

ИЗМЕНЕНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ В ОСНОВАНИИ СООРУЖЕНИЙ ПОД ВЛИЯНИЕМ ФИЛЬТРАЦИИ ЩЕЛОЧНЫХ РАСТВОРОВ

Д.В. Рудаков, В.И. Тимощук, Н.А. Глуценко, Национальный технический университет «Днепропетровская политехника», Украина

Выполнена оценка изменений деформационных свойств грунтов основания и формирования крена мостового крана под влиянием статической нагрузки и утечек щелочных растворов с учётом выщелачивания твердой фазы грунта. Проведенные расчеты осадки и просадки в основании фундамента сооружения показали, что критические деформации формируются только в случае просадок химического происхождения в результате воздействия щелочного раствора.

Введение. На основании различных классификаций можно выделить несколько видов техногенного воздействия на грунты, как часть геологической среды. По природе воздействия эти виды можно условно разделить на три группы факторов, характеризующих статические и динамические нагрузки, влияние фильтрации и химически агрессивных веществ в поровом растворе.

Формирование строительных выемок, карьеров, подземных коммуникаций, фундаментов различных сооружений, транспортной инфраструктуры, технической мелиорации приводит к статическим и динамическим нагрузкам. Влияние фильтрации проявляется, прежде всего, в виде изменения свойств грунтов при потерях воды из каналов и бассейнов, интенсивных атмосферных осадках. Утечки химически агрессивных вод и технологических растворов и их фильтрация в зоне аэрации и водоносных горизонтах активизирует химическую суффозию и карст, что существенно изменяет физико-механические свойства грунтов. Результатом этого является появление деформаций грунта, снижение его несущей способности и ухудшение условий эксплуатации сооружений.

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы. В предыдущих исследованиях [1-6], как правило, изучались проявления отдельных факторов, совместное их воздействие рассматривалось преимущественно на качественном уровне. Это касается растворения твердой фазы грунта кислотными или щелочными растворами с последующим изменением физико-механических свойств и снижением несущей способности; данные по этим вопросам отрывочны или носят общий характер в соответствующих отраслевых методиках. Учет этих процессов необходим для оценки устойчивости дамб и глинистых экранов отстойников и накопителей химически активных шламов и растворов. Ухудшение прочностных свойств грунтов может проявиться спустя длительный промежуток времени и привести к существенному нарушению целостности конструкций и сооружений, формированию критического крена. С учетом старения различных инженерных сооружений и инфраструктуры, возникает актуальная задача достоверной количественной оценки и прогноза состояния нагруженного грунтового массива в условиях фильтрации химически активных жидкостей.

Формулировка цели статьи. Целью данной работы является анализ влияния щелочных растворов на грунтовую основу инженерных сооружений, и оценка этого влияния на появление деформаций, осадку и формирования крена сооружений.

Воздействие химически активных растворов на почву в основании сооружения рассмотрим на примере мостового крана, построенного более 20 лет назад и расположенного на территории промышленного предприятия в Днепропетровской области. В результате обработки гранулометрического шлака образуются щелочные растворы высокой концентрации, агрессивные к бетону. В 2016 г. было отмечено оседание опорных колонн от исходного положения до 10...15 см, в результате чего максимальный крен между элементами сооружения к настоящему времени достиг или превысил максимально допустимую величину, в связи с чем возникла необходимость выяснения причины неравномерного оседания фундамента и появления крена между опорами мостового крана.

Изложение основного материала исследования. При исследованиях использовались материалы инженерно-геологических изысканий на участке цеха по переработке отходов металлургического производства площадью 5400 м² (рис. 1). Кран состоит из 2 кареток и 27 колонн, каждая из которых опирается на точечный фундамент; при этом общий вес груженого крана составляет около 300 т. Согласно проектной документации, перед строительством 20 лет назад была проведена техническая мелиорация, результатом которой должно было стать уменьшение просадочных свойств лессовидных суглинков. Максимально допустимые горизонтальные деформации колонн открытых крановых эстакад данной категории крана (7К) составляет 5 см, а величина крена между соседними колоннами – 0,004 [9].

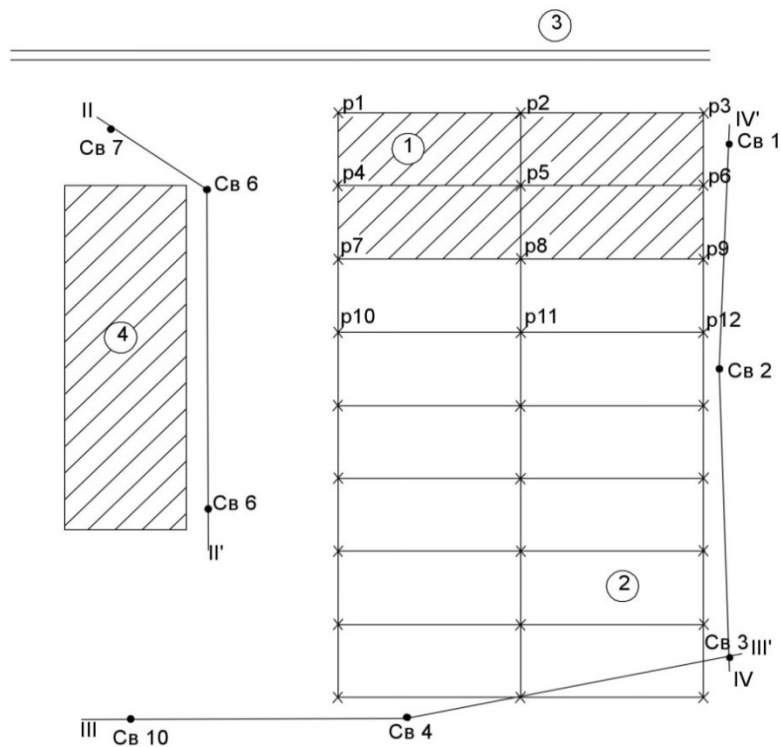


Рис. 1. Участок расположения мостового крана: 1 – бассейны технологических растворов; 2 – склад гранулированного шлака; 3 – пути железнодорожного транспорта для доставки шлака на участок; 4 – пруд-отстойник; × – опоры крана, p1, ..., p12 – точки для расчета осадок поверхности

В геоморфологическом отношении участок находится в пределах четвертичной надпойменной террасы правого берега р. Днепр. Согласно данным бурения на участке скважин глубиной до 20 м геологическое строение исследуемой толщи пород представлено легкими эолово-делювиальными суглинками и супесями, которые повсеместно перекрыты с поверхности современными насыпными техногенными грунтами. По данным выполненных изысканий, водоупор не раскрыт, исследуемая область не является подтопленной, а фундамент крана не замочен. Грунтовые воды на участке достаточно агрессивны и имеют высокие показатели щелочности (рН 13...14), минерализации (11,0...19,0 г/л), общей жесткости (47,0...77,0 мг·экв/дм³). В частности, в скважине 1 концентрации катионов K⁺+Na⁺ составили 5,5 г/л, анионов HCO₃⁻ – 4,8 г/л, SO₄⁻ – 4,2 г/л, CO₃²⁻ – 2,7 г/л, Cl⁻ – 2,7 г/л, минерализация – 19,9 г/л, общая и карбонатная жесткость совпали (78 мг·экв/дм³). При этом в скважинах 2 и 3 на расстояниях 20 и 65 м от контура бассейна под краном, сумма ионов составила 5,3 г/л и 2,5 г/л, а щелочность – 6,99 и 7,4, соответственно.

Такие специфические показатели связаны, прежде всего, с потерями щелочных растворов из бассейнов, расположенных непосредственно на участке крана и на расстоянии 50 м от него (рис. 1). Исходя из результатов химических анализов подземных вод, а также учитывая длительное

время эксплуатации сооружений, где находятся химически агрессивные растворы, следует ожидать, что толща лессовидных суглинков под днищем бассейнов, как в зоне аэрации, так и ниже уровня грунтовых вод, насыщена концентрированными щелочными растворами. Боковое растекание этих растворов происходит медленно из-за относительно небольшого коэффициента фильтрации лессовидных суглинков. Таким образом, в этих грунтах длительное время фильтруется щелочной раствор, что приводит к растворению легкорастворимых солей, составляющих, по некоторым оценкам [10], около 10% твердой фазы. Просадка лессовых суглинков была частично устранена до начала эксплуатации крана путём технической мелиорации во время строительства, однако по результатам инженерно-геологических изысканий в 2016 г. были установлены остаточные просадочные свойства грунтов на участке расположения крана.

Исходя из результатов натурных и лабораторных исследований, грунты на участке расположения крана испытывают неоднородное воздействие статической нагрузки в условиях переменной влажности и химического состава порового раствора. Строгое количественное описание этих процессов требует применения численных гидрогеомеханических моделей с учетом фазовых переходов с надлежащей оценкой исходных параметров, особенно массообмена в условиях переменного показателя pH. Такие модели требуют серьёзного теоретического обоснования и тестирования. В то же время, для инженерных задач в условиях длительной эксплуатации сооружений практическую ценность представляют оценки предельных значений деформационных свойств грунтов, в том числе осадки, просадки и крена. Поэтому в данном исследовании выполнена оценка предельных значений основных параметров и деформаций под воздействием фильтрации щелочных растворов.

При фильтрации щелочных растворов в нагруженном грунтовом массиве суммарное проседание почвы под фундаментами колонн можно определить по формуле:

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

где S_1 – осадка грунта, S_2 – его просадка, причем величины S_1 и S_2 зависят от влажности; S_3 – просадка в результате воздействия щелочного раствора на скелет грунта.

При расчетах фундамент мостового крана был схематизирован как точечный с учетом фактической поверхности опорных балок крана. По этим данным по стандартной методике [7] был проведен расчет осадки и просадки для точек p_1, \dots, p_{12} , а на этой основе – крена между соответствующими им опорными колоннами.

Статическая вертикальная нормативная нагрузка на колонну для данного крана была принята при расчетах 185 кН [8], с учетом этого давление на внутренние и внешние колонны составлял 0,08 и 0,16 МПа соответственно. Осадка S_1 , рассчитанная без учета химического воздействия, составила для внутренних и внешних колонн 0,0071...0,021 м и 0,0073...0,021 м, а просадка S_2 – соответственно 0,044...0,048 м и 0,038...0,051 м. Оцениваемый крен для коротких расстояний между колоннами не превышает 0,00079.

Таким образом, статическая нагрузка не могла быть главной причиной просадок и формирования недопустимого крена.

Прочностные и деформационные свойства грунтов могли снизиться из-за частичного растворения твердой фазы при фильтрации щелочных растворов из бассейна в зоне 1 (рис. 1). Учитывая высокую щелочность порового раствора в скважине 1 возле бассейна можно сделать вывод о том, что в толще грунтов до глубины несколько метров в условиях медленной нисходящей фильтрации происходит процесс, аналогичный активному растворению алюмосиликатов при производстве глинозема [10]. Это приводит к переходу труднорастворимых соединений в более растворимые и мобильные формы, появлению дополнительных полостей в грунте и уменьшению их несущей способности, и соответственно, дополнительной просадки.

Учитывая особенности участка и химический состав подземных вод на нём, провести натурный эксперимент с выщелачивания грунта аналогичным раствором не представляется

возможным. Поэтому количественная оценка эффекта растворения твердой фазы щелочным раствором проводилась в лабораторных условиях, при этом исследовался суглинок, который эквивалентен грунту под фундаментами колонн на участке крана.

Навеска данного суглинка, высушенного при 105 °С и массе сухого вещества 2,0044 г, выдерживалась 24 ч в растворе H₂O + NH₄OH с pH = 10,5, что является разбавленным эквивалентом щелочного раствора в порах почвы с pH > 13,0. Масса твердой фазы после сушки уменьшилась на 1,22% и составила 1,98 г, а показатель pH в результате химических реакций уменьшился до 10,06. Таким образом, максимальная кинетика выщелачивания оценивается в 0,0122 сут⁻¹. Результаты опыта, полученные с использованием рентгенофлуоресцентного спектрометра CEP-01 ElvaX Plus, представлены на рис. 2.

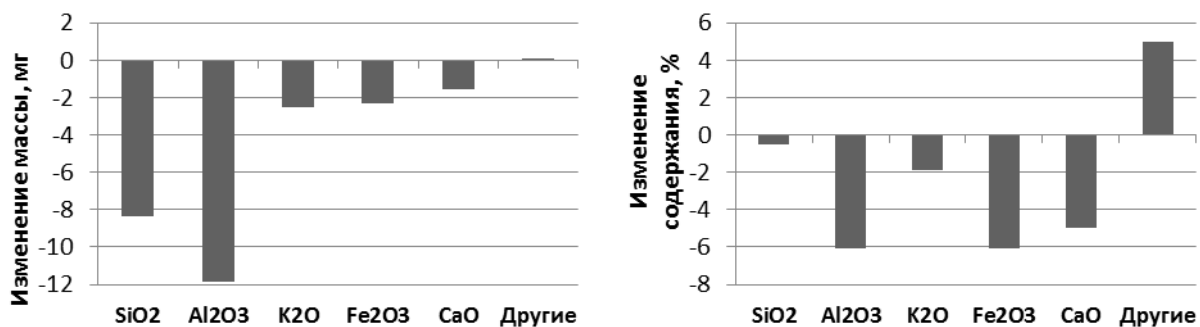


Рис. 2. Изменение массы компонентов твердой фазы суглинка (а) и их содержания относительно начальной массы в образце (б)

Масса твердой фазы уменьшилась главным образом, за счет Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, в меньшей степени K₂O. Их доля в общей массе твердой фазы необработанного суглинка без K₂O составляет 13,27%, что является теоретически возможной долей растворения твердой фазы щелочным раствором для данного грунта. С учетом того, что не вся масса этих соединений может фактически раствориться в природных условиях при медленной фильтрации, полученная оценка хорошо согласуется с данными [10] о том, что до 10% массы лессовидных суглинков составляют элементы, которые переходят в растворимое состояние под воздействием щелочей. Незначительный рост содержания некоторых микрокомпонентов (до 0,1% от начальной массы образца) не влияет существенно на общий тренд уменьшения массы твердой фазы грунта под воздействием щелочного раствора.

В реальных условиях показатель pH намного выше, а его воздействие на грунт более продолжительное, хотя реакции происходят гораздо медленнее, чем в лабораторных условиях, и с учётом тупиковых пор не относится ко всему объёму грунта.

Растворимость образующихся соединений алюминия, железа и кальция существенно выше по сравнению с исходными соединениями. В результате нерастворимые или малорастворимые гидроксиды алюминия, железа, марганца и карбоната кальция при реакции со щелочной средой образуют более растворимые соли, которые нисходящей вертикальной фильтрацией выносятся к почвенному водоносному горизонту и мигрируют от данного участка с постепенной нейтрализацией.

Максимальную просадку в результате химического воздействия на поровый раствор предлагается оценить следующим образом. По результатам лабораторных исследований теоретически возможно уменьшение доли твердой фазы в результате выщелачивания α (5-10%). В условиях постоянной нагрузки под тяжестью колонн и перемещаемых грузов происходит сжатие создаваемых дополнительных полостей в суглинках. Согласно пессимистическому сценарию, все формирующиеся пустоты в грунте полностью заполняются соседними частицами почвы, причем начальная пористость под нагрузкой

остаётся неизменной. При таких условиях дополнительную просадку от химического воздействия щелочного порового раствора можно оценить по формуле

$$S_3 = \alpha \Delta h_{ch} \quad (2)$$

где α – доля растворенной твердой фазы почвы, Δh_{ch} – толщина слоя грунта, через который фильтруется щелочной раствор.

Предполагая равномерную по площади бассейна интенсивность утечек, соответствующую этому нисходящую фильтрацию, а также частичное растворение легкорастворимых соединений в суглинке (2...3%) вместо полного растворения (10...15%) получаем консервативную оценку просадки от воздействия щелочного раствора. Неравномерность потерь по площади бассейна приведет к неравномерности просадок и увеличению прогнозируемого крена между колоннами. Минимальная толщина слоя подвергается воздействию щелочного раствора, для участка под бассейном оценивается в 5 м (2 м в зоне аэрации под его дном и 3 м в верхней части грунтового водоносного горизонта).

Более детальная оценка деформаций и развития крена требует применения уравнений консолидации с учетом изменения параметра массообмена α в зависимости от pH раствора, скорости вертикальной фильтрации в почве и других параметров, что целесообразно рассмотреть в будущих исследованиях.

Результаты расчетов осадки и просадки в точках p1-p12 под воздействием статической нагрузки и фильтрации щелочных растворов представлены на рис. 3, а рассчитанные значения крена между опорными колоннами крана – в табл. 1.

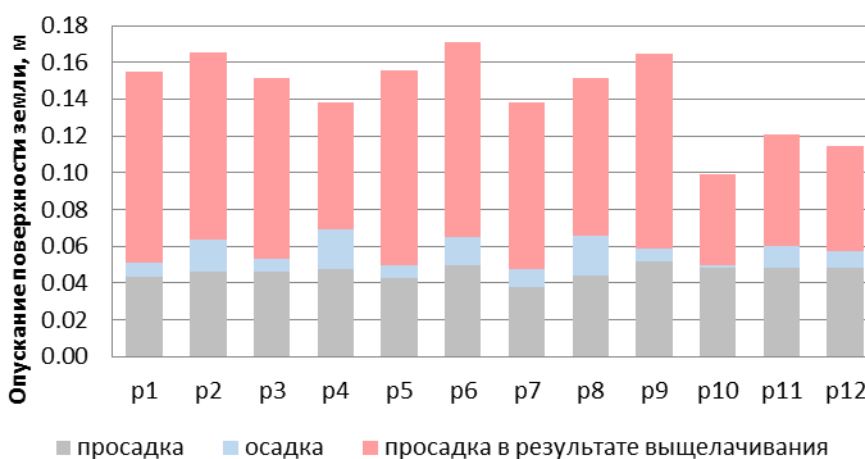


Рис. 3. Деформации грунтового основания под влиянием выщелачивания солей в случае растворения 5% твёрдой фазы грунта

Таблица 1

Оцениваемые значение крена между опорами крана; p1,...,p12 – расчетные точки; жирным шрифтом выделены контуры с превышением критического значения крена 0,004

p1	0,0003	p2	0,0005	p3
0,0014		0,0007		0,0016
p4	0,0006	p5	0,0005	p6
0,00002		0,0003		0,0005
p7	0,0004	p8	0,0004	p9
0,0071		0,0073		0,0086
p10	0,0002	p11	0,0002	p12

Учет фильтрации щелочного раствора существенно увеличивает оцениваемую просадку. Даже в случае консервативных оценок толщины слоя суглинка, через который фильтруется щелочной раствор Δh_{ch} и растворения лишь 5% твердой фазы почвы просадка, обусловленная растворением твердой фазы, оценивается в 0,044-0,11 м, а крен – от 0,0002 до 0,0086.

Максимальная просадка фундамента опорных балок крана наиболее вероятна за счет выщелачивания легкорастворимых солей в расчетной точке р6, а минимальная – в точке р4; соответственно, ожидаемый наибольший крен, превышающий допустимые значения – между точками р9 и р12, составляет 0,0086. Данные точки расположены вблизи внешнего контура бассейна.

Поскольку функциональность крана ухудшается уже при вертикальных перекосах от 5 см, то вполне вероятно, что эти факторы только начали действовать и последствия их воздействия еще не полностью проявились.

Выводы. Лабораторные исследования влияния щелочного раствора на грунт позволили оценить содержания компонентов твердой фазы (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , K_2O), переходящих в более растворимые соединения, и кинетику их выщелачивания при активном массообмене. Проведенные расчеты осадки и просадки без и с учетом химического воздействия на почвы в основании фундамента инженерного сооружения показали, что критический крен между элементами конструкции крана более 0,004 может возникать только в случае просадок более 5...10 см на участках нисходящей фильтрации щелочных растворов.

Авторы благодарны зав. кафедры химии НТУ «Днепровская политехника» проф. Светкиной О.Ю. и ее сотрудникам за проведение лабораторных исследований

Список литературы

1. Колпашников Г.А. Влияние влажности и солей на прочностные и деформационные свойства дисперсных грунтов / Колпашников Г.А., Аль-Татити Саиф Сами Хуссейн, Аль-Хаснави Раед Махмуд Абдулл-Хуссейн, И.П. Крошнер // Вестник БНТУ. – 2010. – №2. – С. 5-7.
2. 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. doi:10.1111/gwat.12185.
3. Джаманбаев М.Дж. Влияние влажности на устойчивость склона и прочностные свойства суглинистых грунтов / М.Дж. Джаманбаев, С.Б. Омуралиев. // Проблемы современной науки и образования. – 2017. – С. 116-119.
4. Перкова Т.И. Исследование выщелачивания трещиноватых пород под влиянием минерализованных шахтных вод / Т.И. Перкова, Д.В. Рудаков // Вісник Нац. гірничого ун-ту. – 2014 – №5. – С. 5-10.
5. Занавескин К.Л. Выщелачивание примесей SiO_2 и Al_2O_3 раствором гидроксида натрия из лейкоксена Ярегского месторождения / 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.
6. Kutus, B., Gácsi, A., Pallagi, A., Pálinkó, I., Peintler, G., Sipos, P. A comprehensive study on the dominant formation of the dissolved $Ca(OH)_2(aq)$ in strongly alkaline solutions saturated by $Ca(II)$ // RSC Advances, 2016. Vol. 6(51). – Pp. 45231-45240. doi.org/10.1039/c6ra05337h.
7. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування: ДБН В.2.1-10-2009. – К.: Мінрегіонбуд України. 2009. – 82 с.
8. Справочник проектировщика. Металлические конструкции в 2-х т. – М.: АСВ. – 1998. – 512 с.
9. Посохов Е.В. Общая гидрогеохимия / Е.В. Посохов // Л., Недрa, 1975. – 208 с.
10. Грунты. Метод лабораторного определения содержания карбонатов: ГОСТ 34467-2018 [Действующий с 2019-01-09] – Росстандарт, 2019. – 12 с. – (Межгосударственные стандарты).