

## **ЦЕМЕНТАЦІЯ ҐРУНТІВ ЗСУВОНЕБЕЗПЕЧНИХ СХИЛІВ**

*Для підтвердження ефективності закріплення ґрунтів були здійснені лабораторні дослідження на однопощинне зрушення по закритій системі ґрунту порушеної структури та того ж ґрунту, але закріпленого за допомогою цементациї.*

*For confirmation of efficiency of fixing soils laboratory researches on one flat-bed change on the closed system of soil of damaged structure and the same soil but fixed with the help of cementation.*

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими практичними завданнями.** При освоєнні зсувонебезпечних ділянок (та схилів) під будівництво першочерговим є здійснення інженерного захисту даної території, метою якого є запобігання, усунення або зниження до допустимого рівня негативного впливу на об'єкти потенційно небезпечних геологічних процесів. Поряд із механічним закріпленням, перерозподілом ґрунтових мас існують методи штучного укріплення ґрунту схилів, метою яких є збільшення сил опору зрушення. В останні роки розповсюдився метод закріплення глинистих ґрунтів вертикальними ґрунтоцементними елементами (ВГЦЕ) [1]. Метою роботи є експериментальне доведення збільшення характеристик міцності ґрунту внаслідок їх закріплення ВГЦЕ. Робота виконана під керівництвом д.т.н., професора М.Л. Зоценка.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких започатковано розв'язання поставленої проблеми.** Проблема освоєння зсувонебезпечних ділянок дуже характерна для Полтавської області та Полтави зокрема. Так, у Постанові Верховної Ради України № 1256 від 22 вересня 2004 р. «Про затвердження Комплексної програми протизсувних заходів на 2005 – 2014 рр.» [2] відмічено, що Полтавська область входить до п'ятірки областей, в яких набули найбільшого поширення зсувні та зсувонебезпечні процеси.

Згідно з нормативом [3] для оцінювання стійкості зсувонебезпечних схилів і визначення зсувного тиску за основні розрахункові характеристики ґрунтів необхідно приймати кут внутрішнього тертя  $\varphi$  та структурне зчеплення ґрунту  $c_s$ .

У лабораторних умовах за нормами [4] характеристики міцності визначають шляхом випробування на пряме зрушення у спеціальному приладі. Для встановлення залежності між опором зрушення  $\tau=Q/A$  та вертикальною напругою  $\sigma=F/A$ , де  $A$  – площа поперечного перерізу зразка,

дослід проводять при кількох вертикальних напруженнях, які протягом одного випробування залишаються постійними. Навантаження  $Q$  прикладають ступенями, поки не відбудеться зрушення.

Залежно від умов, при яких ґрунти в природних умовах здійснюють опір впливу граничних нормальних та дотичних напружень, розрізняють два основних види випробувань ґрунтів на пряме зрушення:

за «закритою системою» (неконсолідовано-недреноване випробування). Випробування виконують таким чином, щоб вологість ґрунту в процесі досліджу не змінювалась і ґрунт відповідно не встигав ущільнюватись. Опір зрушенню в цьому випадку стосується вологості та щільності, які ґрунти мали до випробування;

за «відкритою системою» (консолідовано-дреноване випробування). Таке випробування проводять після попереднього ущільнення зразків вертикальним навантаженням до стабілізації осідання, а горизонтальне зусилля на зразок прикладають ступенями, котрі витримують до стабілізації горизонтальних деформацій.

При дослідженні ґрунтів зсувонебезпечних територій та схилів необхідно готувати зразки з такими фізичними характеристиками, які найбільш точно відповідали б природним при прогнозованій критичній ситуації. Тобто зразки необхідно попередньо ущільнювати і водонасичувати лише при вертикальних тисках, що їх зазнаватиме ґрунт у масиві за умови його повного обводнення, тому що будь-який схил, що піддається антропогенному впливу, із часом неминуче обводнюється. Цим умовам найбільше відповідає неконсолідовано-недреноване випробування, яке ще називають швидким зрізом.

**Виділення не розв'язаних раніше частин проблеми, котрим присвячується стаття.** Оскільки в даній роботі розглядається метод закріплення ґрунту цементацією вертикальними ґрунтоцементними елементами саме зсувонебезпечних схилів, то механічні характеристики такого ґрунту пропонується визначати за неконсолідовано-недренованою схемою. Завдяки цементації ґрунту в ньому виникають структурні зв'язки, тобто з'являється структурне зчеплення, а також підвищується загальна міцність ґрунту, яка відповідає його довготривалому (питомому) зчепленню.

Тому за **мету роботи** прийнято визначення впливу закріплення ґрунту ґрунтоцементними елементами на його механічні характеристики: кут внутрішнього тертя  $\varphi$ , структурне  $c_s$  та водноколоїдне (питоме, довготривале) зчеплення  $c_w$ . Завданням таких досліджень є визначення можливості застосування ґрунтоцементних елементів для закріплення ґрунтів зсувонебезпечних територій та підрахунок необхідної кількості ґрунтоцементних елементів для закріплення ґрунтів із певними механічними характеристиками.

**Виклад основного матеріалу досліджень.** Для випробувань був використаний суглинок лесовий легкий, світло-коричневий, тугопластичний, водонасичений, порушеної структури з такими характеристиками: вологість на межі текучості  $W_L=0,35$ ; вологість на межі пластичності  $W_p=0,23$ ; число пластичності  $I_p=0,12$ ; природна вологість  $W=0,29$ ; показник текучості  $I_L=0,5$ ; щільність частинок ґрунту  $\rho_s=2,68$  г/см<sup>3</sup>; щільність ґрунту  $\rho=1,90$  г/см<sup>3</sup>; щільність сухого ґрунту  $\rho_d=1,47$  г/см<sup>3</sup>; коефіцієнт пористості  $e=0,82$ ; коефіцієнт водонасичення  $S_r=0,95$ .

Зразки ґрунтів виготовляються в «масловських» кільцях (внутрішній діаметр кільця  $d=71$  мм, висота кільця  $h=35$  мм, площа перерізу зразка  $A=40$  см<sup>2</sup>).

Ґрунт висушувався і перетирався у фарфоровій ступці. Потім його просіювали через сита і відбирали фракції, менші ніж 1 мм. Пошарово звожуючи, доводили ґрунт до заданої вологості й отриману масу втрамбовували в кільця, доводячи щільність до природного значення. Виготовлені зразки попередньо ущільнювалися при вертикальному тиску  $\sigma=0,05$  МПа. Такий підхід забезпечує підготовку зразків із фізичними характеристиками, близькими до характеристик ґрунту, що перебуває в природних умовах при прогнозованій критичній ситуації.

Для оцінювання ефекту закріплення ґрунтів ґрунтоцементними елементами (ГЦЕ) виготовлялися зразки чотирьох серій по 6 штук (рис. 1):

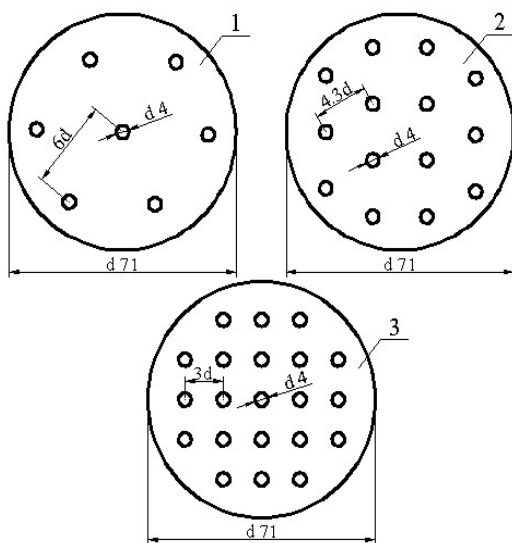


Рис. 1. – Зразки закріпленого ґрунту: 1 – 2,2% (7 ГЦЕ); 2 – 4,4% (14 ГЦЕ); 3 – 6,6% (21 ГЦЕ)

перша серія зразків виготовлялася без закріплення; зразки другої серії були закріплені 7-ма ґрунтоцементними елементами діаметром 4 мм, із кроком 24 мм, що складає  $6d$  (2,2%); зразки третьої серії закріплювалися 14-ма ґрунтоцементними елементами діаметром 4 мм, із кроком 17,2 мм, тобто  $4,3d$  (4,4%); зразки четвертої серії закріплювалися 21-м ґрунтоцементним елементом діаметром 4 мм, з кроком 12 мм, тобто  $3d$  (6,6%). Висота всіх ГЦЕ складає 30 мм. Верхні та нижні 2 – 3 мм утвореної западини заповнювались ґрунтом, горизонтальні поверхні зразків, на які передається вертикальне навантаження, вирівнювались. Процент закріплення ґрунту визначався як відношення сумарної площі перерізів ГЦЕ до площі перерізу кільця (площа зразка ґрунту  $A=40$  см<sup>2</sup>).

Закріплення ґрунту виконувалось таким чином. Спочатку в кільці в наміченому місці за допомогою маленького свердла пробурювався отвір діаметром 4 мм, в результаті чого утворювалась порожнина. Потім ця

порожнина заповнювалася ґрунтоцементом, що виготовляється з ґрунту, цементу та води, необхідні витрати яких розраховувалися так:

витрати ґрунту – це об’ємна кількість ґрунту, що заповнює порожнину діаметром 4 мм та висотою 30 мм;

витрати цементу – 15% від ваги сухого ґрунту;

витрати води – визначаються з водоцементного співвідношення В/Ц=1.

ґрунтоцемент подавався у порожнину маленькими шматочками та трохи ущільнювався для того, щоб у тілі ґрунтоцементного елемента по висоті не було повітряних прошарків. Далі зразки загорталися у поліетиленові пакети та зберігалися у вологому ексікаторі протягом 28 діб для набуття ґрунтоцементом необхідної міцності.

На момент випробування природна вологість зразків ґрунту склала  $W=0,23 - 0,24$ .

Випробування зразків ґрунту на одноплощинне зрушення проводилося у приладі ПСГ-1 конструкції інституту «Гідропроект» за трьома вертикальними навантаженнями: 0,05, 0,1 та 0,15 МПа за схемою неконсолідовано-недренованого випробування. Горизонтальне навантаження прикладалося ступенями по 0,005 МПа з інтервалом в 1 хв. Випробування вважалося закінченим при горизонтальних деформація зразка  $\geq 5$  мм.

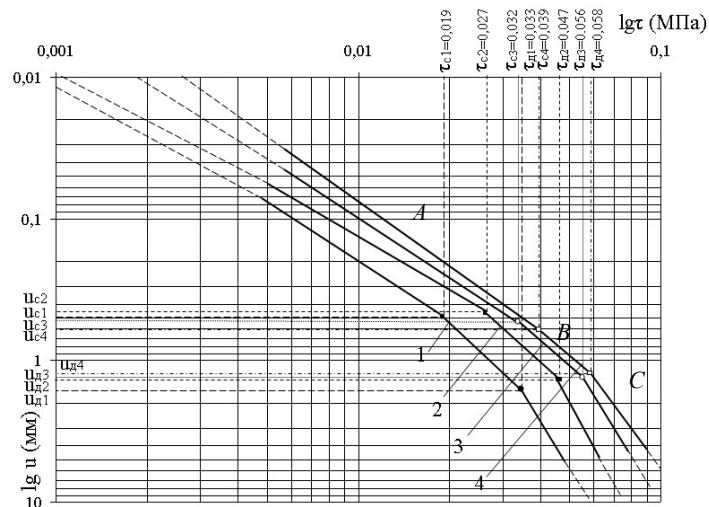


Рис. 2. – Графік залежності дотичних напружень  $lg \tau$  від деформацій  $lg u$  при  $\sigma=0,1$  МПа ґрунту:

1 – незакріпленого та з процентом закріплення: 2 – 2,2%; 3 – 4,4%; 4 – 6,6%

Основи методу, за яким проводилася обробка результатів випробувань на одноплощинне зрушення, викладені у роботі [5]. Для кожного окремого зрушення були побудовані графіки залежностей між дотичними напруженнями  $\tau$  та деформаціями  $u$ . Для визначення розрахункових опорів зрушення за результатами випробувань графіки будувалися у координатах «логарифм дотичних напружень  $lg \tau$  – логарифм деформацій зрушення  $lg u$ ». Один із подібних графіків випробувань ґрунту при  $\sigma=0,1$  МПа наведений на рис. 2. Даний графік порівняно зі звичайним

графіком залежності «дотичні напруження  $\tau$  – деформації зрушення  $u$ », більш наочно ілюструє фази роботи ґрунту при дії зсувних зусиль: *A* – ущільнення ґрунту в площині зрушення (зсувний тиск сприймається ґрунтом за рахунок структурних зв’язків); *B* – швидке зростання деформацій при подальшому збільшенні навантаження (структурні зв’язки руйнуються, тиск сприймається тільки за рахунок водноколоїдних зв’язків). У даній фазі протікає розвиток зрушення, відбувається

утворення поверхонь ковзання;  $C$  – розвиток пластичних деформацій (руйнування водноколоїдних зв’язків). Фаза характеризується втраченою несучою здатністю ґрунту.

Дотичні напруження, які відповідають межах між фазами, називаються критичними опорами.

Дотичне напруження між фазою ущільнення та фазою зсуву відповідає першому критичному опору ґрунту (структурній міцності  $\tau_{ст}$ ). Даному опору ґрунту відповідають незначні деформації до 0,5 мм.

Дотичне напруження між фазою зсуву та фазою пластичних деформацій відповідає другому критичному опору ґрунту – граничному опору зрушенню (довготривалій (водноколоїдній) міцності  $\tau_{д}$ ). Даному опору відповідають деформації до 1,2 мм.

Підставляючи у рівняння Мора – Кулона визначені при трьох вертикальних напруженнях дотичні опори ґрунту, отримаємо наступні залежності:

$$\tau_{ст} = \sigma \operatorname{tg} \varphi_1 + c_c; \quad (1)$$

$$\tau_{д} = \sigma \operatorname{tg} \varphi_2 + c_w. \quad (2)$$

Розв’язуючи рівняння (1) та (2), одержимо значення структурного зчеплення  $c_c$ , питомого (водноколоїдного) зчеплення ґрунту  $c_w$  і відповідні їм кути внутрішнього тертя  $\varphi_1$  та  $\varphi_2$ .

Показники міцності ґрунту порушеної структури закріпленого й незакріпленого за результатами випробувань на одноплощинне зрушення розраховувались аналітично за методом найменших квадратів за вихідними даними, поданими в табл. 1, 2.

**Таблиця 1 – До визначення структурного зчеплення  $c_c$**

Номер досліджу	$\sigma_i$ , МПа	$\tau_i$ , МПа (незакріплений)	$\tau_i$ , МПа (2,2%)	$\tau_i$ , МПа (4,4%)	$\tau_i$ , МПа (6,6%)
1	0,050	0,016	0,024	0,028	0,035
2	0,050	0,017	0,022	0,030	0,034
3	0,100	0,020	0,027	0,033	0,035
4	0,100	0,019	0,025	0,032	0,039
5	0,150	0,022	0,028	0,037	0,043
6	0,150	0,024	0,032	0,035	0,041

**Таблиця 2 – До визначення питомого зчеплення  $c_w$**

Номер досліджу	$\sigma_i$ , МПа	$\tau_i$ , МПа (незакріплений)	$\tau_i$ , МПа (2,2%)	$\tau_i$ , МПа (4,4%)	$\tau_i$ , МПа (6,6%)
1	0,050	0,030	0,044	0,051	0,054
2	0,050	0,033	0,043	0,053	0,053
3	0,100	0,033	0,050	0,056	0,055
4	0,100	0,035	0,047	0,054	0,058
5	0,150	0,037	0,051	0,060	0,060
6	0,150	0,039	0,055	0,063	0,062

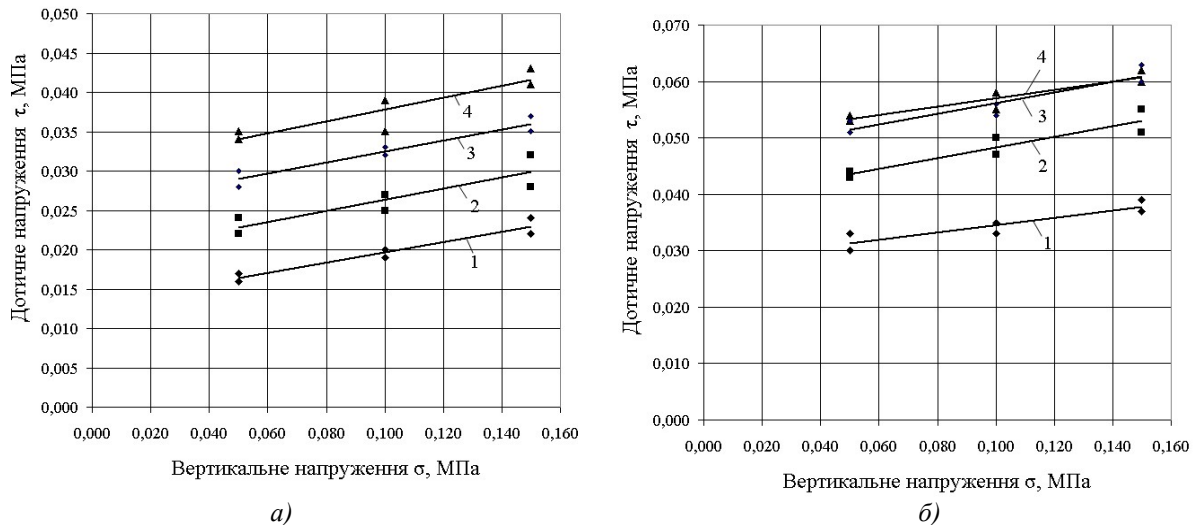


Рис. 3. – Графіки зрушення незакріпленого та закріпленого ґрунту:  
 а – за структурною міцністю; б – за довготривалою міцністю;  
 1 – незакріпленого та з процентом закріплення: 2 – 2,2%; 3 – 4,4%; 4 – 6,6%

За наведеними в табл. 1, 2 даними лабораторних досліджень ґрунту незакріпленого та закріпленого за допомогою ґрунтоцементних елементів побудовані графіки залежності між дотичними і нормальними напруженнями (рис. 3).

Показники міцності за результатами випробувань на одноплощинне зрушення досліджуваних ґрунтів наведені в табл. 3.

**Таблиця 3 – Результати дослідів щодо зіставлення міцності незакріпленого та закріпленого ґрунту**

Стан зразків ґрунту	Випробовування за структурною міцністю		Випробовування за довготривалою міцністю		Кількість зразків $n$	Коеф. варіації $v$	Коеф. кореляції $r$
	$\varphi$ 1, град.	$c_s$ , кПа	$\varphi$ 2, град.	$c$ , кПа			
Незакріплений	4	13,2	4	28,0	6	0,07	0,90
Закріплення 2,2%	4	19,3	5	38,8	6	0,10	0,89
Закріплення 4,4%	4	25,5	5	46,7	6	0,05	0,93
Закріплення 6,6%	4	30,3	5	49,5	6	0,07	0,90

Як видно з таблиці 3, у кожному окремому випадку коефіцієнт множинної кореляції  $r$  більший за 0,8, що свідчить про високі функціональні зв'язки між фізичними і механічними параметрами й адекватність прийнятої математичної моделі оброблення результатів експерименту.

Аналізуючи результати досліджень, можна зробити наступні висновки:

при закріпленні ґрунту ґрунтоцементними елементами структурна та довготривала міцність ґрунту збільшується. Чим більша кількість елементів у масиві ґрунту, тим більша його міцність;

міцність ґрунту збільшується завдяки зростанню структурного  $c_s$  і водноколоїдного  $c_w$  зчеплень;

кут внутрішнього тертя ґрунту  $\varphi=4^\circ$ , що не є характерним для суглинків тугопластичних. Проте, враховуючи, що досліджувався ґрунт порушеної структури, таке значення можливе;

кут внутрішнього тертя незакріпленого та закріпленого ґрунту майже однаковий, що пояснюється сталістю щільності зразків;

граничні опори ґрунту визначені при деформаціях, що набагато менші ніж 5 мм, за якими визначаються опори за методикою норм [4]. Значення механічних характеристик ґрунту, встановлені за запропонованою методикою, можна використовувати для розрахунків зсувонебезпечних ділянок для довготривалого прогнозу.

Раніше були проведені аналогічні дослідження суглинку лесованого важкого, порушеної структури. Зразки виготовлялися трьох серій за наведеною вище методикою: 1–ша серія – незакріплений ґрунт; 2–га серія – закріплення 2,2% (рис. 1, 1); 3–тя серія – закріплення 6,6% (рис. 1, 3). Показники міцності за цими даними подані в табл. 4.

**Таблиця 4**

Стан зразків ґрунту	Випробовування за структурною міцністю		Випробовування за довготривалою міцністю	
	$\varphi_1$ , град.	$c_s$ , кПа	$\varphi_2$ , град.	$c$ , кПа
Незакріплений	10	0,7	10	20,6
Закріплення 2,2%	10	6,8	10	33,7
Закріплення 6,6%	10	12,3	10	38,3

Як видно з табл. 4, закріплення ґрунту ґрунтоцементними елементами дає збільшення як структурної, так і довготривалої міцності. Чим більший процент закріплення, тим більша й міцність ґрунту.

За результатами випробувань (табл. 3, 4) побудуємо графіки залежності структурного та питомого зчеплень від процента закріплення (рис. 4), на яких наочно видно збільшення міцності ґрунту при його закріпленні за допомогою ґрунтоцементних елементів.

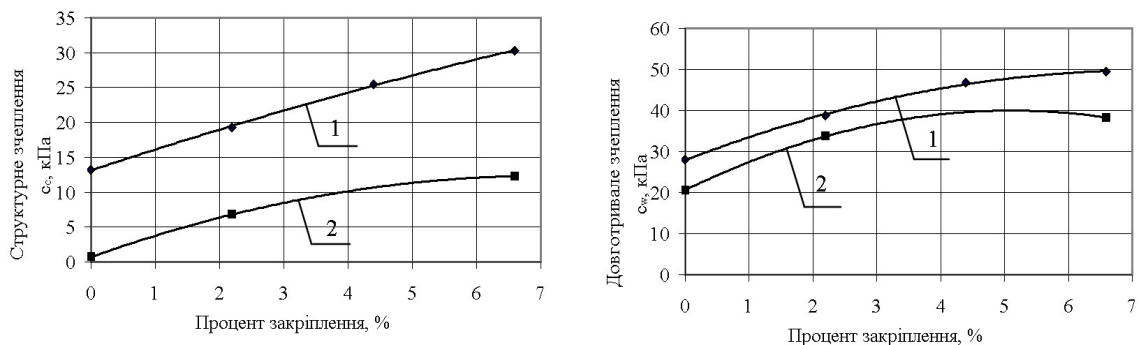


Рис. 4. Залежність структурної та довготривалої міцності від процента закріплення:  
 1 – ґрунт лесовий легкий порушеної структури;  
 2 – ґрунт лесовий важкий порушеної структури

При порівнянні результатів випробувань суглинку порушеної структури легкого та важкого, видно, що ефект закріплення для суглинків легких вищий, ніж у важких. Так, наприклад, при 6,6% закріплення у суглинку легкому структурне зчеплення збільшується на 17,1 кПа, а питоме – на 21,5 кПа; у важкому суглинку при тому ж проценті закріплення структурне зчеплення збільшується на 11,6 кПа, а питоме – на 17,7 кПа. Проте результати випробувань при невеликому проценті закріплення (2,2%) показали майже однаковий приріст міцності як для легкого, так і для важкого суглинків: структурне зчеплення в обох випадках завдяки цементації збільшилося на 6,1 кПа, питоме – на 10,8 кПа та 13,1 кПа відповідно.

Прогнозовані показники міцності лесових ґрунтів, закріплених ґрунтоцементними елементами, можливо визначати з графіків (рис. 4) за інтерполяцією, виходячи з початкових значень характеристик.

**Висновки з проведених досліджень.** Відповідно до діючих в Україні нормативів зсувний тиск на зсувонебезпечних територіях визначається з урахуванням кута внутрішнього тертя та структурного зчеплення ґрунтів. У роботі запропонована методика визначення структурного зчеплення й кута внутрішнього тертя випробуванням ґрунтів на одноплощинне зрушення за неконсолідовано-недренованою схемою та обробка результатів зрушення побудовою графіків «логарифм дотичних напружень  $\lg \tau$  – логарифм деформацій зрушення  $\lg u$ ». Перевірено вплив ґрунтоцементних елементів на зростання структурного зчеплення. Доведено, що закріплення масивів ґрунту зсувонебезпечних ділянок за допомогою ґрунтоцементних елементів дає позитивний ефект.

#### Література

1. Особливості армування ґрунтів вертикальними ґрунтоцементними елементами/[М.Л. Зоценко, С.Ф. Пічугін, Р.В. Петраш, О.О. Гудімов] // Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво). – К.: НДІБУ Мінбуду України, 2007. – №66. – С. 65–72.



2. Про затвердження Комплексної програми протизсувних заходів на 2005–2014 р.: Постанова Верховної Ради України № 1256 від 22 вересня 2004 р.

3. ДБН В.1.1-3-97. Інженерний захист територій, будинків та споруд від зсувів та обвалів. Основні положення. – К.: Держбуд України, 1998. – 40 с.

4. ДСТУ Б.В.2.1-4-96. Ґрунти. Методи лабораторного визначення характеристик міцності і деформативності. – К.: Держбуд України, 1997. – 24 с.

5. Великодний Ю. Й. Захист територій від зсувів: навчальний посібник/ Ю.Й. Великодний – Полтава: ТОВ «Поліграфічний центр «Скайтек», 2006. – 116 с.