

УДК 624.131.7

Дмитро Вікторович Рудаков,

д. техн. н., проф., зав. каф. гідрогеології та інженерної геології НТУ «Дніпровська політехніка»,
пр. Яворницького, 19, м. Дніпро, 49005, Україна,
e-mail: rudakov.d.v@nmu.one, <https://orcid.org/0000-0001-7878-8692>;

Василь Іполитович Тимощук,

к. техн. н., доц. каф. гідрогеології та інженерної геології НТУ «Дніпровська політехніка»,
e-mail: vasyl.tymoshchuk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3266-9828>;

Наталія Олександрівна Глущенко,

аспірантка каф. гідрогеології та інженерної геології НТУ «Дніпровська політехніка»,
e-mail: romanovska.n.o@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3639-7738>

ВПЛИВ ФІЛЬТРАЦІЇ ЛУЖНИХ РОЗЧИНІВ НА ДЕФОРМАЦІЙНІ ПРОЯВИ В ҐРУНТОВІЙ ОСНОВІ ІНЖЕНЕРНИХ СПОРУД

Проведено аналіз впливу статичного навантаження та втрат концентрованих лужних розчинів на деформаційні прояви в ґрунтовій основі і формування крену мостового крана. Методика досліджень включала лабораторні визначення фізико-механічних та просадкових властивостей ґрунтів, зокрема, елювіально-делювіальних суглинків, визначення хімічного складу ґрунтових вод на досліджуваній ділянці та оцінки розчинення твердої фази лужним розчином з використанням рентгенофлуоресцентного спектрометра СЕР-01 ElvaX Plus, варіативні розрахунки осади та просадки на основі стандартних методик з урахуванням часткового розчинення твердої фази ґрунту.

Лабораторними дослідженнями встановлені компоненти (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , K_2O) та їх частка у масі твердої фази елювіально-делювіального суглинка (до 13.3%), що можуть переходити в більш розчинні солі у концентрованому лужному розчині. Це створює умови для розвитку просадки хімічного походження, суттєво більшої порівняно з деформаціями ґрунту в умовах фільтрації нейтральних розчинів.

Проведені розрахунки осади та просадки без та з урахуванням хімічного впливу на ґрунти в основі фундаменту споруди показали, що критичні деформації, що призводять до неприпустимого крену між елементами конструкції мостового крана понад 0,004, формуються лише у разі нерівномірних просадок хімічного походження понад 5...10 см. Розраховані деформації та крени відповідають виявленим деформаціям та крену між колонами крана, які перевищили максимально допустиме значення у 2016 р. і негативно вплинули на умови експлуатації даної споруди. При цьому, погіршення несучої здатності ґрунтів внаслідок впливу лужного розчину відбувається навіть після технічної меліорації ґрунтів, проведеної понад 20 років тому назад. Питома вага розчиненої твердої фази в ґрунті оцінюється у 1-1,5%, що відповідає результатам впливу сильних лужних розчинів, оціненого у цій роботі та в інших дослідженнях.

Отримані результати можуть бути застосовані при прогнозуванні умов довготривалої експлуатації споруд на ґрунтах, через які фільтруються хімічно агресивні розчини.

Ключові слова: ґрунт, осади, просадка, лужний розчин, суглинок, вилуговання, деформації, крен.

Д. В. Рудаков, В. І. Тимощук, Н. А. Глущенко. ВЛИЯНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ ЩЕЛОЧНЫХ РАСТВОРОВ НА ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ В ҐРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЯХ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ. Проведен анализ влияния статической нагрузки и утечек концентрированных щелочных растворов на деформационные проявления в ґрунтовой основе и формирования крена мостового крана. Методика исследований включала лабораторные определения физико-механических и просадочных свойств ґрунтов, в частности, элювиально-делювиальных суглинков, определения химического состава ґрунтовых вод на исследуемом участке и оценки растворения твердой фазы щелочным раствором с использованием рентгенофлуоресцентного спектрометра СЭР-01 ElvaX Plus, вариативные расчеты осади и просадки на основе стандартных методик с учетом частичного растворения твердой фазы ґрунта.

Лабораторными исследованиями установлены компоненты (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , K_2O) и их доля в массе твердой фазы элювиально-делювиального суглинка (до 13.3%), которые могут переходить в более растворимые соли в концентрированном щелочном растворе. Это создает условия для развития просадки химического происхождения, существенно большей по сравнению с деформациями ґрунта в условиях фильтрации нейтральных растворов.

Проведенные расчеты осади и просадки без и с учетом химического воздействия на ґрунт в основании фундамента сооружения показали, что критические деформации, приводящие к недопустимому крену между элементами конструкции крана более 0,004, формируются только в случае неравномерных просадок химического происхождения более 5...10 см. Рассчитанные деформации и крены соответствуют выявленным деформациям и крену между колоннами крана, которые превысили максимально допустимое значение в 2016 г. и негативно повлияли на условия эксплуатации данного сооружения. При этом ухудшение несущей способности ґрунтов в результате воздействия щелочного раствора происходит даже после технической меліорации ґрунтов, проведенной более 20 лет тому назад. Удельный вес растворенной твердой фазы в ґрунте оценивается в 1-1,5%, что соответствует результатам воздействия сильных щелочных растворов, оцененного в этой работе и в других исследованиях.

Полученные результаты могут быть применены при прогнозировании условий длительной эксплуатации сооружений на ґрунтах, через которые фильтруются химически агрессивные растворы.

Ключевые слова: ґрунт, осади, просадка, щелочной раствор, суглинок, выщелачивание, деформации, крен.

Постановка проблеми. Згідно з різними класифікаціями процесів і факторів, можна виділити понад 10 основних видів техногенного впливу на ґрунти, як частину геологічного сере-

довища [1]. За природою впливу ці види можна умовно розділити на три групи чинників, що включають: 1) статичне та динамічне наванта-

ження, 2) вплив фільтрації води, 3) вплив хімічно агресивних речовин та розчинів.

До статичного та динамічного навантажень призводять операції під час формування будівельних виїмок, кар'єрів, підземних комунікацій, будівництва фундаментів різних споруд, створення та експлуатації транспортної інфраструктури, заходи з технічної меліорації, зокрема, ущільнення ґрунтів перед будівництвом. Вплив фільтрації води проявляється, насамперед, через зміну властивостей ґрунтів при втратах води з каналів, басейнів, інтенсивних опадах тощо. Скидання і складування промислових відходів, втрати хімічно агресивних вод і технологічних розчинів та їх подальша фільтрація у зоні аерації і водоносних горизонтах активізує перехідні процеси в твердій фазі, зокрема, хімічну суфозію, вилугування, карст, що суттєво змінює фізико-механічні властивості ґрунтів. Результатом цього є поява додаткових деформацій ґрунту, зниження його несучої здатності та погіршення умов експлуатації споруд різного призначення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Необхідність і важливість оцінки змін властивостей ґрунтів внаслідок сукупності цих процесів вперше була відзначена Г.І. Покровським ще у 1937 р. Теоретичні основи і практичні методи урахування змін фізико-механічних властивостей ґрунтів розвивалися М.М. Гольдштейном, Н.А. Єрмолаєвим, В.В. Міхеєвим, М.М. Масловим та ін. [2].

В дослідженнях останніх десятиліть оцінювався вплив окремих чинників на зниження міцнісних властивостей та несучої здатності ґрунтів, пропонувалися методи кількісного прогнозу цих явищ. Основною закономірністю є зниження міцності ґрунтів внаслідок зростання вологості, яке, зокрема, було встановлене на прикладі суглинків [3]. Лабораторними дослідженнями було показано [4], що сили зчеплення залежать не лише від щільності та вологості, а й від речового складу ґрунту. В певних умовах осадка поверхні земляної греблі розвивається через гідравлічний зв'язок між резервуаром і зоною просочування, що було виявлено геофізичними дослідженнями [5].

Деформації штучної ґрунтової основи та вплив змін вологості на механічні властивості ґрунтів кількісно оцінювалися при розрахунку крену кільцевого крану [6] та дамб хвостосховища [7]. При оцінюванні стійкості схилу також перспективним є використання потенціалу його активації, продемонстрованого в роботі [8].

Суттєвий внесок (до 50%) у просідання поверхні під статичними навантаженнями робить відбір підземних вод, що підтверджується загальною кількістю зафіксованих просідань [9].

Значення цього чиннику підтверджується результатами моделювання та моніторингу зниження ґрунтових вод [10].

У багатьох випадках зниження міцнісних властивостей обумовлено тривалим хімічним впливом на ґрунт, зокрема, агресивних розчинів [11]. Домінуючим чинником цього процесу є розчинення твердої фази, що часто пов'язано з переходом малорозчинних сполук кальцію та алюмінію у більш мобільні форми. З точки зору кількісного опису цього процесу практичну цінність мають встановлення лінійної залежності інтенсивності вилугування іонів Ca^{2+} від карбонатної агресивності води [12]; залежність швидкості реакції вилугування алюмосилікатів від лужності розчину та температури процесу [13]. Дослідженнями розчинності гідроокису кальцію та масообміну Ca^{2+} в лужному середовищі було виявлено, що розчинений $\text{Ca}(\text{OH})_2$ є домінуючим у розчині з рН вище 13, а $\text{Ca}(\text{OH})_2$ також утворюється, але в меншій кількості [14]. Спроба математичного опису підземного вилугування кальцієвмісних порід на макроскопічному рівні була представлена, зокрема, у моделі, що описує взаємодію кислоти в порах, заповнених рідиною, з компонентами, які утворюють матрицю гірської породи [15]. За результатами цих досліджень, просадка, спричинена значними навантаженнями, збільшується зі зростанням верхніх навантажень і зменшується з глибиною.

Взаємозв'язок між ступенем розсіювання солей та швидкістю їх вилугування досліджувався при оцінюванні ризиків розчинення солей на появу провалів та осідання поверхні землі з урахуванням площі взаємодії «сіль-розчинник» [16], при чисельному моделюванні впливу хімічної суфозії на просідання ґрунту [17].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. У попередніх дослідженнях, як правило, вивчалися прояви лише одного з чинників, а зміни під впливом одразу кількох чинників досліджувалися переважно на якісному рівні. Це, зокрема, стосується оцінки вилугування твердої фази ґрунту хімічно агресивними розчинами та його впливу на фізико-механічні властивості і зниження несучої здатності. Параметри цих процесів або відсутні або носять загальний характер у відповідних методиках [18]. Належне врахування цих чинників і процесів є надзвичайно важливим для оцінки стійкості дамб та глинистих екранів відстійників і накопичувачів кислотних або лужних шлаків та розчинів, хвостосховищ червоного шламу тощо.

Слід зважати на те, що в умовах фільтрації агресивних розчинів у ґрунтах погіршення міцнісних властивостей і втрата їх несучої здатності може проявитися через тривалий проміжок часу і

лише після цього призвести до суттєвого порушення цілісності конструкцій, формування надкритичного крену споруд тощо. З урахуванням старіння різноманітних інженерних споруд та інфраструктури, виникає актуальна задача достовірного кількісного аналізу, оцінки та прогнозу стану навантаженого ґрунтового масиву, що знаходиться під впливом хімічно агресивних рідин.

Формулювання мети статті. Метою даної роботи є аналіз впливу лужних розчинів, на ґрунтову основу інженерних споруд, та оцінка цього впливу на появу деформацій, нерівномірне осідання споруд і формування їх крену.

Сукупний техногенний вплив на ґрунт в основі споруди розглянемо на прикладі мостового крану, що розташований на території промислового підприємства у Дніпропетровській області. Ґрунти на об'єкті, побудованому понад 20 років тому, перебувають під впливом статичного навантаження колон та збільшення мінералізації ґрунтових вод внаслідок втрат з басейнів, де внаслідок обробки гранульованого шлаку металургійного виробництва утворюються лужні розчини високої концентрації, агресивні до бетону. Динамічний вплив транспорту, що доставляє матеріали на об'єкт, є незначним. У 2016 р. було зафіксовано осідання опорних колон від початкового положення до 10...15 см та перекис горизонтальних балок крану, внаслідок чого максимальний крен між окремими елементами споруди вже зараз дорівнює чи перевищує максимально допустиме значення.

У зв'язку з цим виникла необхідність з'ясування причин нерівномірного осідання фундаменту та крену між опорами крана. У більш широкому контексті, це дозволить оцінити параметри деформації та зміну несучої здатності ґрунтових основ, що піддаються впливу хімічно агресивних розчинів.

Виклад основного матеріалу дослідження

Матеріали та методи. При дослідженнях використовувались матеріали інженерно-геологічних вишукувань на ділянці цеху з переробки відходів металургійного виробництва площею 5400 м², що розташований на півдні Дніпропетровської області (рис. 1).

Кран складається з 2 кареток і 27 опорних колон, кожна з яких опирається на точковий фундамент загальною площею 56 м² глибиною залягання 1,5 м; вантажопідйомність однієї каретки становить 10 т, загальна вага навантаженого крану – близько 300 т. Тиск на внутрішні та зовнішні колони становить 0,08 МПа та 0,16 МПа відповідно. Згідно проектною документації, перед будівництвом понад двадцять років тому на ділянці була проведена технічна меліорація, а саме ущільнення ґрунту, результатом чого мало стати

зменшення просадкових властивостей лесоподібних суглинків. За режимом роботи кран відноситься до категорії 7К – приводні крани мостового типу з лебідковими вантажними візками при цілодобовій роботі. Максимально допустимі горизонтальні деформації (зміщення) колон відкритих кранових естакад категорії 7К становить 5 см, а крену між сусідніми колонами – 0,004 [19].

В геоморфологічному відношенні ділянка знаходиться в межах четвертинної надзаплавної тераси правого берега р. Дніпро. За даними з 12 пробурених на ділянці свердловин глибиною 20 м, геологічна будова досліджуваної товщі порід представлена легкими елювіально-делювіальними суглинками та супісками, які повсюдно перекриті з поверхні сучасними насипними техногенними ґрунтами (рис. 2). За даними вишукувань, водотрив не розкритий, а рівень ґрунтових вод знаходиться на глибині 3,2...5,5 м від денної поверхні. Отже, досліджувана ділянка не є підтопленою і фундамент крану не замочений. Товща не замочених просадкових ґрунтів під фундаментом коливається від 2,76 м до 3,3 м. Інженерно-геологічні вишукування та визначення рівня ґрунтових вод були проведені у листопаді 2016 р., дана пора року не є найбільш посушливою чи максимально водною, тому отримані виміри можна віднести до середньорічного рівня.

За хімічним складом ґрунтові води на ділянці місцями досить агресивні і мають високі показники лужності (рН 13...14), мінералізації (11,0...19,0 г/л), загальної жорсткості (47,0...77,0 мг·екв/дм³) [20]. Лабораторний аналіз проб води показав значне перевищення гранично допустимих концентрацій макрокомпонентів [21]. Зокрема, у свердловині 1 концентрації катіонів K⁺+Na⁺ становили 5488,60 мг/л, аніонів HCO₃⁻ – 4758,00 мг/л, SO₄⁻ – 4212,11 мг/л, CO₃²⁻ – 2700,00 мг/л, Cl⁻ – 2662,50 мг/л, мінералізації – 19853,77 мг/л, значення загальної і карбонатної жорсткості співпали і становили 77,97 мг·екв/дм³. У свердловинах 2 і 3 на відстанях 20 м та 65 м від контуру басейну під краном, сума іонів становить 5325,8 мг/л та 2522,0 мг/л, а лужність 6,99 та 7,4, відповідно; це свідчить про локальний характер поширення лужних розчинів безпосередньо під басейном. Разом з тим, відібрана вода класифікована як сильно- та середньо-агресивна до окремих видів бетону, яка внаслідок тривалої експлуатації може призводити до розвитку дрібних порожнин, тріщин та проявів негерметичності.

Такі специфічні показники пов'язані, насамперед, з втратами лужних технологічних розчинів з басейнів, розташованих безпосередньо на ділянці крана, в якому гранулюється шлак, і

на відстані 50 м від крана (рис. 2). Виходячи з результатів хімічних аналізів підземної води, відібраної зі спостережних свердловин, і враховуючи тривалий час експлуатації цих споруд, де перебувають агресивні розчини, слід очікувати, що товща лесоподібних суглинків під днищем басейнів, як в зоні аерації, так і нижче рівня ґрунтових вод, насичена висококонцентрованими лужними розчинами. Бічне розтікання цих роз-

чинів відбувається повільно через відносно невеликий коефіцієнт фільтрації (до 0,5 м/добу) та специфічне для лесів переважання вертикальної проникності над горизонтальною. Таким чином, ці ґрунти тривалий час повільно фільтрують лужний розчин, що призводить до вилуговування легко розчинних солей, які, за оцінками досліджень [22], можуть становити до 10% твердої фази лесоподібних суглинків.

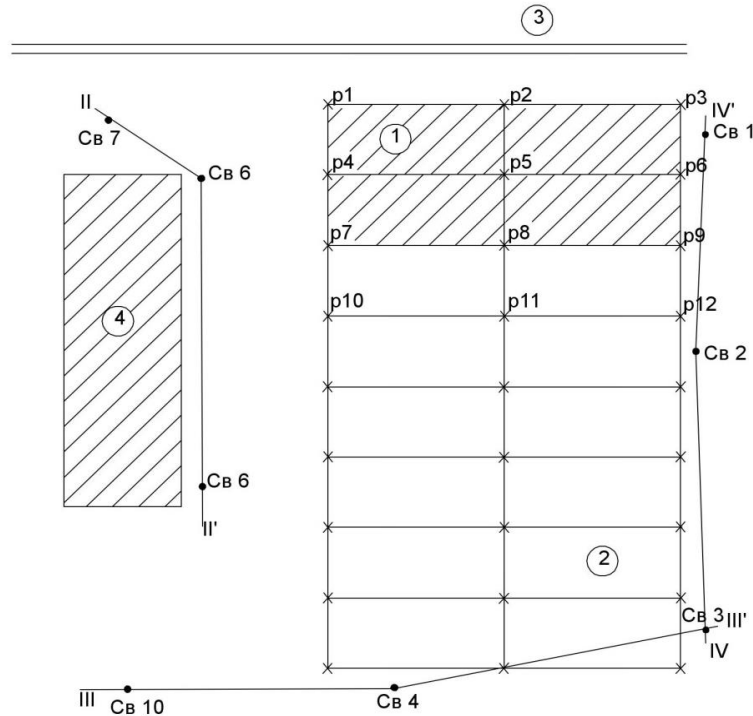


Рис. 1. Ділянка розташування мостового крана: 1 – басейни технологічних розчинів; 2 – склад гранульованого шлаку; 3 – колії залізничного транспорту для доставки шлаку на ділянку; 4 – ставок-відстійник; × – опори крана, p1, ..., p12 – точки для розрахунку осідань поверхні.

№ слоя (МГЭ)	Геологический индекс	Глубина залегания слоя		Мощность, м	Литологический разрез		Глубина
		Кромки (абс. отм.)	Половина (абс. отм.)		Консистенция	Отбор проб	
H	t Q ₄	0,00 47,40	0,70 46,70	0,70			
H	t Q ₄	0,70 46,70	1,70 45,70	1,00			1
1	vd Q ₃	1,70 45,70	3,80 43,80	1,90			2 3
2	vd Q ₃	3,80 43,80	4,80 42,80	1,20			4
2'	vd Q ₃	4,80 42,80	10,40 37,00	5,80			5 6 7 8 9 10

- Н – насипний ґрунт (гранульований шлак металургійного виробництва), суглинок сірий, напівтвердий, будівельне сміття;
- 1 – суглинок сухий, твердий, лесоподібний з прожилками карбонатів;
- 2 – суглинок, тугопластичний до текучого, лесоподібний;
- 2` - суглинок, тугопластичний до текучого, лесоподібний, водонасичений.

Рис. 2. Літологічна колонка свердловини 2 (розташування див. на рис. 1)

Технічна меліорація була застосована ще під час будівництва, в результаті чого просадка лесових суглинків була частково усунена до початку експлуатації крана. Разом з тим, за результатами інженерно-геологічних досліджень у 2016 р. були виявлені просадкові властивості ґрунтів на ділянці крана (відносна просадка незамоченого ґрунту складає до 0,03), що дозволяє зробити висновок про можливість розвитку просадки після тривалої експлуатації.

Виходячи з результатів натурних та лабораторних досліджень, ґрунти на ділянці розташування крана зазнають неоднорідного впливу статичного навантаження в умовах змін вологості та хімічного складу порового розчину. Строгий кількісний опис цих процесів можливий шляхом застосування чисельних гідрогеомеханічних моделей з урахуванням фазових переходів, що потребує належного оцінювання вихідних параметрів, особливо масообміну за умов змінного показника кислотності порового розчину. Такі моделі ще розроблюються і потребують теоретичного обґрунтування та тестування. З іншого боку, для інженерних потреб в умовах тривалої експлуатації споруд практичну та теоретичну цінність мають оцінки граничних значень властивостей ґрунтів, які безпосередньо впливають на розвиток деформацій, а також граничні значення самих деформацій, у тому числі осадки, просадки і крену. Тому у подальшому зосередимось на оцінюванні граничних значень основних параметрів та деформацій при фільтрації лужних розчинів.

Методика розрахунку. В таких умовах сумарне просідання ґрунту у ґрунтовому масиві, навантаженому фундаментами колон, можна визначити за формулою:

$$S_{\Sigma} = S_1 + S_2 + S_3, \quad (1)$$

де S_1 – осадка ґрунту, S_2 – його просадка, причому величини S_1 та S_2 залежать від вологості; S_3 – просадка внаслідок хімічного впливу лужного розчину на скелет ґрунту.

Осадка ґрунту під статичним навантаженням S_1 розраховується методом пошарового підсумовування за формулою [23]:

$$S_1 = \beta \sum_{i=1}^n \frac{(\sigma_{zp,i} - \sigma_{zy,i}) h_i}{E_i} + \beta \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{zy,i} h_i}{E_{e,i}}, \quad (2)$$

де β – безрозмірний коефіцієнт, $\beta = 0,8$; $\sigma_{zp,i}$ – середнє значення вертикального нормального напруження від зовнішнього навантаження в i -му шарі ґрунту по вертикалі; $\sigma_{zy,i}$ – середнє значення вертикального напруження від власної ваги ґрунту, вийнятого з котловану в i -му шарі ґрунту по вертикалі, що проходить через центр підшви, на глибині z від підшви фундаменту; h_i – товщина

i -го шару ґрунту; n – кількість шарів товщі, яка здавлює основу; E_i – модуль деформації i -го шару ґрунту за гілкою первинної навантаження; $E_{e,i}$ – модуль деформації i -го шару ґрунту за гілкою вторинної навантаження (модуль пружності).

Оскільки вплив напружень від фундаменту з глибиною залежно від властивостей порід зменшується, то в розрахунках враховувалися шари ґрунтів, що залягають до глибин 8,4...10,4 м. Для отримання більш точних результатів цей інтервал був розбитий на шари товщиною до 1,2 м. Властивості ґрунтів були визначені за лабораторними аналізами зразків, відібраних на досліджуваній ділянці.

Просідання ґрунту під фундаментом при зміні його вологості внаслідок замочування зверху, при втратах з водних комунікацій, а також замочування знизу при підйомі рівня ґрунтових вод розраховувалось для сумарних напружень під дією власної ваги ґрунту за формулою [23]:

$$S_2 = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{sl,i} h_i k_{sl,i}, \quad (3)$$

де $S_{sl,i}$ – відносне просідання i -го шару ґрунту; h_i – товщина i -го шару ґрунту; $k_{sl,i}$ – безрозмірний коефіцієнт, який обчислюється за таблицею; n – кількість шарів, на які розділена зона просідання відповідно до літологічного розрізу та горизонтом S_{si} .

Розрахунок просадки ґрунту виконувався для тих самих параметрах шарів, що і розрахунок його осадки. Навантаження на кожен опорну колону були обчислені з урахуванням її положення (зовнішня чи внутрішня колонна).

Враховуючи розташування басейну під краном як найімовірніше місце фільтрації лужних розчинів і максимальних просадок, розрахунки були зосереджені на колонах, що обмежують контур басейну, та на найближчому до басейну ряді колон. Тому осадка і просадка ґрунту за формулами (2) і (3) визначалися під колонами мостового крана, що відповідають розрахунковим точкам p_1, \dots, p_{12} (рис. 1). Слід очікувати, що оцінюваний крен в межах та безпосередньо навколо цієї зони може бути найбільшим на ділянці крана через нерівномірну просадку. Потужності літологічних різностей та їх фізико-механічні властивості в розрахункових точках були визначені на основі інтерполяції даних інженерно-геологічних досліджень.

При розрахунках фундамент мостового крана був схематизований як точковий з урахуванням фактичної поверхні опорних балок крана. За цими даними був проведений розрахунок осадки та просадки для точок p_1, \dots, p_{12} , а на цій основі – крену між колонами, розташованими у цих точках.

Статичне вертикальне нормативне навантаження на колону для даного крана було прийнято при розрахунках 185 кН [19], з урахуванням цього тиск на внутрішні та зовнішні колони становив 0,08 та 0,16 МПа відповідно.

Оцінювання впливу лужних розчинів на ґрунти. З іншого боку, міцнісні та деформаційні властивості ґрунту могли знизитися через часткове розчинення твердої фази ґрунту при фільтрації лужних розчинів з басейну у зоні 1 (рис. 1). Враховуючи на дуже високу лужність порового розчину, встановлену біля басейну під краном ($pH > 13$), можна зробити висновок про те, що у товщі ґрунту на глибину кілька метрів під дном басейну в умовах повільної низхідної фільтрації відбувається процес, аналогічний активному розчиненню алюмосилікатів при виробництві глинозему, що призводить до переходу важкорозчинних сполук у більш розчинні та мобільні форми, появи додаткових порожнин та зменшення несучої здатності ґрунтів, їх додаткової просадки.

Зважаючи на умови ділянки, масштаб об'єкту та лужність розчину, провести натурний експеримент з вилугування ґрунтів аналогічним розчином є технічно неможливим. Тому кількісна оцінка ефекту розчинення твердої фази лужним розчином проводилася в лабораторних умовах, при цьому досліджувалося вилугування з суглинку, який еквівалентний ґрунту під фундаментами колон на ділянці крану. Навіска суглинку, висушеного при 105 °С [20] до маси сухої речовини 2,0044 г, витримувалася 24 год в розчині $H_2O + NH_4OH$ з $pH = 10,5$, що є розбавленим еквівалентом лужного розчину в порах ґрунту з $pH > 13,0$. Маса твердої фази після сушки зменшилася на 1,22% і склала 1,98 г, при цьому pH внаслідок хімічних реакцій зменшився до 10,06. Таким чином, максимальна кінетика вилугування для даного показника pH оцінюється у $0,0122 \text{ дб}^{-1}$. Результати дослідження, отримані з використанням рентгенофлуоресцентного спектрометра CEP-01 ElvaX Plus, представлені на рис. 3-5.

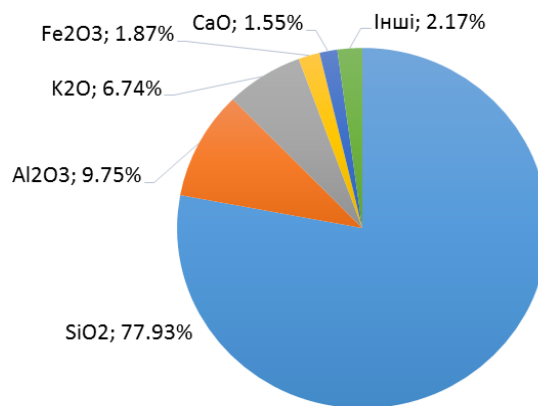


Рис. 3. Хімічний склад твердої фази необробленого зразка суглинку

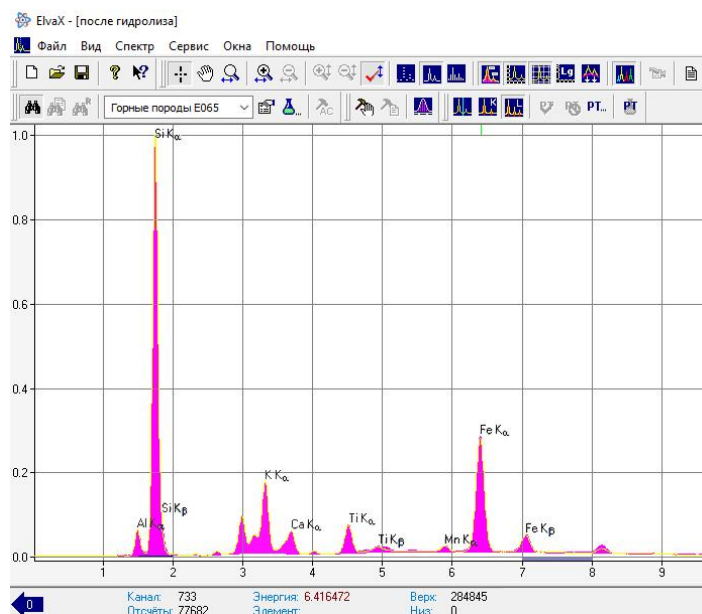


Рис. 4. Результати визначення хімічного складу твердої фази елювіально-делувіального суглинку рентгенофлуоресцентним спектрометром CEP-01 ElvaX Plus

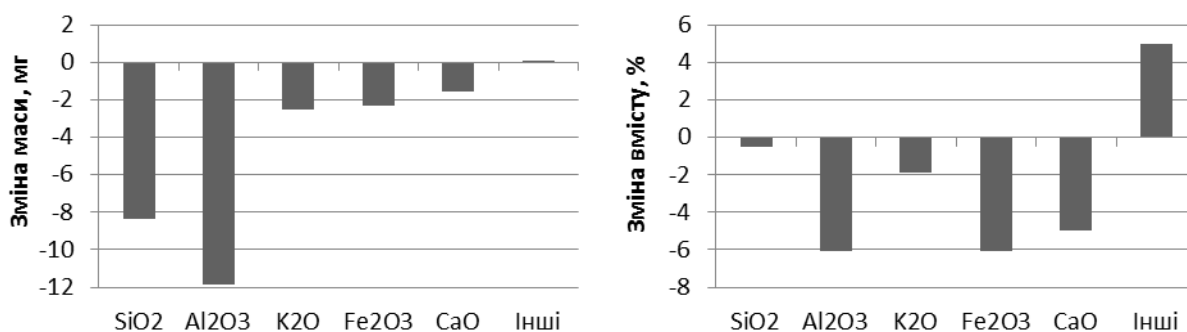
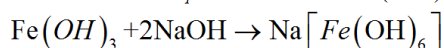
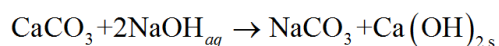
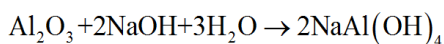


Рис. 5. Зміна маси компонентів твердої фази суглинку (а) та вмісту у ґрунті відносно їх початкової маси (б)

Зменшення маси твердої фази відбулося насамперед за рахунок таких компонентів, як Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , меншою мірою K_2O . Їх частка у загальній масі твердої фази необробленого суглинку (без K_2O) становить 13,27%, що є теоретично можливим максимумом розчинення твердої фази для даного ґрунту. З урахуванням того, що не вся маса цих сполук може фактично розчинитися в натурних умовах при повільній фільтрації, отримана оцінка добре узгоджується з результатами [2,22], згідно яких 5...10% маси лесоподібних суглинків складають сполуки, які переходять у розчинний стан під впливом луги. За результатами експерименту слід відзначити також деяке зменшення вмісту SiO_2 , але його перехід до більш розчинних форм оцінюється на порядок повільнішим і ймовірно, не буде мати визначального впливу на зменшення маси твердої фази. Незначне абсолютне зростання вмісту деяких мікрокомпонентів (0,1% від початкової маси зразка) не впливає суттєво на загальний тренд зменшення маси скелету ґрунту під впливом лужного розчину.

При перенесенні результатів лабораторного дослідження на умови ділянки слід зважати на те, що в натурних умовах показник рН є набагато вищим, а його дія на ґрунти – значно тривалішою, хоча реакції відбуваються набагато повільніше, ніж у лабораторних умовах, і за наявності тупикових пор не охоплюють увесь ґрунтовий масив.

На досліджуваній ділянці переважають катіони Na^+ та K^+ , отже, тут найбільш ймовірні такі реакції, зокрема, за участю гідроксиду натрію



де aq – рідка фаза, s – тверда фаза. Для гідроксиду калію ці реакції записуються аналогічно.

Розчинність утворюваних сполук алюмінію, заліза і кальцію суттєво вища порівняно з вихідними сполуками. В результаті нерозчинні чи малорозчинні гідроксиди алюмінію, заліза, марган-

цю і карбонату кальцію при реакції з лужним середовищем утворюють значно більш розчинні сполуки, у тому числі тетрагідроксоалюмінати та гексагідроксоферати (III), які низхідною вертикальною фільтрацією виносяться до ґрунтового водоносного горизонту та мігрують далі від ділянки з поступовим зменшенням показника рН.

Максимальну просадку внаслідок хімічного впливу на поровий розчин пропонується оцінити наступним чином. За результатами лабораторних досліджень теоретично можливе зменшення частки твердої фази внаслідок вилугування α (оцінюється у 5-10%). В умовах постійного навантаження під вагою колон та вантажів відбувається стиснення утворених додаткових порожнин у суглинках. За песимістичним сценарієм усі порожнини повністю заповнюються сусідніми частинками ґрунту, причому початкова пористість під навантаженням залишається незмінною. За таких умов додаткову просадку від хімічної дії лужного порового розчину можна оцінити за формулою:

$$S_3 = \alpha \Delta h_{ch}, \quad (4)$$

де α – частка розчиненої твердої фази ґрунту, Δh_{ch} – товщина шару ґрунту, через який фільтрується лужний розчин. Припускаючи рівномірні за площею басейну втрати та рівномірне розподілену за площею швидкість низхідної фільтрації, а також лише часткове розчинення легкорозчинних сполук у суглинку (1...2%) замість повного розчинення (10...15%), отримуємо консервативну оцінку просадки хімічного походження. Нерівномірність втрат за площею басейну може призвести до нерівномірності просадок і збільшення прогнозованого крену між колонами. Мінімальна товщина шару, що зазнає впливу лужного розчину, для ділянки басейну оцінюється у 5 м (3 м у зоні аерації під його дном та 2 м у верхній частині ґрунтового водоносного горизонту). За даними гідрогеологічного моніторингу (рис. 6) можна вважати, що вплив лужних розчинів за межами басейну зменшується в напрямку до розрахункової точки р12. Тому можна вважати що

їх вплив під точками p11 та p12 мінімальний. До точки p10 потоки підземних вод можуть донести лужні розчини, тому для цієї точки можна припустити, що вилугування відбувається лише у верхній частині ґрунтового водоносного горизонту з оцінюваною товщиною 2 м.

Більш детальна оцінка деформацій та розвитку крену потребує розрахунку тривимірного поля швидкості фільтрації та концентрації солей, застосування рівнянь консолідації з урахуванням зміни параметра масообміну α залежно від рН розчину, швидкості вертикальної фільтрації в ґрунті, та інших параметрів.

Результати та обговорення. Результати розрахунків осадки та просадки в точках p1-p12 під впливом статичного навантаження та фільтрації лужних розчинів представлені на рис. 7, а розраховані значення крену між опорними колонами крану – у табл. 1.

Спочатку осадка та просадка були розраховані без урахування хімічного впливу. За формулою (2) осадка становила для внутрішніх та зовнішніх колон – 0,0071...0,0214 м, 0,0070...0,0214 м, а просадка за формулою (3) – відповідно 0,0425...0,038 м, 0,038...0,051 м. Сумарне максимальне значення осадки і просадки без урахування хімічного впливу становить 0,069 м в

розрахунковій точці p4, а мінімальне – близько 0,0475 м в точці p7. Оцінюваний крен для найкоротших відстаней між колонами крану не перевищує 0,001. Таким чином, статичне навантаження не могло бути головною причиною просадок та формування неприпустимого крену.

Урахування фільтрації лужного розчину через зону аерації, а також верхній шар ґрунтового водоносного горизонту під дном басейна і під точкою p10 суттєво збільшує оцінювану просадку. Навіть у разі розчинення лише 1% твердої фази ґрунту просадка хімічного походження оцінюється у 0,02-0,0542 м, а крен може досягти 0,0042, що фактично знаходиться за межею допустимого значення. Максимальна просадка фундаменту опорних балок крану за рахунок вилугування легкорозчинних солей оцінюється в точці p6, а мінімальна – в точках p11 та p12. Сумарний крен за рахунок просадки та осадки при розчиненні 1,5% твердої фази для двох колон на межі басейну перевищує допустиме значення. Зазначимо, що оцінений діапазон параметру α узгоджується зі значенням розчинення твердої фази 1,22%, отриманим експериментальним шляхом.

Таким чином, тривала фільтрація лужних

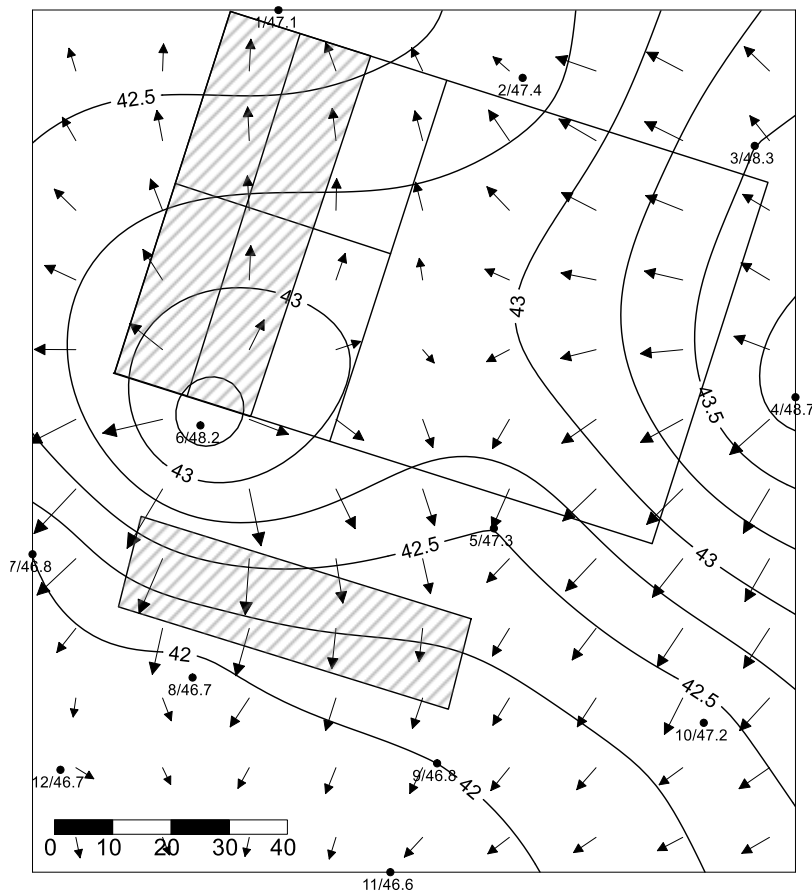
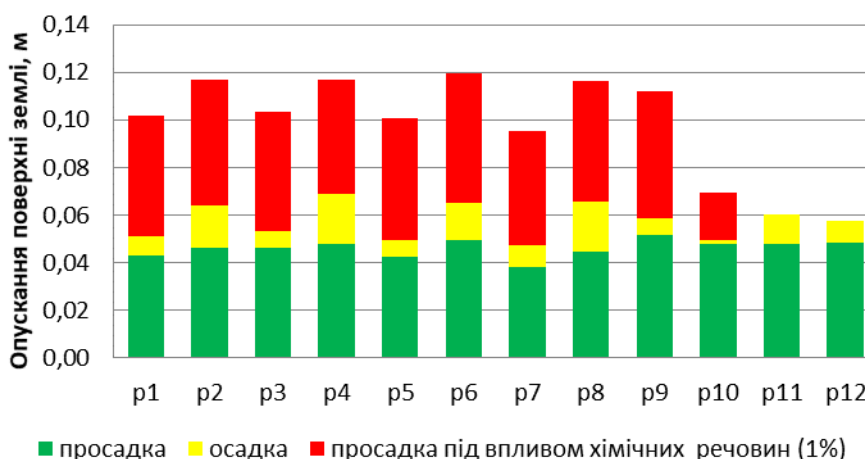
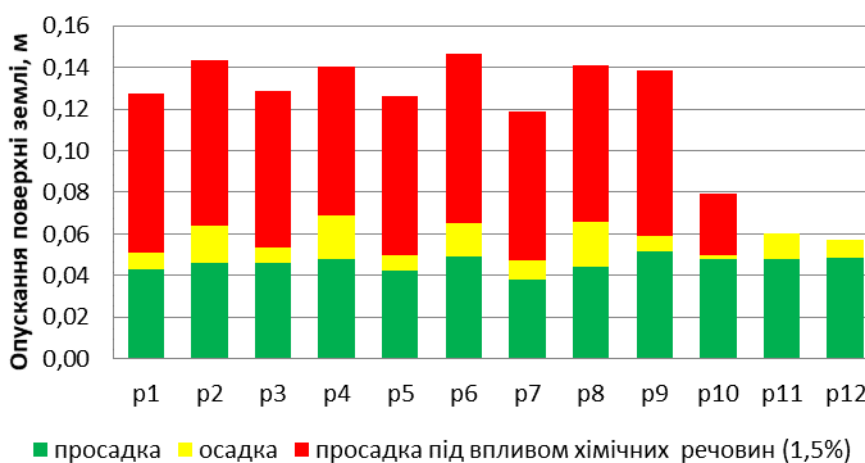


Рис. 6. Схема потоку ґрунтових вод на ділянці. Позначення біля свердловин: чисельник – номер свердловини, знаменник – рівень ґрунтових вод; заштриховані ділянки – місця розташування басейнів



а)



б)

Рис. 7. Деформації ґрунтової основи під впливом вилугування частки α твердої фази ґрунту: а) $\alpha=0,01$, б) $\alpha=0,015$

Таблиця 1

Оцінювані значення крену між опорами мостового крану з урахуванням вилугування частки α твердої фази ґрунту: а) $\alpha=0,01$, б) $\alpha=0,015$; p1,...,p12 – розрахункові точки; жирним шрифтом виділені значення крену з перевищенням критичного значення 0,004

А)

p1	0,0001	p2	0,0001	p3
0,0003		0,0001		0,0003
p4	0,0001	p5	0,0001	p6
0,0000		0,0001		0,0001
p7	0,0001	p8	0,0001	p9
0,0022		0,0040		0,0042
p10	0,00067	p11	0,0000	p12

Б)

p1	0,0001	p2	0,0001	p3
0,0004		0,0002		0,0005
p4	0,0002	p5	0,0002	p6
0,0000		0,0001		0,0001
p7	0,0001	p8	0,0001	p9
0,0033		0,0060		0,0064
p10	0,0010	p11	0,000	p12

розчинів в основі опорних колон є найбільш ймовірною причиною деформаційних проявів ґрунтів та формування неприпустимого крену між опорними колонами мостового крану. Більш детальне вивчення стану основи даної споруди потребує проведення хімічних аналізів порового розчину безпосередньо біля фундаментів колон у поєднанні з тривимірним моделюванням зон міграції лужних розчинів з відповідним уточненням інженерно-геологічних розрахунків.

Висновки.

1. За результатами аналізу інженерно-геологічних та гідрогеологічних умов ділянки мостового крану на півдні Дніпропетровської області техногенні зміни стану та властивостей ґрунтів основи під впливом втрат технологічних розчинів високої лужності оцінені як найбільш ймовірні чинники значного осідання ґрунтів з формуванням неприйнятної крену конструкцій та погіршення умов експлуатації об'єкту.

2. Лабораторні дослідження впливу лужного розчину на ґрунт дозволили оцінити вміст компонентів твердої фази (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , K_2O), що переходять у більш розчинні сполуки та кінетику вилуговування при активному масообміні $0,0122 \text{ дб}^{-1}$; при цьому теоретично можлива частка сполук, що потенційно може розчинюватись, сягає 13,27%, що корегує з оцінками вмісту легкорозчинних сполук у суглинках та результатів дослідження вилуговування алюмосилікатів при виробництві глинозему; дану частку можна розглядати як теоретичний максимум зменшення маси твердої фази даного ґрунту внаслідок тривалої фільтрації лужних розчинів.

3. Проведені розрахунки осадки та просадки без та з урахуванням хімічного впливу на ґрунти в основі фундаменту споруди показали, що критичний крен між елементами конструкції крану понад 0,004 може виникати лише у разі нерівномірних просадок з перепадом 5...10 см

на ділянках, що зазнають хімічного впливу, причому погіршення несучої здатності ґрунтів внаслідок фільтрації лужного розчину можливо навіть після технічної меліорації ґрунтів.

4. Для уточнення та розвитку отриманих результатів перспективними є більш детальні лабораторні дослідження змін фізико-механічних та міцнісних властивостей ґрунтів, що зазнали впливу хімічно агресивних розчинів у поєднанні з моделюванням їх тривимірної міграції у зоні аерації та верхньому шарі водоносного горизонту, що дозволить виконувати більш адекватні інженерно-геологічні прогнози у часі. Перспективними є також дослідження структурних змін ґрунтів, пов'язані з їх фізико-механічними властивостями.

Вдячності. Автори вдячні зав. кафедри хімії НТУ «Дніпровська політехніка» проф. Светкіній О.Ю. та її співробітникам за проведення лабораторних досліджень.

Література

1. Шутенко Л.Н. *Механика ґрунтов, основания и фундамент [Текст]* / Л.Н. Шутенко, А.Г. Рудь, О.В. Кичаева и др. // *X, ХНУГХ ім. А.Н. Бекетова*, 2015. – 501 с.
2. Лысенко М.П. *Состав и физико-механические свойства ґрунтов [Текст]* / М.П. Лысенко // *М., Недра*, 1980. – 271 с.
3. Джаманбаев М.Дж. *Влияние влажности на устойчивость склона и прочностные свойства суглинистых ґрунтов [Текст]* / М.Дж. Джаманбаев, С.Б. Омуралиев // *Проблемы современной науки и образования*. – 2017. – С. 116-119.
4. Колпашников Г.А. *Влияние влажности и солей на прочностные и деформационные свойства дисперсных ґрунтов [Текст]* / Г.А. Колпашников, Аль-Татити Саиф Сами Хуссейн, Аль-Хаснави Раед Махмуд Абдулл-Хуссейн, И.П. Крошнер // *Вестник БНТУ*. – 2010. – №2. – С. 5-7.
5. Ikard S.J. *Geophysical Investigation of Seepage Beneath an Earthen Dam* / S.J. Ikard, J. Rittgers, A. Revil M.A. Mooney // *Ground Water*. 2015. – Vol. 53(2). – Pp. 238-250. <https://doi.org/10.1111/gwat.12185>.
6. Тимошук В.І. *Досвід визначення деформаційних властивостей металургійних шлаків при реконструкції доменної печі №3 комбінату "ЗАПОРІЖСТАЛЬ" [Текст]* / В.І. Тимошук, Т.В. Папуша, В.Т. Головка // *Збірник наукових праць НГУ*. – 2018. – № 54. – С. 253-261.
7. Tymoshchuk V. *Hydro and Geomechanical Stability Assessment of the Bund Wall Bottom Slope of the Dniprovsk Tailing Dump* / V. Tymoshchuk, V. Tishkov, Yu. Soroka // *Mining of Mineral Deposits. Ukrainian School of Underground Mining. National Mining University*. – "LizonoffPress", Dnipro, 2018. – Vol. 12. – Iss. 1. – P. 39-47.
8. Садовенко И. А. *О потенциале активации оползневового лессового массива [Текст]* / И. А. Садовенко, Н. И. Деревягина // *Научовий вісник Національного гірничого університету*. – 2012. – № 2. – С. 80-84.
9. Yang Chen, Wen Zhao, Yong Huang, Pengjiao Jia. *Investigation of land subsidence based on column element settlement model in soft-soil area* // *Geofluids*, 2019. – 16 p. <https://doi.org/10.1155/2019/9530135>
10. Sarah D., Syahbana A.J., Fajar Lubis R., Mulyono A. *Modelling of land subsidence along Tanah Mas-Pelabuhan section Semarang city using finite element method* // *Riset geologi dan pertambangan*, 2011. – Vol. 21, No. 2. – Pp. 105-119.
11. Мулюков Э.И. *Последствие зацеplачивания глинистых ґрунтов оснований фундаментов [Текст]* / Э.И. Мулюков // *Вестник Академии наук Республики Башкортостан*. – 2008. – №4. – С. 44-49.
12. Перкова Т.И. *Исследование выщелачивания трещиноватых пород под влиянием минерализованных шахтных вод [Текст]* / Т.И. Перкова, Д.В. Рудаков // *Вісник Нац. гірничого ун-ту*. – 2014. – №5. – С. 5-10.
13. Занавескин К.Л. *Выщелачивание примесей SiO_2 и Al_2O_3 раствором гидроксида натрия из лейкоксена Ярегского месторождения [Текст]* / К.Л. Занавескин, А.Н. Масленников, С.М. Занавескина, Г.С. Дмитриев, Л.Н. Занавескин, Е.Д. Политова, В.И. Власенко. *Химическая технология*. – 2018. – Т. 19, №4. – С. 161-172.
14. Kutus, B., Gácsi, A., Pallagi, A., Pálkó, I., Peintler, G., Sipos, P. *A comprehensive study on the dominant formation of the dissolved $\text{Ca}(\text{OH})_2(\text{aq})$ in strongly alkaline solutions saturated by $\text{Ca}(\text{II})$* // *RSC Advances*, 2016. Vol. 6(51). – Pp. 45231-45240. <https://doi.org/10.1039/c6ra05337h>
15. Гальцев О.В. *Математическое моделирование процесса подземного выщелачивания на макроскопическом уровне [Текст]* / О.В. Гальцев, О.А. Гальцева // *Научные ведомости БелГУ*. – 2018. – №4. – С. 478-486. <https://doi.org/10.18413/2075-4639-2018-50-4-478-486>

16. Poberezhnyi L.Ya, Poberezhna L.Ya, Maruschak P.O., Panin S.V Assessment of Potential Environmental Risks from Saline Soils Subsidence // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2017. – 50. – Pp. 7. <https://doi.10.1088/1755-1315/50/1/012046>
17. Мичута О.Р. Моделирование влияния химической суффозии на фильтрационную консолидацию засоленных грунтов в неизотермических условиях [Текст] / Мичута О.Р., Власюк А.П., Мартынюк П.Н. // Матем. моделирование. – 2013. – №2(25). – С. 3-18.
18. Железняков Г.В. Гидротехническое сооружения [Текст] / Г.В. Железняков, Ю.А. Ибадзаде, П.Л. Иванов и др., под общ. ред. П.В. Недриги // М., Стройиздат, 1983. – 543 с.
19. Справочник проектировщика. Металлические конструкции в 2-х т. [Текст] – М.: АСВ. – 1998. – 512 с.
20. Грунты. Метод лабораторного определения содержания карбонатов: ГОСТ 34467-2018 [Действующий с 2019-01-09] – Росстандарт, 2019. – 12 с.
21. Питьева вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения: СанПиН 2.1.4.1074-01 [Действующий 2002-01-01] – М., Минздрав России, 2002. – 62 с.
22. Шварцев С.Л. Общая гидрогеология [Текст] / С.Л. Шварцев // М., «Недра». – 1996. – 424 с.
23. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування: ДБН В.2.1-10-2009. [Текст] – К.: Мін-регіонбуд України. 2009. – 82 с.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу.

UDC 624.131.7

Dmytro Rudakov,

Doctor (Technical Sciences), Professor of Department of Hydrogeology and Engineering Geology,
Dnipro University of Technology, 19 Dmytra Yavornytskoho St., Dnipro, 49005, Ukraine,
e-mail: rudakov.d.v@nmu.one, <https://orcid.org/0000-0001-7878-8692>;

Vasyl Tymoshchuk,

PhD (Technical Sciences), Associate Professor of Department of Hydrogeology and Engineering Geology,
Dnipro University of Technology,
e-mail: vasyl.tymoshchuk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3266-9828>;

Nataliia Hlushchenko,

PhD Student of Department of Hydrogeology and Engineering Geology Dnipro University of Technology,
e-mail: romanovska.n.o@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3639-7738>

THE EFFECT OF ALKALINE SOLUTION SEEPAGE ON DEFORMATION APPEARANCES IN THE SOIL FOUNDATION OF ENGINEERING STRUCTURES

Aim. This study aims to analyze the influence of static loading and descending seepage of concentrated alkaline solution on deformation appearances in the soil foundation and forming the construction tilt using the example of an overhead crane.

Methodology. The methodology of research included laboratory determination of the physico-mechanical and subsidence properties of soils focusing on alluvial-diluvial loam and groundwater chemical composition at the studied site, evaluation of leaching parameters of loam soil phase by an alkaline solution using the X-ray fluorescent spectrometer CEP-01 ElvaX Plus, and variable-based calculations of soil subsidence based on the standard techniques applied in geotechnics taking into account partial dissolution of soil solid phase.

Findings. This study examined the case of an overhead crane with the foundation affected by the leakages of strong alkaline solutions from technological basins on the ground. Laboratory studies have established the components of Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, K₂O soluble with strong alkaline solution and their share of 13,3% in the solid phase of the alluvial-diluvial loam sampled at the site. These compounds can transform into more soluble salts in a concentrated alkaline medium, which creates the conditions for the development of soil collapse and subsidence, with the chemically induced deformations being more significant in comparison to those in soils filled with a neutral pore solution.

Calculations of soil subsidence and collapse with and without taking into account the chemical impact on soils under the overhead crane foundation showed that the non-uniform critical deformations of 5...10 cm leading to an unacceptable tilt between the crane columns of 0.004 can be caused only by the long-term descending seepage of an alkaline solution and leaching the alluvial-diluvial loam. The calculated deformations and tilt correlate with the appeared deformations and the tilt between the crane columns that exceeded the maximum allowed value since 2016, which affected the operating conditions for this construction. Reducing

the bearing capacity of soils due to the influence of alkaline solution occurred after engineering reclamation of soils performed prior to crane operation more than two decades ago.

Scientific novelty. The effect of strong alkaline solution that seeps through the upper soil layer loaded by constructions has been evaluated; the share of dissolved solid phase in the affected soil is estimated at 1-1,5%, which is in agreement with the dissolution parameters of soil influenced by strong alkaline solutions evaluated in this study and other researchers.

Practical value. The results obtained can be applied for long-term predicting the operational conditions and stability of buildings constructed on soils subjected to seepage of chemically aggressive solutions.

Keywords: soil, collapse, subsidence, alkaline solution, loam, leaching, deformation, building tilt.

References

1. Shutenko L.N., Rud A.G., Kichaev O.V. et al. (2015). *Soil mechanics, bases and foundation*. Kharkiv: A.N. Beketov KNUGH, 501.
2. Lysenko M.P. (1980). *Composition and physicommechanical properties of soils*. Moscow: Nedra, 271.
3. Dzhamanbaev M.J., Omuraliyev S.B. (2017). Influence of moisture on the slope stability and strength properties of clay soil. *Problems of modern science and education*. 5 (87), 116–119.
4. Kolpashnikov G.A., Al-Tamimi Saif Sami Hussein, Al-Hasnawi Raed Mahmoud Abdull-Hussein, & Kroshner I.P. (2010). Influence of humidity and salts on the strength and deformation properties of dispersed soils. *Bulletin of Belarusian National Technical University*. 2, 5–7.
5. Ikard S.J., Rittgers J., Revil A., Mooney M.A. (2015) *Geophysical Investigation of Seepage Beneath the Earthen Dam*. *Ground Water*. 53(2), 238-250. <https://doi.10.1111/gwat.12185>.
6. Tymoschuk V.I., Papusha T.V., Golovko V.T. (2018). The experience of determining the deformation properties of metallurgical slag in the reconstruction of blast furnace #3 of the plant "Zaporizhstal". *Proceedings of National Mining University*. 54, 253–261.
7. Tymoshchuk V., Tishkov V., Soroka Yu. (2018). Hydro- and Geomechanical Stability Assessment of the Bund Wall Bottom Slope of the Dniprovsk Tailing Dump. *Mining of Mineral Deposits. Ukrainian School of Underground Mining. National Mining University. "LizonoffPress", Dnipro*, 12, 1, 39–47.
8. Sadovenko I.O., Derevyagina N.I. (2012). On activation of loess landslide massif potential. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 2, 80–84.
9. Yang Chen, Wen Zhao, Yong Huang, Pengjiao Jia. (2019). Investigation of land subsidence based on column element settlement model in soft-soil area. *Geofluids*, 2019, 16. <https://doi.org/10.1155/2019/9530135>.
10. Sarah D., Syahbana A.J., Fajar Lubis R., Mulyono A. (2011). Modelling of land subsidence along Tanah Mas-Pelabuhan section Semarang city using finite element method. *Riset geologi dan pertambangan*, 21, 2, 105–119.
11. Mulyukov E.I. (2008). The consequence of alkalization of clay soils of the foundations. *Bulletin of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortan*. 4, 44–49.
12. Perkova T.I., Rudakov D.V. (2014). Investigation of leaching of fractured rocks under the influence of mineralized mine water. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 5, 5-10.
13. Zanaevskina K.L., Maslennikov A.N., Zanaevskina S.M., Dmitriev G.S., Zanaevskina L.N., Politova E.D., Vlasenko V.I. (2018). Leaching of SiO₂ and Al₂O₃ Impurities with a Sodium Hydroxide Solution from the Leukoxen of the Yarega Field. *Chemical Technology*. 19(4), 161–172.
14. Kutus B., Gács, A., Pallagi A., Pálkó I., Peintler G., Sipos P. (2016) A comprehensive study on the dominant formation of the dissolved Ca(OH)₂(aq) in strongly alkaline solutions saturated by Ca(II) RSC *Advances* 6(51). 45231-45240. <https://doi.org/10.1039/c6ra05337h>.
15. Galtsev O.V., Galtseva O.A. (2018). Mathematical modeling of the process of underground leaching at the macroscopic level. *Scientific statements of Belarusian National Technical University*. 50(4), 478–486. <https://doi.10.18413/2075-4639-2018-50-4-478-486>.
16. Poberezhnyi L.Ya, Poberezhna L.Ya, Maruschak P.O., Panin S.V. (2017) Assessment of Potential Environmental Risks from Saline Soils Subsidence. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 50, 7. <https://doi.10.1088/1755-1315/50/1/012046>
17. Michuta O.R., Vlasyuk A.P., Martynyuk P.N. (2013). Modeling the effect of chemical suffusion on filtration consolidation of saline soils in non-isothermal conditions. *Mathematical Modeling*. 2(25), 3–18.
18. Zheleznyakov G.V. Ibadzade Yu.A., Ivanov P.L. et al. Nedriga P.V. (Eds.) (1983). *Hydrotechnical construction*. Moscow: Stroyizdat, 543.
19. Designer reference. *Metal structures in two volumes*. (1998). Moscow: ABC, 512.
20. Rosstandart (Effective from 2019-01-09) *Soils*. (2018). The method of laboratory determination of carbonate content: GOST 34467-2018, 12.
21. Ministry of Health of Russia (Effective 2002-01-01) *Drinking water. Hygienic requirements for water quality of centralized drinking water supply systems. Quality control. Hygienic requirements for ensuring the safety of hot water supply systems: Moscow, SanPiN 2.1.4.1074-01*, 62.
22. Shvartsev S.L. (1996) *General hydrogeology*. Moscow, Nedra, 424.
23. *The basics and the foundation of the equipment*. (2009). Design guidelines: DBN V.2.1-10-2009. Kyiv, Minre-gionbud of Ukraine, 82.