnichenko S.V.**, PhD., Assistant Professor,  
*Ukrainian State University of Railway Transport*  
c197.9000@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7328-5209

**Reznichenko I.V.**, engineer  
*LLC Novii Grad*  
riv.spt@gmail.com

**Abstract.** One of the ways to increase the bearing capacity of soils is their fixation by injecting solutions that harden. In the case of the use of silicatization or smolization of soil consolidation is achieved by impregnating them. Therefore, the use of silicatization and smolization for loamy soils is complicated by their low permeability. For such soils, there is more injection of polyurethane materials. In the case of their injection, the rupture of soil layers occurs with its compaction and squeezing of water and the formation of reinforcing bodies.

Previous studies have established that, as a result of injection, polyurethane material penetrates into the soil with its rupture into blocks, probably due to shrinkage cracks and their embryos, and forms a ground-polymer composite.

The resulting composite has a greater deformation modulus than the soil. But the authors have not found literary data about their size, therefore, the study of the dependence of the modulus of soil deformation on the parameters of the injection of polyurethane materials is an actual task. Samples-models of loose and fixed ground were subjected to static tests. The tests were carried out at different soil moisture content from 15% (in a refractory consistency) to 6.9% (in a solid consistency). The load was gradually increased, gradually exceeding 16 KPa, and each withstood a voltage of 150 KPa. For each sample-model and load  $W$ , the strain modulus  $E$  is determined by different values. For a quantitative assessment, you can use the coefficient of increase of the strain modulus from fixing the  $K_E$ .

Comparison of the obtained values of  $K_E$  with the consistency indices of the  $I_L$  of the loamy sand studied here allows us to conclude that the  $W$  depends on the moisture level and the consistency index of the  $I_L$  and, therefore, on the initial (natural) soil condition. The coefficient of increase of  $K_E$  the strain modulus is from 1 (no effect) to 7; semi-solid – from 7 to 27; refractory – from 27 to 37; soft plastic – from 37 to 49; flow plastic – from 49 to 65; flowing – from 65 to 130.

**Keywords:** fastening, soil-polymer composite, deformability, deformation modulus.

Стаття надійшла 29.07.2019