

УДК 553.611

**ВЛИЯНИЕ РАСТВОРОВ СОЛЕЙ $AlCl_3$, $Al_2(SO_4)_3$, $CaCl_2$,
 $FeSO_4$, $Fe_2(SO_4)_3$ И $FeCl_3$ СИЛЬНЫХ КИСЛОТ НА
ИЗМЕНЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ
ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОПОЛЗНЕОПАСНЫХ ГРУНТОВ**

Пащенко А. А.

(УкрНИИМИ, г. Донецк, Украина)

Вивчено вплив обробки глинистих ґрунтів розчинами неорганічних солей. Досліджено вплив концентрації водних розчинів солей сильних кислот на зміну фізико-механічних властивостей зразків зсувонебезпечної глини. Зміряні показники міцності, водостійкості, адсорбції неорганічних речовин породами, що складають зсувонебезпечний масив.

Influence of processing clay soil is studied by solutions of inorganic salts. Influence of concentration of water solutions of salts of strong acids on change of measured properties of samples landslide-unsafe clay is investigated. Strength factor, water resistance, adsorption of inorganic substances by the breeds composing landslide-unsafe are measured.

В конце 90-х годов прошлого столетия начали происходить оползни больших массивов грунта на северном побережье Азовского моря. Они затронули не только безлюдные территории, но жилые и промышленные строения в городах и поселках, расположенных на побережье. Сотрудники института «Донецкгеология» и ЧП «Азовгео» объяснили возрастание числа оползней резким изменением гравитационно-гидродинамического состояния

грунтовых массивов. Это в свою очередь связано с изменениями режимов выпадения и накопления осадков, таяния снега и затяжными дождями, выпадающими вместо снега в зимние месяцы. Это привело к изменению гидрологической обстановки в этом районе, к размоканию грунтов, к потере их несущей способности и устойчивости [1, 2]. Поэтому повышение водоустойчивости грунтов способствует увеличению их несущей способности и повышению его устойчивости к оползням.

Из широкого ряда механических, физических и физико-химических способов повышения водоустойчивости грунтов особый интерес представляют физико-химические способы, при которых введение активных ионов в глинистые материалы приводит к уменьшению степени их размокания в воде. При электрохимической обработке (одновременном действии постоянного электрического тока и химических растворов) в глинистом грунте происходит замена обменных одновалентных катионов на двухвалентные или трехвалентные. Это приводит к сгущению, уплотнению, цементации и увеличению проницаемости глинистой породы [3 - 5].

К физико-химическому способу упрочнения грунтов, при котором происходят ионообменные, адсорбционные и физико-химические процессы, следует причислить методы низконапорной и безнапорной инъекции растворов связующих или активных солей в упрочняемый массив [6 - 9].

Предметом исследования в данной работе являются образцы глины, отобранной из тела оползня, расположенного на берегу Азовского моря, результаты исследования физико-механических свойств которых приведены в работе [10]. Измерения физико-механических свойств образцов оползнеопасной глины до и после ее обработки водными растворами неорганических солей были проведены согласно ГОСТ 5180-84, ГОСТ 13144-79 и методик, рекомендованных в методической и научной литературе [11 - 13].

Методика исследований при изучении влияния обработки глинистых грунтов растворами неорганических солей состояла из следующих этапов:

- приготовление водных растворов исследуемых веществ, требуемой концентрации путем растворения навески вещества в требуемом количестве дистиллированной воды;

- определение концентрации вещества в растворе в зависимости от его плотности (по табличным, или экспериментальным данным);

- определение концентрации путем решения уравнения зависимости концентрации раствора от его плотности;

- обработка образцов глины, отобранной нами из тела оползня, приготовленными растворами;

- измерения прочностных показателей образцов глины, обработанной приготовленными растворами, методом пенетрации по ранее отработанной методике. Измерения проводят в процессе высыхания образца периодически, не реже 1 раза в сутки, до набора прочности, при которой нагрузка $P = 0,8-1,0$ кг приводит к углублению конуса $h \leq 6$ мм.

- вычисление концентрации растворов, количества адсорбированного вещества и скорости адсорбции раствора при обработке образцов глины приготовленными растворами;

- составление сводных таблиц, графиков и уравнений математической зависимости упрочнения образцов оползнеопасной глины.

- анализ результатов расчетов и измерений для определения эффективности физико-химического способа укрепления, выбор типа и оптимальной концентрации растворов с целью максимального увеличения прочности и водостойкости глины.

Для исследования влияния валентности и типа вводимых катионов на физико-механические свойства глины из твердых солей $AlCl_3$ ГОСТ 5044-79, $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ ГОСТ 12966-85, $CaCl_2$ ГОСТ 450-77, $FeSO_4$ ГОСТ 6981-94, $Fe_2(SO_4)_3$ ГОСТ 9485-74, $FeCl_3$ ГОСТ 4147-74 и дистиллированной воды ГОСТ 6709-72 (дистиллятор ДЭ-4) приготовлено 6 растворов солей (1 - $AlCl_3$, 2 - $Al_2(SO_4)_3$, 3 - $CaCl_2$, 6 - $FeSO_4$, 7 - $Fe_2(SO_4)_3$, 8 - $FeCl_3$). Концентрацию растворов определяли измерением плотности ареометрами общего назначения АОН-1 ГОСТ 18481-81 (Украина, ТУ 3 14307481.008-95).

Обработку образцов глины приготовленными растворами проводили, используя герметично закрывающуюся емкость объемом 500 мл, в которую заливали исследуемый раствор известной плотности в количестве 400 г. Образец исследуемой глины влажностью (39-45 %) весом 0,1 кг в виде стержней диаметром 10-12 мм и длиной 100-120 мм помещали в емкость с исследуемым раствором. За изменениями, происходящими со стержнями из глины, наблюдали визуально в течение 2-3 часов, отмечая все протекающие процессы. Далее встряхиванием добивались измельчения глины до образования суспензии. После чего регулярно в течение рабочего дня производили замеры осветленного слоя, образовавшегося при оседании частиц глины, отмечая время и величину осветленного слоя.

После суточного отстаивания проводили измерение величины осветленного слоя и его плотности, считая, что при адсорбции активного вещества его концентрация уменьшится, и плотность раствора упадет. Затем механическим встряхиванием переводили глину в суспензию и оставляли для отстаивания. Операцию встряхивания и измерения проводили до постоянства плотности исследуемого раствора.

Характеристики исходных растворов и уравнения зависимости концентраций от плотности приведены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристика исходных растворов для исследований и уравнения зависимости концентрации от плотности

№№ растворов	Показатели			
	Вещество	Плотность, г/см ³	Концентрация, %	Уравнение тренда
1	AlCl ₃	1,0705	7,93	y=108,34x-108,5
2	Al ₂ (SO ₄) ₃	1,0490	4,90	y=84,501x-94,282
3	CaCl ₂	1,0380	4,71	y=117,18x-116,92
6	FeSO ₄	1,0500	5,20	y = 98,32x - 98,03
7	Fe ₂ (SO ₄) ₃	1,0550	6,58	y= 116,97x-116,82
8	FeCl ₃	1,0425	5,17	y =115,29x-115,02
9	SnCl ₂	1,0350	5,29	y=126,31x-125,63
10	SnCl ₄	1,0330	5,13	y=133,28x-132,54

где y – концентрация, %, x – плотность, г/см³

По изменению плотности исследуемого раствора в процессе обработки глины рассчитывали концентрацию раствора, массу адсорбированного вещества и скорость его адсорбции. Результаты расчета показателей адсорбции и физико-механических свойств приведены в таблицах 2, 3 и на рис. 1.

Таблица 2

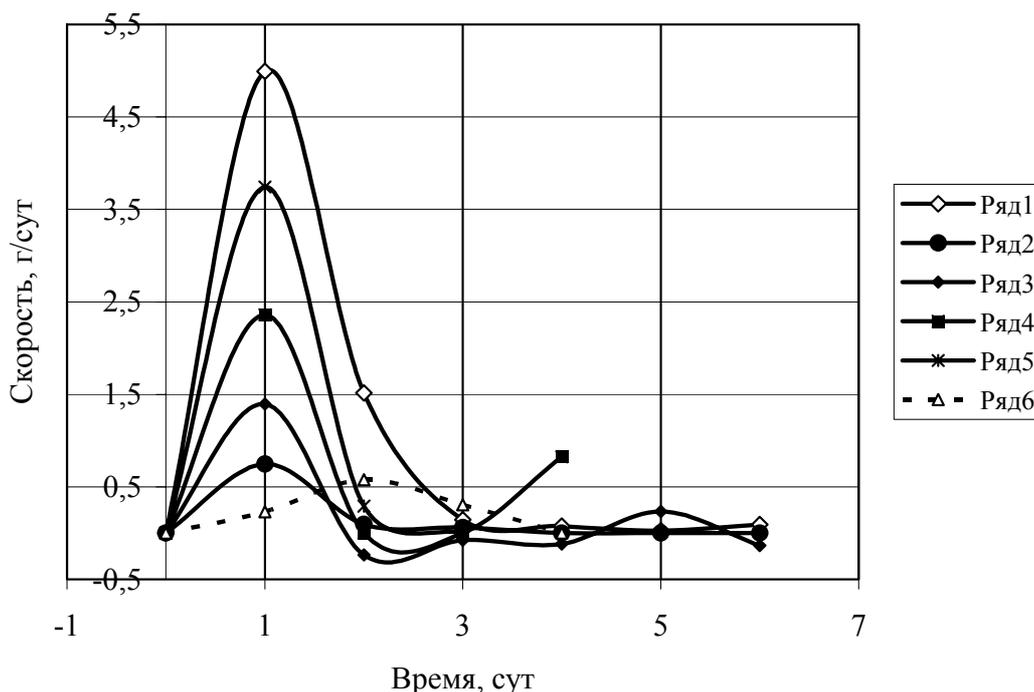
Показатели адсорбции из растворов образцом глины

Растворы	Масса адсорбированного вещества, г	Масса адсорбированного вещества, г-экв	Скорость адсорбции, г/сут
0 Вода	0	0,00000	-
1 AlCl ₃	9,54	0,02409	4,992
2 Al ₂ (SO ₄) ₃	3,01	0,00293	0,746
3 CaCl ₂	1,39	0,00626	1,395
6 FeSO ₄	6,49	0,02135	2,361
7 (Fe ₂ (SO ₄) ₃)	4,46	0,00372	3,743
8 (FeCl ₃)	2,30	0,00476	0,576
9 (SnCl ₂)	6,51	0,01717	5,049
10 (SnCl ₄)	7,58	0,00729	1,193
11 (Форм)	2,87	0,09567	0,410

Таблица 3

Физико-механические свойства образцов глины после их физико-химической обработки

Растворы	Степень агрегации	Расчетный минимальный диаметр частиц, мм	Влажность при N=1, %	Максимальное осветление раствора, мм	Избыточное количество влаги при N=1, %
0 Вода	1	0,00050	62,00	81	0,00
1 AlCl ₃	6,4	0,00320	66,53	95	4,53
2 Al ₂ (SO ₄) ₃	5,4	0,00275	77,05	95	15,05
3 CaCl ₂	5,8	0,00353	65,20	91	13,20
6 FeSO ₄	10,4	0,00307	69,84	92,5	7,84
7 Fe ₂ (SO ₄) ₃	10,1	0,00437	36,77	89	-25,23
8 FeCl ₃	13,9	0,00612	54,83	102,5	-7,13



Ряд 1 - AlCl_3 , ряд 2 - $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, ряд 3 - CaCl_2 , ряд 4 - FeSO_4 , ряд 5 - $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, ряд 6 - FeCl_3

Рис. 1. Изменение скорости адсорбции веществ из растворов во время их физико-химической обработки

По Абелеву Ю. М. и Озерецковскому А. Н [11] по формулам 1 и 2 для глины, обработанной растворами № 1, № 2 и № 3 рассчитали коэффициент фильтрации

$$K_f = \frac{g}{F \cdot I \cdot t}; \text{ см/с} \quad (1)$$

где g - количество воды, см^3 ;

t - время, с;

F - сечение, см^2 ;

I - гидравлический коэффициент, который рассчитывается по формуле 2

$$I = \frac{H + H_1}{L}, \quad (2)$$

где H - действующий напор, см;

L - толщина слоя, см.

Результаты расчета относительного коэффициента фильтрации приведены в таблице 4.

Таблица 4

Обобщенные значения коэффициентов пенетрации и влажности образцов глины, обработанных различными солями

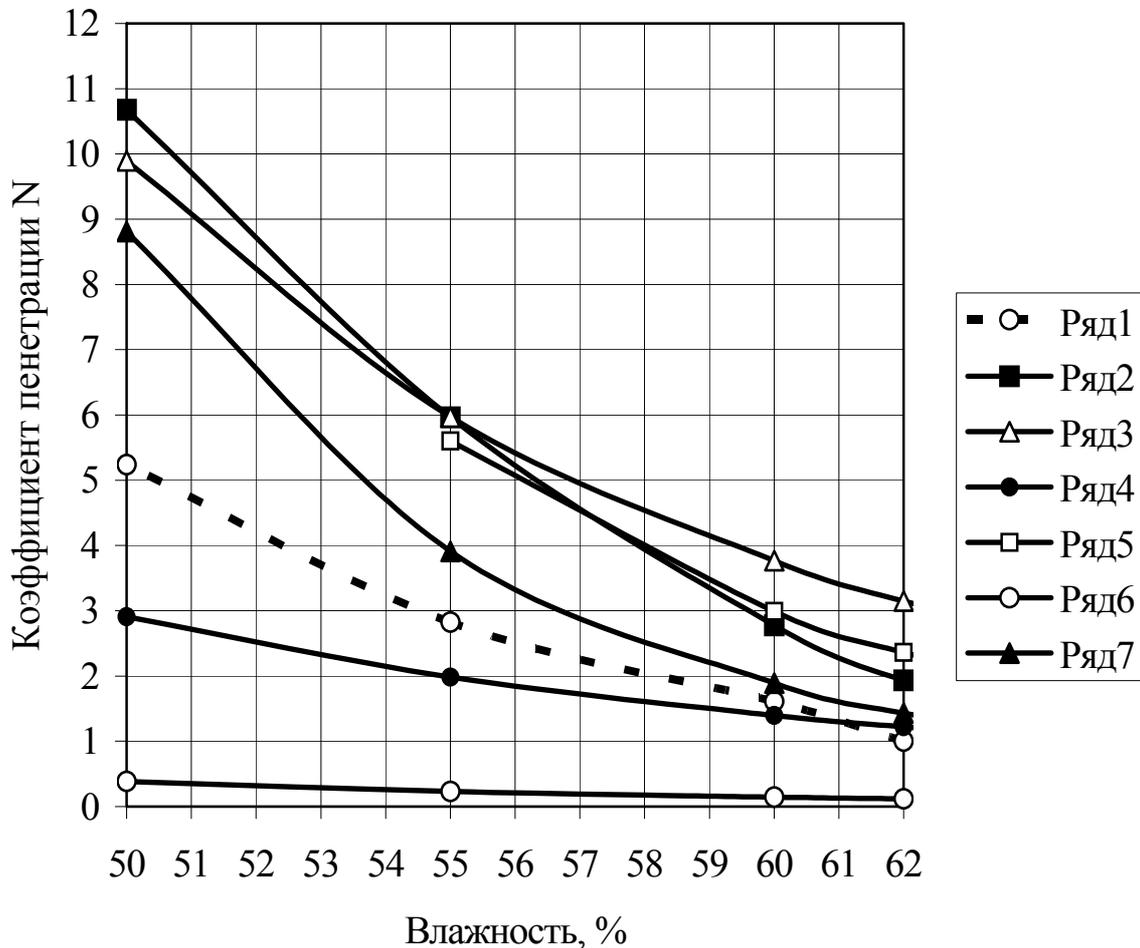
Влажность, %	Коэффициент пенетрации						
	Раствор						
	Вода	AlCl ₃	Al ₂ (SO ₄) ₃	CaCl ₂	FeSO ₄	Fe ₂ (SO ₄) ₃	FeCl ₃
90	-	-	0,439	-	-	-	-
75	-	-	0,594	-	-	-	0,115
80	-	-	0,819	0,439	0,375	-	0,185
75	-	-	1,154	0,569	0,598	-	0,309
70	-	0,973	1,663	0,751	0,983	-	0,537
65	-	1,111	2,463	1,012	1,678	-	0,979
60	1,6118	2,774	3,765	1,397063	2,989	-	1,889
55	2,828	5,962	5,971	1,983	5,599	-	3,908
50	5,236	10,675	9,896	2,910	11,135	0,382	8,810
45	10,345	16,913	17,297	4,446	23,809	0,672	22,139
40	22,148	24,676	32,291	7,143	55,679	1,264	64,139
35	52,495	33,964	40,420	12,225	145,873	2,587	225,691
30	142,160	44,777	93,436	22,733	443,455	5,918	1052,549
25	461,852	57,115	-	47,348	1651,841	15,742	-
20	1953,455	70,978	-	116,224	-	-	-
15	12538,48	86,366	-	-	-	-	-

Таблица 5

Результаты определения относительного коэффициента фильтрации

Раствор	Высота водного столба, см	Объем, см ³	Время, сут	Напор, см	Гидравлический градиент	Коэффициент фильтрации см/с	Относительный коэффициент фильтрации
Вода	0,30	0,038	20	10	20	8,68056E-09	1,000
AlCl ₃	0,60	0,076	20	10	20	1,73611E-08	2,000
Al ₂ (SO ₄) ₃	0,01	0,001	20	10	20	2,89352E-10	0,033
CaCl ₂	2,00	0,251	20	10	20	5,78704E-08	6,667

Влияние увлажнения на изменение прочностных свойств образцов глины после их физико-химической обработки показано на рис. 2.



Ряд 1 – вода; ряд 2 - $AlCl_3$; ряд 3 $Al_2(SO_4)_3$; ряд 4 - $CaCl_2$;
ряд 5 – $FeSO_4$; ряд 6 - $Fe_2(SO_4)_3$; ряд 7 - $FeCl_3$

Рис. 2. Графическая зависимость обобщенных значений коэффициентов пенетрации от влажности (в области верхнего предела пластичности) в диапазоне 30-50 % образцов глины, до и после обработки различными солями

Влияние типа ионов на изменение прочности и водостойкости показано на рисунках 3 и 4.

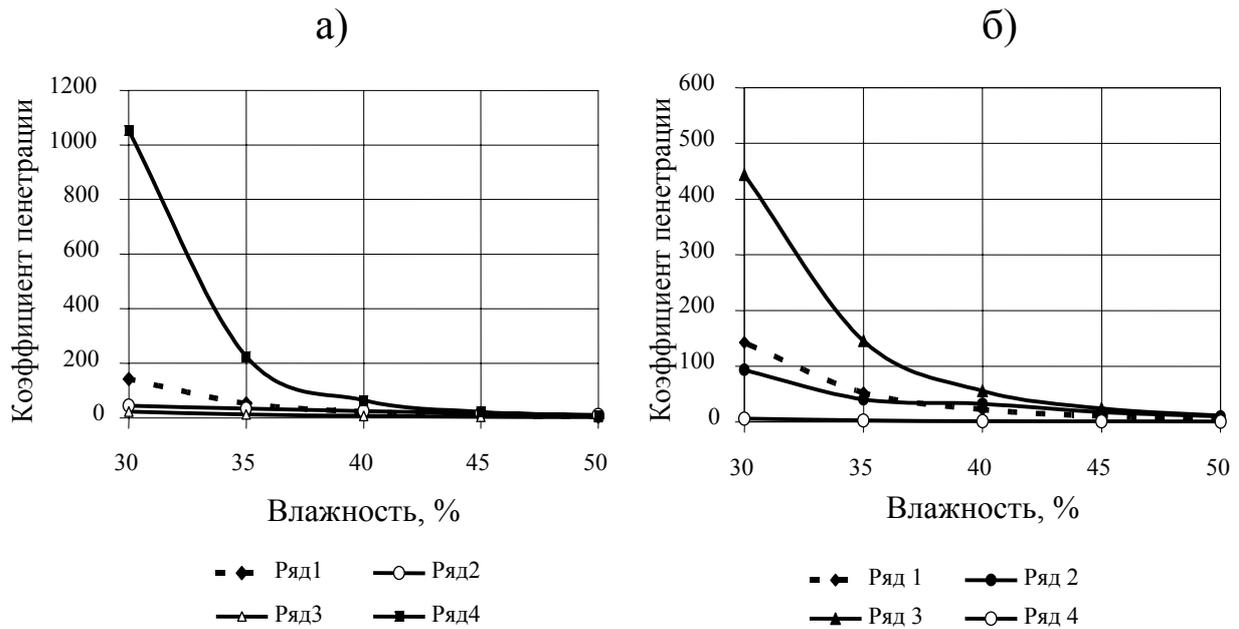
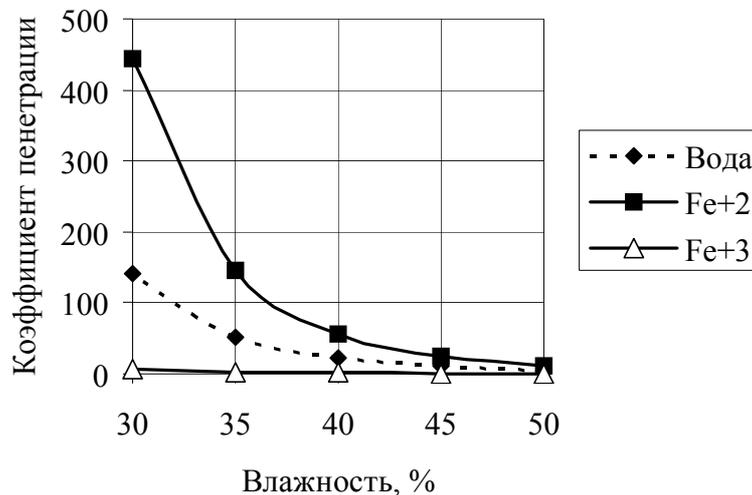


Рис. 3. Графическая зависимость изменения прочности глины, обработанной водными растворами солей: а) Хлоридов: ряд 1 – вода; ряд 2 – AlCl₃, ряд 3 – CaCl₂; ряд 4 – FeCl₃. б) Сульфатов: ряд 1 – вода; ряд 2 - Al₂(SO₄)₃; ряд 3 - FeSO₄; ряд 4 - Fe₂(SO₄)₃



Ряд 1 – вода; ряд 2 – Fe₂(SO₄)₃; ряд 3 – Fe₂(SO₄)₃

Рис. 4. Графическая зависимость изменения прочности оползнеопасной глины от влажности после обработки водными растворами двух и трех валентного железа Fe⁺² и Fe⁺³

ВЫВОДЫ

В работе изучены процессы адсорбции различных неорганических веществ из водных растворов солей сильных кислот глинистой породой, слагающей оползнеопасный массив. Установлена степень влияния природы и валентности сорбата на кинетику адсорбции и параметры массообмена. Измерения скорости адсорбции и массы адсорбированного вещества 100г глины показали, что они изменяются в пределах 2,93 - 24,09 мг-экв и 0,576 - 4,992 г/сут соответственно.

Установлено так же, что обработка глины исследуемыми растворами приводит к увеличению скорости седиментации частиц глины, к агрегации частиц и увеличению степени их укрупнения в 5-12 раз, что является причиной изменения величины относительного коэффициента фильтрации от 0,033 до 6,67.

Однако, методы измерения степени агрегации, коэффициента фильтрации глинистых частиц, массы адсорбированного вещества и скорости адсорбции, являясь показателями процесса адсорбции, не являются показателями эффективности физико-химической обработки образцов оползнеопасной глины, так как не объясняют изменения физико-механических свойств глины при ее обработке растворами солей.

Анализ результатов исследований, проведенных в данной работе, показал, что физико-химическая обработка образцов оползнеопасной глины водными растворами исследуемых солей приводит к изменению физико-механических характеристик грунта - верхнего предела пластичности. Эффективность действия растворов следует оценивать по степени увеличения стойкости оползнеопасной глины к действию воды, то есть увеличению прочности глины, имеющей верхний предел пластичности. Если при физико-химической обработке образцов оползнеопасной глины верхний предел пластичности увеличивается, то это дает право говорить о повышении общей устойчивости оползня.

Применение растворов солей № 3 CaCl_2 и № 7 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ для обработки глины $W_0 = 62\%$ приводит к снижению устойчивости образцов к действию воды, а растворов № 1 AlCl_3 и № 8 FeCl_3 приводит к незначительному увеличению прочности.

Действие растворов № 2 $Al_2(SO_4)_3$ и № 6 $FeSO_4$ приводит к значительному увеличению прочности глины и ее фильтрующей способности, что является основанием применения растворов № 1 $AlCl_3$ и № 8 $FeCl_3$ для их инъекции в оползнеопасную глину с целью повышения устойчивости оползня.

СПИСОК ССЫЛОК

1. Окрестности Мариуполя сползают в море [Электронный ресурс] / Интернет-версия газеты «Азовский машиностроитель». - № 131. – Режим доступа: http://www.azovmash.info/article.php?idnew=538&id_num=51 – 25.11.2006.
2. В Азовское море сойдут оползни? [Электронный ресурс] / Лента новостей от агентства MIGnews-Украина – Режим доступа: <http://archives.maillist.ru/60727/108883.html#top> - 21.04.2003.
3. Электрохимический способ получения грунтовых свай [Текст] : пат. 2168585 Россия: МПК Е 02 Д 5/48, 3/11 / Шаймуратов В.Х. - № 99104604/03 ; заявл. 05.03.1999; опубл. 10.06.2001, Бюл. № 16.
4. Чупрунов, Г. Д. Основы упрочнения горных пород [Текст] / Г. Д. Чупрунов. - М.: Недра, 1965. - С. 55-68.
5. Жинкин, Р. Н. Улучшение свойств глинистых грунтов электрохимическим способом [Текст] / Р. Н. Жинкин // Сб. Ленингр. ин-та инж. железно-дорожн. трансп. – Л., 1959, № 157. - С. 154-180.
6. Химические основы технологии фосфатных связок и покрытий [Текст] / С. Л. Голышко-Вольфсон, М. М. Сычев, Л. Г. Судакас, Л. И. Скобло. - Л.: Химия, 1968. – 191 с.
7. Спосіб зміцнення зсувонебезпечних схилів, що містять глинисті мінерали [Текст] : пат. 13982 Україна: E02D 29/02, E02D 17/20 / А.В. Анциферов, В.О. Канін, О.О. Пащенко, О.В. Пащенко, ; заявник та патентовласник УкрНДМІ. - № U200511311; заявл. 29.11.2005; опубл. 17.04.2006, Бюл. № 4.
8. Спосіб зміцнення масиву ґрунтів [Текст]: пат. 26978 Україна: E02D 3/11, E02D 17/20, E02D 29/02 / А.В. Анциферов, В.Ф. Філатов, В.О. Канін, О.В. Пащенко, ; заявник та патен-

- товласник УкрНДМІ. - № У 2007 06562; заявл. 12.06.2007; опубл. 10.10.2007, Бюл. № 8.
9. Спосіб закріплення зсувних масивів [Текст] : пат. 33145 Україна: E02D 3/00 / В.О. Ісаєв, О.О. Пащенко, О.В. Пащенко, В.О. Канін, ; заявник та патентовласник УкрНДМІ. - № 11.2008 06562; заявл. 12.06.2007; опубл. 10.10.2007, Бюл. № 8.
 10. Особенности структуры и свойств глинистого грунта с оползнеопасного участка азовского побережья [Текст] / Пащенко А.А., Ящере́нко О. Г., Пащенко А.В., Карпиченко В. С. // Сб. науч. тр. «Наукові праці УкрНДМІ». – 2010. - № 6. – С. 234-244.
 11. Ломтадзе, В. Д. Физико-механические свойства горных пород. Методы лабораторных исследований [Текст] / В.Д. Ломтадзе. - Л.: Недра Л/о, 1990. - 328 с.
 12. Месчан, С.Р. Экспериментальная реология глинистых грунтов [Текст] / С. Р. Месчан. - М.: Недра, 1985. - 342 с.
 13. Стреленя, Л. С. Определение предельных напряжений при сжатии и сдвиге для структурированных дисперсных систем методом конического пластометра [Текст] / Л. С. Стреленя, Н. И. Круглицкий // Коллоидный журн. – 1985. - Т. 48, № 4. - С. 821-824.