

УДК 553.061.4+624.131:678.6

А.А. Пашченко,
 О.Г. Ящеренко,
 В.А. Канин, д-р техн. наук,
 А.В. Пашченко

Украинский государственный научно-исследовательский
 и проектно-конструкторский институт горной геологии,
 геомеханики и маркшейдерского дела
 Национальной академии наук Украины,
 г. Донецк, Украина, e-mail: alepas@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ РАСТВОРОВ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЛЕЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ОПОЛЗНЕОПАСНЫХ СКЛОНОВ

А.А. Pashchenko,
 O.G. Yashcherenko,
 V.A. Kanin, Dr. Sci. (Tech.),
 A.V. Pashchenko

Ukrainian State Research and Design Institute of Mining
 Geology, Rock Mechanics and Mine Surveying of the National
 Academy of Sciences of Ukraine,
 Donetsk, Ukraine, e-mail: alepas@mail.ru

EFFECT OF PHYSICAL AND CHEMICAL INFLUENCE OF INORGANIC SALTS SOLUTIONS ON THE STABILITY OF LANDSLIDE-PRONE SLOPES

Рассмотрена возможность повышения устойчивости оползнеопасных склонов путем физико-химической обработки глинистых пород водными растворами неорганических солей металлов. Показано, что действие катионов Al^{+3} , Fe^{+3} и анионов Cl^- и SO_4^{-2} приводит к повышению кристалличности минералов, содержащихся в глинистых грунтах, что обуславливает возрастание прочности глины. При введении в грунт указанных катионов и анионов можно также смещать границу текучести глины в направления более высокой влажности и повышать ее устойчивость к скольжению.

Ключевые слова: оползень, влажность, физико-химическое воздействие, ионообмен, коэффициент устойчивости, пенетрация

Растущее во всем мире негативное влияние опасных геологических процессов природного и техногенного характера, сопровождающихся значительными материальными затратами, среди которых особо необходимо выделить оползни, в значительной мере проявляется и в Украине. Катастрофическая активизация оползней произошла в 1995 году в г. Черновцы, в 1998–1999 гг. – в Карпатском регионе. Значительно ухудшилась ситуация с оползнями в Днепропетровске, Днепродзержинске, в Крыму, на Причерноморском и Приазовском побережье. Оползни распространены почти в 200 городах и поселках городского типа, что создает постоянную угрозу возникновения чрезвычайных ситуаций и угрозу жизнедеятельности населения Украины. В то же время существующие инженерные методы защиты от оползней [1–3] недостаточно эффективны. Они, как правило, имеют пассивный характер и требуют больших энергетических и материальных затрат. Наиболее эффективными следует считать активные методы, направленные непосредственно на изменение физико-механических и физико-химических свойств самого грунта.

Химические вещества, которые можно применять для изменения физико-механических и физико-химических свойств грунтов с целью укрепления оползнеопасных склонов, должны: хорошо растворяться в воде; адсорбироваться поверхностью глинистых частиц; снижать склонность глинистых частиц к

водопоглощению за счет изменения заряда двойного электрического слоя их поверхности; взаимодействовать с водой адсорбционных слоев и образовывать с ней новые химические связи.

Эффективность влияния химических веществ на свойства глинистых пород можно оценивать по изменению физико-механических характеристик или по параметрам дифрактограмм и ИК-спектров этих пород после обработки.

По результатам ранее выполненных исследований установлено, что катионы трехвалентных металлов Me^{+3} [4] замещают подвижные катионы в каолинитах, вследствие чего глина приобретает новые свойства. Наибольшее положительное влияние на физико-механические свойства глины оказывают соли железа, алюминия и кальция.

Для дальнейших исследований из тела оползня на Азовском побережье были взяты образцы грунта в виде слоистых силикатов, содержащих катионы K^+ и Na^+ . Образцы в течение двух суток обрабатывались растворами сульфатов и хлоридов алюминия, кальция и железа с концентрациями от 2 до 20%. На обработанных и не обработанных образцах изучались основные показатели устойчивости глины к сдвигу – коэффициент пенетрации, сила сцепления и угол внутреннего трения.

В таблице 1 представлены результаты исследований пенетрации (механической прочности) глины влажностью $W = 60\%$. Коэффициенты пенетрации определялись на пенетрационной установке согласно ГОСТ 5184-64.

Таблица 1

Коэффициенты пенетрации образцов оползнеопасной глины, обработанных химическими растворами

№	Растворы	Коэффициент пенетрации при концентрации раствора, %				
		2	4	6	10	20
1	AlCl ₃	1,100	2,013	2,774	2,785	2,791
2	Al ₂ (SO ₄) ₃	2,308	3,522	3,765	3,778	3,883
3	CaCl ₂	0,700	1,130	1,397	1,411	1,416
4	Fe ₂ (SO ₄) ₃	0,047	0,081	0,100	0,127	0,131
5	FeCl ₃	0,500	1,194	1,889	1,917	1,925
6	Необработанный образец	1,612				

Из данных таблицы 1 следует, что наилучшие результаты были получены при обработке образцов растворами хлорида алюминия, сульфата алюминия и хлорида железа с концентрациями более 6%. Значения коэффициента пенетрации образцов, обработанных этими составами при указанной концентрации, выше, чем у необработанной глины в 1,2–2,4 раза.

Известно, что чем выше W , тем ниже граница текучести глины и вероятнее сход оползня. Поэтому, при выполнении исследований были определены значения коэффициентов пенетрации образцов глины с $W = 30–62\%$ (табл. 2).

Таблица 2

Значения коэффициентов пенетрации обработанных и не обработанных образцов глины влажностью 30–62%.

Влажность, %	Коэффициент пенетрации, N			
	Не обработанная	AlCl ₃	Al ₂ (SO ₄) ₃	FeCl ₃
62	–	1,111	2,463	0,979
60	1,612	2,774	3,765	1,889
55	2,828	5,962	5,971	3,908
50	5,236	10,675	9,896	8,810
45	10,345	16,913	17,297	22,139
40	22,148	24,676	32,291	64,139
35	52,495	33,964	40,420	225,691
30	142,160	44,777	93,436	1052,549

Как следует из таблицы 2, при влажности образцов до 50% коэффициенты пенетрации значительно выше у образцов, обработанных хлоридом железа; при $W > 50\%$ наилучшие результаты показали образцы, обработанные растворами хлорида и сульфата алюминия. Значения коэффициентов пенетрации образцов, обработанных этими растворами, при $W = 50\%$ в 1,9–2,0 раза, а при $W = 60\%$ в 1,7–2,3 раза выше, чем у не обработанных образцов.

Показатели, характеризующие устойчивость образцов к сползанию – сила сцепления и усилие сдвига, исследовались на специально разработанной установке (рис. 1).

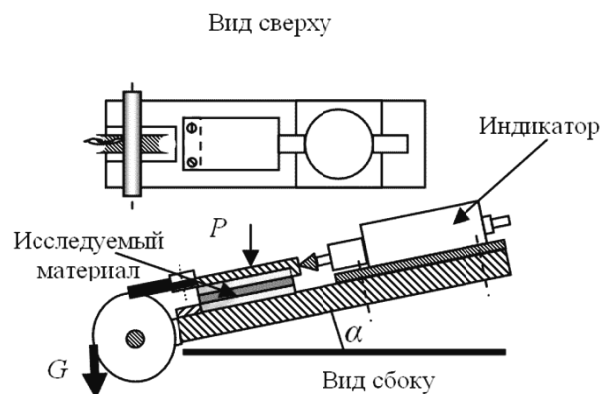


Рис. 1. Схема установки для измерения параметров устойчивости оползнеопасной глины: G – усилие сдвига; P – нагрузка; α – угол наклона плоскости скольжения

На рис. 2 показаны результаты определения силы сцепления образцов глины с поверхностью скольжения при угле наклона поверхности скольжения $\alpha = 10^\circ$, $G = 0,1$ МПа и различной влажности образцов. Испытания необработанных образцов проводились в диапазоне $W = 24,5–39,0\%$, поскольку при более высоких значениях резко снижался параметр границы текучести глины и происходил процесс сползания без какой-либо нагрузки.

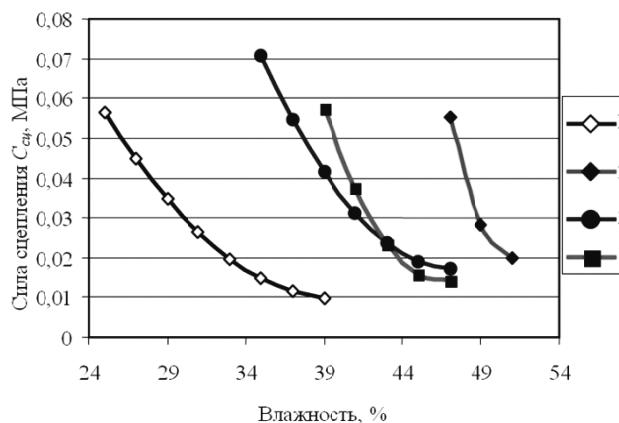


Рис. 2. График зависимости силы сцепления $C_{сц}$ от влажности: 1 – необработанный образец; 2, 3, 4 – образцы, обработанные AlCl₃; Al₂(SO₄)₃; FeCl₃ соответственно

Из графиков на рис. 2 видно, что у образцов, обработанных растворами солей алюминия и железа, сила сцепления глины с $W > 35\%$ гораздо выше, чем у необработанных образцов, что говорит о существенном уменьшении степени размокания обработанной глины в воде.

Аналогичные результаты были получены и для усилия сдвига G (рис. 3). У обработанных образцов с $W = 40\%$ усилие сдвига увеличилось в 2–3 раза.

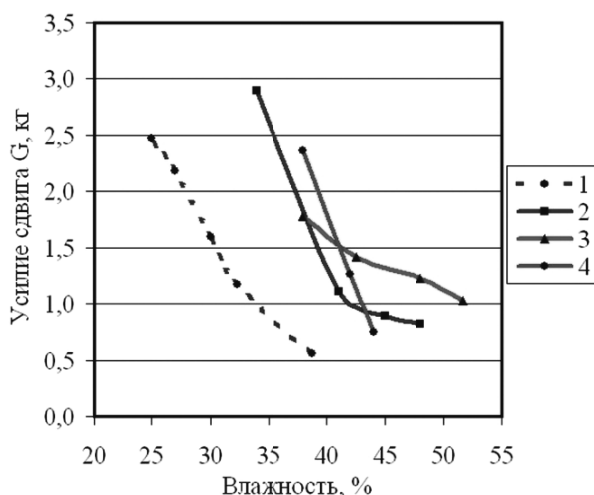


Рис. 3. График зависимости усилия сдвига G от влажности: 1 – необработанный образец; 2, 3, 4 – образцы, обработанные $Al_2(SO_4)_3$; $AlCl_3$; $FeCl_3$ соответственно

В результате физико-механических испытаний получены графические зависимости расчетных значений коэффициента устойчивости η [5] от W для обработанных и необработанных образцов глины из тела оползня на Азовском побережье при угле наклона поверхности скольжения $\alpha = 10^\circ$ и усилия сдвига $G = 0,1$ МПа (рис. 4).

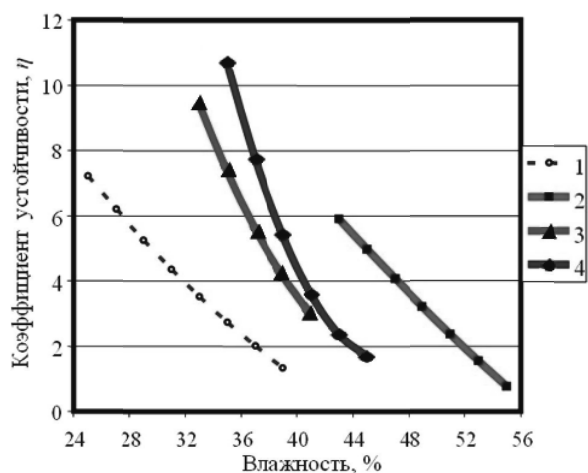


Рис. 4. Зависимость коэффициентов устойчивости η необработанной и обработанных укрепляющими растворами образцов глины от влажности: 1 – необработанный образец; 2, 3, 4 – образцы, обработанные $AlCl_3$; $Al_2(SO_4)_3$; $FeCl_3$ соответственно

Как видно из рис. 4, все обработанные образцы при высоких значениях W показали явное преимущество, по сравнению с необработанными образцами. При $W = 40\%$ значения коэффициентов η у обработанных образцов увеличились в 2–4 раза.

Для изучения структурных особенностей и изменений свойств глины был проведен рентгенофазовый анализ на дифрактометре ДРОН-3. На рис. 5 представлены фрагменты совмещенных дифрактограмм необработанных и обработанных образцов в координатах

$I-d$, где I – интенсивность дифракционного пика, %; d – межплоскостное расстояние, нм.

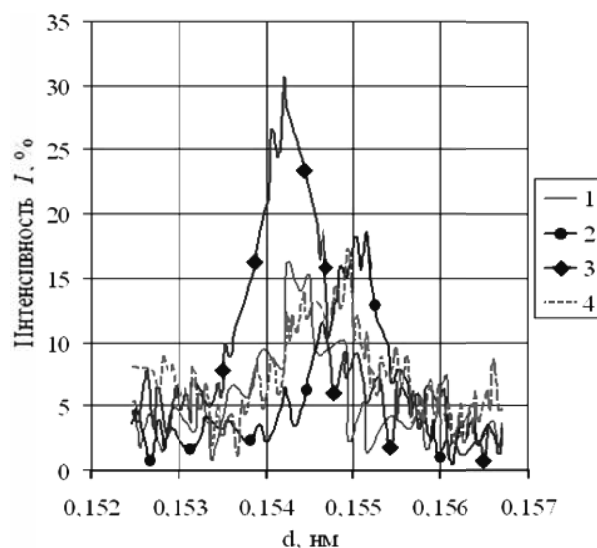


Рис. 5. Совмещенные дифрактограммы образцов при $d = 0,152-0,157$ нм: 1 – необработанный образец; 2, 3, 4 – образцы, обработанные $AlCl_3$; $Al_2(SO_4)_3$; $FeCl_3$ соответственно

Сравнение дифрактограмм образцов глины, необработанных 1 и обработанных растворами 2–4, позволило выявить различия в их строении, которые объясняют изменение восприимчивости глины к действию воды. Большое число мелкоамплитудных базальных отражений (пиков с небольшой амплитудой) на всех дифрактограммах указывает на то, что физико-механические свойства глины определяются природой адсорбированных солей. Анализ областей максимальной интенсивности дифрактограмм позволил установить структурные изменения, протекающие в оползнеопасной глине под действием растворов солей алюминия и железа. Увеличение амплитуды линий базальных отражений можно объяснить увеличением кристалличности глинистых минералов за счет уменьшения дефектности их первоначальной структуры. Если кристаллиты имеют резко выраженную анизотропную форму – пластинчатую или стержнеподобную – то некоторые отражения зависят от количества плоскостей решетки, которые принимают участие в отражениях и чем их меньше, тем шире отражения. Изменение ширины базальных линий в рентгенограммах можно трактовать как увеличение размеров кристаллов глинистых минералов. Действие растворов солей алюминия и железа приводит к изменению расстояния между базальными отражениями, что проявляется в смещении значений d . Обработка растворами, содержащими сульфат-ионы, приводит к тому, что в составе глины синтезируется соединение $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, отвечающее составу и строению кристаллической решетки природного минерала гипса. Образование этого соединения, вследствие особенностей его состава и структуры (связывание воды и ветвистое строение), повышает физико-механические свойства глины, снижая ее склонность к текучести [6].

Таким образом, рентгенофазовый анализ также подтвердил, что обработка образцов оползнеопасной глины является причиной возрастания показателей физико-механической прочности и устойчивости глины к действию воды.

Выводы. В результате выполненных исследований установлено, что действие катионов Al^{+3} , Fe^{+3} и анионов Cl^- и SO_4^{-2} приводит к изменению строения минералов, содержащихся в глинистых грунтах, путем повышения их кристалличности, что является причиной возрастания прочности глины.

Введение катионов Al^{+3} , Fe^{+3} и анионов Cl^- и SO_4^{-2} приводит к смещению границы текучести глины в направлении более высокой влажности, повышает ее устойчивость к скольжению и увеличивает коэффициент устойчивости в 2–4 раза.

Полученные данные позволяют утверждать, что обработка глинистого слоя, залегающего в плоскости скольжения оползня, растворами хлорида алюминия, сульфата алюминия и хлорида железа с концентрациями более 6% обеспечивает существенное повышение устойчивости оползнеопасных склонов.

Список литературы / References

1. *Улучшение свойств глинистых грунтов с применением СВЧ-энергии при строительстве и ремонте автомобильных дорог* / [Гончарова Л.В., Баронова В.И., Егоров Ю.М., Федоров В.М.] // Вестн. Томск. гос. архит.-строит. ун-та. – 2001. – №2. – С. 72–79, 4 ил., Библ. 12.
Improvement of clay rocks quality by means of implementation of microwave energy use into motor roads construction and repair process / [Goncharova L.V., Baronova V.I., Yegorov Yu.M., Fedorov V.M.] // Vestn. Tomsk. gos. arkhit.-stroit. un-ta. – 2001. – No.2. – P. 72–79, 4 illustrations, Bibliography 12.
2. *Способ стабилизации оползней-потоков* [Текст]: пат. 2232851 С1 Россия: Е 02 D 29/02, 17/20 / Шадунц К.Ш. (Россия); заявитель и патентообладатель Кубанский гос. аграрный ун-т. – № 2002130691/03; заявл. 15.11.2002; опублик. 20.07.2004, Бюл. № 20.
A way of landslide flow stabilization [Text]: pat. 2232851 S1 Russia: E02 D 29/02, 17/20 / Shadunts K.Sh. (Russia); Kubanskiy gos. agrarny un-t. is the patentee and the patent holder – No.2002130691/03; application date November 15, 2002; publication date July 20, 2004, Bulletin No.20.
3. *Способ закрепления оползневых склонов* [Текст]: пат. 2080441 Россия: Е02 D 17/20 / Гугнин А.А., Трушинский М.Ю., Барвашов В.А., Я.М. Бобровский, М.А. Перлов (Россия). – № 94001152/03; заявл. 14.01.1994; опублик. 27.05.1997, Бюл. № 3.
The way of sliding slopes fastening [Text]: pat. 2080441 Russia: E02 D 17/20 / Gugin A.A., Trushinskiy M.Yu., Barvashov V.A., Ya.M. Bobrovskiy, M.A. Perlov (Russia). – No.94001152/03; application date January 14, 1994; publication date May 27, 1997, Bulletin. No.3.
4. *Способ зміцнення зсувонебезпечних схилів, що містять глинисті мінерали* [Текст]: пат. 13982 Україна: E02D 29/02, E02D 17/20. / Анциферов А.В., Канін В.О., Пашченко О.О., Пашченко О.В.; заявник та патенто власник УкрНДМІ. – № U 2005 11311; заявл. 29.11.2005; опубл. 17.04.2006, Бюл. № 4.
The way of fastening of sliding slopes containing clay rocks [Text]: pat. 13982 Ukraine: E02D 29/02, E02D 17/20. / Antsiferov A.V., Kanin V.O., Pashchenko O.O., Pashchenko O.V.; UkrNDMI is the patentee and the patent holder. – No.U 2005 11311; application date November 29, 2005; publication date April 17, 2006, Bulletin. No.4.
5. *Ломтадзе В.Д.* Физико-механические свойства горных пород. Методы лабораторных исследований / Ломтадзе В.Д. – Л.: Недра, 1990. – 328 с.
Lomtadze, V.D. Physical and mechanical properties of rocks. Laboratory research methods / Lomtadze V.D. – L.: Nedra, 1990. – 328 p.
6. *Изучение взаимодействия оползнеопасной глины Азовского побережья с растворами некоторых неорганических солей* / [Марченко В.И., Канин В.А., Пашченко А.А., Пашченко А.В.] // Вісник Донецького університету. Серія А. Природничі науки. – 2007. – №1. – С. 203–209.
Study of the interaction of sliding clay rocks of Azov coast with solutions of some inorganic salts / [Marchenko V.I., Kanin V.A., Pashchenko A.A., Pashchenko A.V.] // Visnyk Doneckogo universytetu. Series A. Pryrodnychi nauky. – 2007. – No.1. – P. 203–209.

Розглянуто можливість підвищення стійкості зсувонебезпечних схилів шляхом фізико-хімічної обробки глинистих порід водяними розчинами неорганічних солей металів. Показано, що дія катіонів Al^{+3} , Fe^{+3} й аніонів Cl^- і SO_4^{-2} призводить до підвищення кристалічності мінералів, які містяться в глинистих грунтах, що спричиняє зростання міцності глини. При введенні в грунт зазначених катіонів й аніонів можна також зміщати границю плинності глини в напрямку більш високої вологості й підвищувати її стійкість до скозвання.

Ключові слова: зсув, вологість, фізико-хімічний вплив, йонообмін, коефіцієнт стійкості, penetрація

The article considers the possibility of landslide-prone slopes stability increase by means of physical and chemical treatment of clay rocks by water solutions of inorganic salts of metals. It is shown that action of cations Al^{+3} , Fe^{+3} and anions Cl^- and SO_4^{-2} raises crystallinity of the minerals contained in clay soils that causes increase of firmness of clay. Also it is possible to shift the liquid limit of clay in direction of higher humidity and to raise its resistance to sliding by injection of the specified cations and anions into the soil.

Keywords: landslide, humidity, physical and chemical influence, ion exchange, stability coefficient, penetration

Рекомендовано до публікації докт. геол. наук Т.П. Волковою. Дата надходження рукопису 21.04.11