

СИЛИКАТИЗАЦИЯ СТРУКТУРНО-НЕУСТОЙЧИВЫХ ГРУНТОВ (Часть 1)

DOI 10.25296/1993-5056-2017-6-34-45

УДК 624.138.24; 624.138.41

**АБРАМОВА Т.Т.***Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, attoma@mail.ru*

Аннотация

Под влиянием различных факторов физическое состояние слабых структурно-неустойчивых грунтов, к которым относятся лессовые просадочные, может ухудшаться. Для обеспечения устойчивости сооружений на лессовых территориях большинство специалистов применяют общепризнанный метод силикатизации. Однако было выявлено, что в ряде случаев использование однорастворной силикатизации лессовых грунтов не дает ожидаемого уменьшения просадочных деформаций. Изучение причин недостаточной эффективности этого способа показало необходимость введения в инъекционный силикатный раствор активаторов, способствующих интенсификации процесса взаимодействия в системе «грунт–раствор». Для этой цели были использованы различные модификации органосиликатных растворов, где в качестве отвердителей силиката натрия применяются реагенты класса амидов (формаимид и отходы от его производства — КОФ и диметилформаимид), обладающие высокими технологическими свойствами. В результате реакции гелеобразования выделяется гель кремниевой кислоты (основное цементирующее вещество) и аммиак, способный дополнительно активизировать протекание физико-химических реакций в системе. Исследования в лабораторных условиях были проведены на просадочных лессовых грунтах, отобранных в различных регионах России и ближнего зарубежья и отличающихся по физико-механическим свойствам и физико-химической активности (активные, переходные и неактивные типы). В работе показано, что использование органосиликатных растворов по сравнению с однокомпонентной силикатизацией наиболее эффективно для неактивных и переходных типов лессовых грунтов. Высокие прочностные характеристики для них обусловлены более полной мобилизацией кремниевой кислоты и дополнительным образованием органосиликатных комплексов, что обеспечивает высокую их устойчивость в агрессивно-кислых средах. Эффективность использования этих растворов была подтверждена на опытно-производственной площадке Академгородка г. Душанбе. Высокие прочностные показатели получены также при инъектировании просадочных лессовых грунтов основания фундамента оперного театра в г. Киеве.

Ключевые слова:

лессовые грунты; техногенные грунты; интенсификация силикатизации; прочность, водостойкость; кислотная агрессия; инъекция

Ссылка для цитирования:

Абрамова, Т.Т., 2017. Силикатизация структурно-неустойчивых грунтов (Часть 1). Инженерная геология, № 6, с. 34–45.
DOI 10.25296/1993-5056-2017-6-34-45

SILICATIZATION OF STRUCTURALLY UNSTABLE SOILS (Part 1)

ABRAMOVA T.T.

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, attoma@mail.ru

Abstract

The weak structurally unstable soils, which include loess subsiding soils, can worsen their physical state under the influence of various factors. Silicatization is the general method used by many specialists to provide the stability of constructions on loess territories. However, it was found that in a number of cases the use of single-solution silicatization of loess soils does not decrease the subsidence deformations. A study of the reasons for the insufficient effectiveness of this method has shown the need for activators in the injectable silicate solution that promote the intensification of the interaction process in the "soil-solution" system. For this purpose, various modifications of organosilicate solutions have been used, where amide reagents (formamide and its production waste, such as CWF and dimethylformamide) with high technological properties are used as a curing agents of sodium silicate. A gel of silicic acid (the main cementing material) and ammonia are released as a result of the gelatinization reaction. Ammonia can additionally activate the physicochemical reactions in the system.

The studies in laboratory conditions were carried out on loess subsiding soils, that were sampled in various regions of Russia and near abroad countries, differing in their physico-mechanical properties and physicochemical activity (active, transition and inactive types).

In this paper it is shown that using organosilicate solutions in comparison with one-component silicatization is the most effective for inactive and transition types of loess soils. High strength characteristics for these soils caused by more complete mobilization of silicic acid and additional formation of organosilicate complexes, which provides their high stability in aggressively acidic environments. The effectiveness of the use of these solutions was confirmed at the experiment-production site of Akademgorodok, Dushanbe (Tajikistan). High strength parameters were obtained when injecting the loess subsiding soils of the foundations of the opera house in Kiev (Ukraine).

Key words:

loess soils; anthropogenic soils; intensification of silicatization; strength; water resistance; acid corrosion; injection

For citation:

Abramova, T.T., 2017. Silicatization of structurally unstable soils (Part 1). *Engineering Geology*, no. 6, pp. 34–45.

DOI 10.25296/1993-5056-2017-6-34-45

Введение

В последнее время в Российской Федерации наблюдается увеличение объемов строительства в особо сложных инженерно-геологических условиях, где поверхностные отложения представлены различными видами природных и техногенных структурно-неустойчивых грунтов. К таким грунтам относятся пучинистые, просадочные, набухающие, слабые водонасыщенные илистые и заторфованные грунты, ленточные глины, пльвуны, рыхлые пески и песчаники, насыпные техногенные и другие. Слабые, структурно-неустойчивые грунты под влиянием внешних механических, гидродинамических и физико-химических воздействий теряют прочность, испытывают значительные объемные изменения, ухудшается их физическое состояние и фильтрационные свойства. Вследствие этого возникают нежелательные геологические процессы, снижается устойчивость грунтового массива до возникновения структурного разрушения отдельных его участков со всеми вытекающими из этого последствиями.

Намечая контуры концепции управления инженерным поведением подобных систем, необходимо учитывать, что формирование напряженно-деформированного состояния в массивах структурно-неустойчивых грунтов обусловлено не только действием механических сил, но также внутренними специфическими физико-химическими процес-

сами и носит сложный характер. Физико-химическое воздействие силикатных растворов на массив грунта коренным образом меняет направленность и интенсивность развития опасных геологических процессов и явлений, количественное описание которых является одной из сложнейших задач механики структурно-неустойчивых грунтов. Основное преимущество такого воздействия заключается в том, что, во-первых, достигается высокий уровень преобразования грунтов, сопровождающийся многократным изменением величин показателей физических и физико-механических свойств. Во-вторых, спектр модифицированных силикатных растворов располагает широким диапазоном возможностей регулировать степень и характер искусственного взаимодействия в зависимости от требований конкретного проекта, а также относительно высокими темпами получения эффекта воздействия, что особенно существенно в аварийных ситуациях [8].

Оценка эффективности силикатизации лессовых грунтов

Типичные представители структурно-неустойчивых грунтов — лессы. В соответствии с изложенным выше для обеспечения устойчивости сооружений на территориях развития лессовых пород общим признанием специалистов пользуется метод силикатизации.

Геохимические параметры лессовых грунтов различной физико-химической активности [7]						
Группы грунтов по физико-химической активности	Содержание частиц $d < 0,01$ мм, %	Емкость поглощения в щелочной среде, мг-экв/100 г	Гипс, %	Сухой остаток, %	pH	Карбонаты, %
Активные	49–64	20,0–30,0	0,35–5,00	0,35–1,15	7,0–8,0	5,0–15,0
Переходные	16–48	15,0–20,0	0,20–0,35	0,15–0,50	8,0–8,5	5,0–22,0
Неактивные	< 16	8,0–15,0	0,10–0,20	0,05–0,30	8,0–10,0	5,0–20,0

Физико-технологические основы этого метода представляют собой инъекцию щелочных силикатных растворов с последующим образованием гелей кремниевой кислоты и формированием водостойких структур. В качестве инъекционных растворов используются водные растворы жидкого стекла или в сочетании с реагентом-отвердителем. В зависимости от дисперсности, степени влажности, проницаемости лессовых грунтов и проникающей способности растворов используются разнообразные технологические схемы. Конечный результат инъекционного закрепления определяется как физическим состоянием среды, так и ее физико-химической характеристикой. Первое контролирует выбор схемы и технологических параметров инъекции (давление нагнетания, расход раствора и т.п.), второе — тип физико-химических процессов и химических реакций (их механизм и кинетику), ответственных за формирование прочной и водостойкой структуры.

По структурно-текстурным условиям (которые определяются гранулометрическим составом пород по классификации С.С. Морозова), содержанию физической глины, водопроницаемости и степени влажности можно в первом приближении определить физико-химический тип способа закрепления в сочетании с оптимальной схемой инъекционного процесса [6].

Накопленный опыт по силикатизации лессовых грунтов показал, что основным критерием, определяющим протекание химических реакций, является содержание в их составе катиона кальция коллоидного поглощающего комплекса (ПК) [14]. Однако отмечаются случаи нарушения прямой корреляционной зависимости между величиной емкости поглощения и прочностью закрепления. Различные мнения можно обнаружить относительно влияния карбонатов кальция, магния и легкорастворимых солей.

В связи с этим учеными НИИОСП им. Н.М. Герсеева было предложено интенсифицировать процесс силикатизации с помощью:

- 1) различных химических добавок:
 - солей KCl, NaCl, Na₂CO₃, Na₂SO₄ [5];
 - 20% аммиачной воды [14];
- 2) увеличения силикатного модуля [14];
- 3) повышения температуры силикатного раствора [14].

Однако было выявлено, что в ряде случаев использование однорастворной силикатизации лессовых грунтов в различных регионах страны при соблюдении нормативных требований не дает ожидаемого уменьшения просадочных деформаций. В связи с этим возникла необходимость изучения причин недостаточной эффективности метода и выявления путей его усовершенствования. Для этой цели в проблемной лаборатории геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова были выполнены лабораторные и полевые исследования по классификации

лессовых грунтов с учетом их активности, которая проводилась на основе комплексной оценки важных геохимических факторов, включая их количественные значения. Использовались грунты, отобранные в различных регионах России и ближнего зарубежья.

Наиболее полно оценка важных геохимических факторов лессовых грунтов представлена в работе [7]. По геохимическим особенностям лессовые грунты авторами указанной статьи подразделяются на три группы: активные, переходные и неактивные (табл. 1). Это не только дисперсность, пластичность грунтов, емкость поглощения в щелочной среде и pH, но и солевой состав грунтов (гипс, карбонаты, легкорастворимые соединения).

Исследования показали, что физико-химически активные лессовые грунты успешно закрепляются раствором силиката натрия различной концентрации. Грунты двух других групп — переходные и неактивные — плохо поддаются искусственному преобразованию традиционным способом однорастворной силикатизации.

В связи с этим важной теоретической и практической задачей явился поиск путей совершенствования метода силикатизации.

Интенсификация процесса силикатизации лессовых грунтов

Возможность использования метода силикатизации для закрепления малоактивных грунтов осуществлялась в направлении интенсификации процесса на основе активизации физико-химических ресурсов грунта и (или) более полной мобилизации кремниевой кислоты в водостойких формах.

Современные представления в области геохимии зоны гипергенеза и биосферы содержат многочисленные указания на существенную роль, которую играют различные органические соединения (целлюлоза, эфиры, амиды, триэтилфосфат, тетраэтилмочевина, спирты) в поведении кремнезема. Большинство исследователей полагают, что в холодных силикатных растворах и гелях благоприятное состояние системы для процесса поликонденсации достигается в общем случае через увеличение координации кремния. Временному увеличению координационного числа кремния с образованием активных промежуточных комплексов способствуют молекулы органических соединений. Экспериментально было установлено [4], что среди наиболее эффективных активизаторов процесса полимеризации кремниевой кислоты оказались амиды, благодаря их способности образовывать комплексы за счет водородной связи. Это влечет за собой ориентированную адсорбцию полярных молекул на поверхности поликремниевой кислоты, что, в свою очередь, улучшает структуру кремнегеля.

В связи с этим в проблемной лаборатории геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова под руководством профессора, д.г.-м.н. С.Д. Воронкевича автором разработано семейство силикатных композиций с использованием поверхностно-активных веществ (ПАВ), являющихся представителями класса амидов (формамид, кубовый остаток формамида — КОФ и диметилформамид) [1, 2]. Данная разработка была обусловлена тем, что органические отвердители жидкого стекла имеют ряд преимуществ перед неорганическими: снижают поверхностное натяжение, увеличивают подвижность силикатного раствора и обладают высокой адсорбционной способностью на поверхности частиц грунта. В результате реакции гелеобразования выделяется гель кремниевой кислоты (основное цементирующее вещество) и аммиак, способный дополнительно активизировать протекание физико-химических реакций в системе. При этом увеличивается выход высокодисперсной твердой фазы гидрата окиси кальция, на которой адсорбируется анион кремниевой кислоты, притом достигается более полное ее связывание в водостойкие формы.

Технология приготовления инъекционных растворов проста и не требует дополнительных операций. В раствор жидкого стекла заданной концентрации вводят при обязательном перемешивании раствор отвердителя. На основании выполненных работ было подобрано и испытано несколько модификаций органосиликатной рецептуры, обладающих необходимыми технологическими свойствами: малой вязкостью 1–3 спз, возможностью регулирования гелеобразования в широких пределах (от нескольких минут до нескольких часов), нетоксичностью.

Кремнегели, формирующиеся на основе этих растворов, имеют достаточную прочность и значительную водостойкость, что особенно важно при закреплении оснований различных сооружений, существующих в условиях нестационарного режима, изменения влажности (рис. 1)¹.

Для исследований в лабораторных условиях отобраны образцы просадочных лессовых грунтов России (г. Волгоград, г. Новосибирск, Красноярский край) и Средней Азии (Узбекистан, Казахстан, Таджикистан). Выбор грунтов был обусловлен тем, что в упомянутых районах чаще встречаются разновидности просадочных грунтов, обладающих низкой физико-химической активностью, повышенной влажностью, а также малой изученностью воздействия силикатных растворов на лессовые грунты этих районов. Степень просадочности лессовых грунтов в интервале нагрузок от 0,05 до 0,40 МПа изменяется от 0,03 до 0,06, достигая максимального значения при нагрузке 0,2 МПа.

Характеристика грунтов представлена в табл. 2. Из данных таблицы видно, что грунты отличаются по дисперсности, содержанию карбонатов, гипса и рН.

Названия отобранных грунтов даны по классификации С.С. Морозова. Во всех грунтах содержание пылеватых фракций преобладает, причем крупной пыли больше, чем мелкой, что создает благоприятные условия для просадочных явлений. Содержание глинистой фракции во всех лессовых разновидностях колеблется от 6,0 до 33,0%.

Оценка наиболее важных геохимических факторов для искусственного их преобразования проводилась так же,

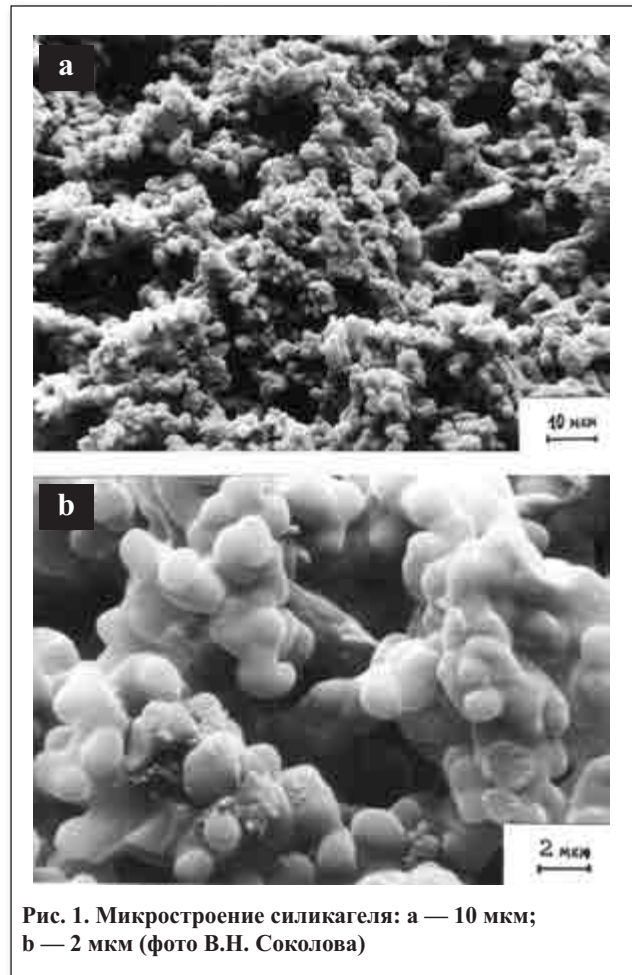


Рис. 1. Микростроение силикагеля: а — 10 мкм; б — 2 мкм (фото В.Н. Соколова)

как описано в работе [7]. К активным в физико-химическом отношении грунтам были отнесены средний лессовидный суглинок (Россия, г. Волгоград; обр. 7) и тяжелый лессовидный суглинок (Казахстан, обр. 8), характеризующиеся значениями емкости поглощения в щелочной среде от 22,9 до 33,8 мг-экв на 100 г грунта, содержанием карбонатов 8,5–11,0%, гипса 0,13–4,30% и рН 7,4–7,8.

В группу неактивных лессовых грунтов были включены грунты с емкостью поглощения в щелочной среде в пределах 8,3–9,2 мг-экв на 100 г грунта (обр. 1–4). Содержание глинистой фракции в этих образцах колеблется от 6,0 до 15,7%. Ведущими минералами среди глинистых частиц являются гидрослюда (65–75%), монтмориллонит, хлорит и каолинит (до 10%). Минеральный состав лессовидных суглинков активной группы отличается от описанной выше меньшим содержанием гидрослюда (до 40%) и увеличением количества монтмориллонита и смешаннослойных минералов (до 40–50%).

В водной вытяжке лессовых грунтов неактивной группы преобладают катионы Na^+ и K^+ , а активной — Ca^{+2} и Mg^{+2} , наиболее важные для силикатизации.

Свойства образцов лессовидных суглинков (обр. 5 и 6), вошедших в группу переходных по физико-химической активности (см. табл. 2), занимают промежуточное положение между активными и неактивными грунтами.

Лабораторные исследования по закреплению лессовых грунтов проводились на образцах нарушенного сложения, приготовленных при влажности и пористости, близких к

¹ Абрамова, Т.Т., 1981. Химическое инъекционное закрепление песчаных и пылеватых грунтов формамидсиликатными растворами. Дис. ... канд. геол.-мин. наук. МГУ им. М.В. Ломоносова, М.

Характеристика исследованных грунтов

№	Группы*	Название грунта (по С.С. Морозову) и место отбора	Содержание частиц, %		Число пластичности	Емк. поглощ. в щелочной среде, мг-экв/100 г	рН	Химический состав, %		
			Физическая глина <0,01 мм	Глинистая фракция <0,001 мм				Сухой остаток	Гипс	Карбонаты
1	Неактивные	Лесс легкосуглинистый, г. Колхозобад	24,0	6,0	0,07	8,4	8,4	1,00	1,50	15,0
2		Лесс среднесуглинистый тонкопесчанистый, г. Буденновск	32,4	15,7	0,06	8,3	–	0,35	4,35	7,8
3		Лесс среднесуглинистый, г. Душанбе	45,3	13,7	0,09	9,2	9,0	1,00	0,00	10,0
4		Средний лессовидный суглинок, г. Душанбе	42,0	14,0	0,09	8,9	9,7	0,35	0,10	19,2
5	Переходные	Средний лессовидный суглинок, Чебаково-Балахтинская впадина (Красноярский край)	36,0	18,5	0,08	19,0	8,3	0,06	0,02	7,5
6		Средний лессовидный суглинок, г. Новосибирск	39,0	18,0	0,10	17,0	8,0	0,40	0,30	13,0
7	Активные	Средний лессовидный суглинок, г. Волгоград	40,0	22,0	0,09	22,9	7,4	0,15	4,30	11,0
8		Тяжелый лессовидный суглинок, Тенгизская впадина, Казахстан	53,0	33,0	0,15	33,8	7,8	0,28	0,13	8,5

*Группы грунтов по физико-химической активности.

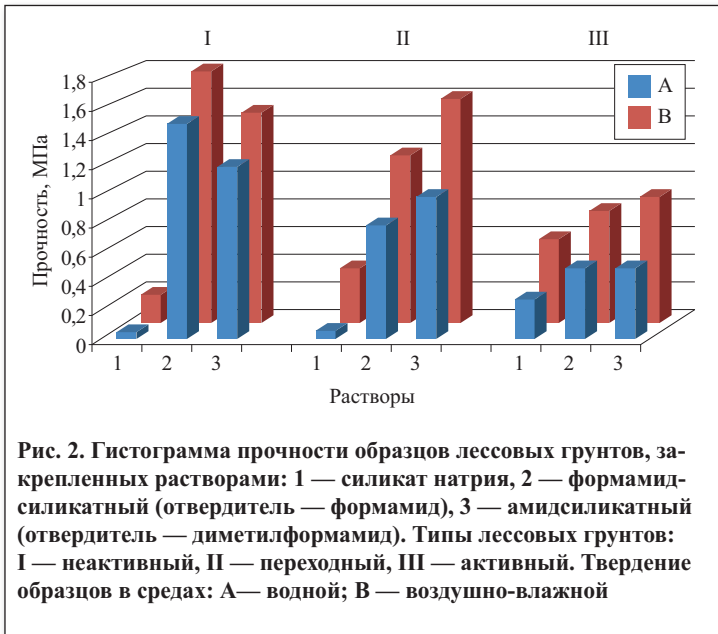


Рис. 2. Гистограмма прочности образцов лессовых грунтов, закрепленных растворами: 1 — силикат натрия, 2 — формаamid-силикатный (отвердитель — формаamid), 3 — амидсиликатный (отвердитель — диметилформаamid). Типы лессовых грунтов: I — неактивный, II — переходный, III — активный. Твердение образцов в средах: А — водной; В — воздушно-влажной

естественным. Закрепление проводилось методом капиллярной пропитки с использованием силикатных растворов [14]. Основными критериями оценки качества силикатизации лессовых грунтов явились прочность на одноосное сжатие, водостойкость и содержание водорастворимой кремниевой кислоты. Надежность предлагаемых аммиакпродуцирующих органических растворов оценивалась в сравнении с однокомпонентной силикатизацией той же плотности.

Из данных, представленных на рис. 2, видно, что для всей активной группы грунтов при взаимодействии их с раствором силиката натрия плотностью 1,13 г/см³ отмечается достаточно высокий набор прочности при твердении образцов в воздушно-влажной среде. Причем образцы, хранившиеся в водной среде до 180 суток, сохраняют прочность, которую приобрели. Однако силикатизация грунтов неактивной и переходной группы не обеспечивает получения водостойких структур (см. рис. 2, тип I, II). Отсутствие водостойкости закрепленных грунтов обусловлено низкой емкостью поглощения, повышенным значением рН.

Использование органических отвердителей силиката натрия (формаamid и диметилформаamid) обеспечивает достаточно высокую прочность закрепления и водостойкость преобразованных лессовых грунтов. Наибольшее увеличение прочности по сравнению с однокомпонентным силикатным раствором наблюдается для двух групп грунтов — неактивных (1,5–1,8 МПа) и переходных (1,2–1,6 МПа) (см. рис. 2).

Эта закономерность подтверждается и максимальным выщелачиванием кремниевой кислоты из образцов, закрепленных силикатом натрия без отвердителя. Органические отвердители способствуют более полной мобилизации кремниевой кислоты, и степень ее полимеризации в закрепленных образцах достигает 97%.

О высокой эффективности закрепления лессовых грунтов органосиликатными растворами можно судить по сохранению приобретенных прочностных характеристик в условиях длительного хранения в водной среде.

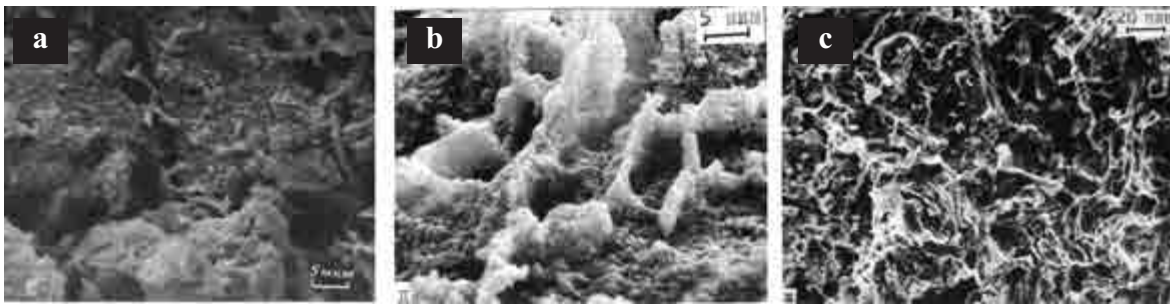


Рис. 3. Микростроение образцов среднего лесовидного суглинка (образец № 4), закрепленных: а — раствором жидкого стекла (воздушно-влажное хранение); б — формамидсиликатным раствором (10 сут. в воде); в — формамидсиликатным раствором (один год в воде) (фото В.Н. Соколова)

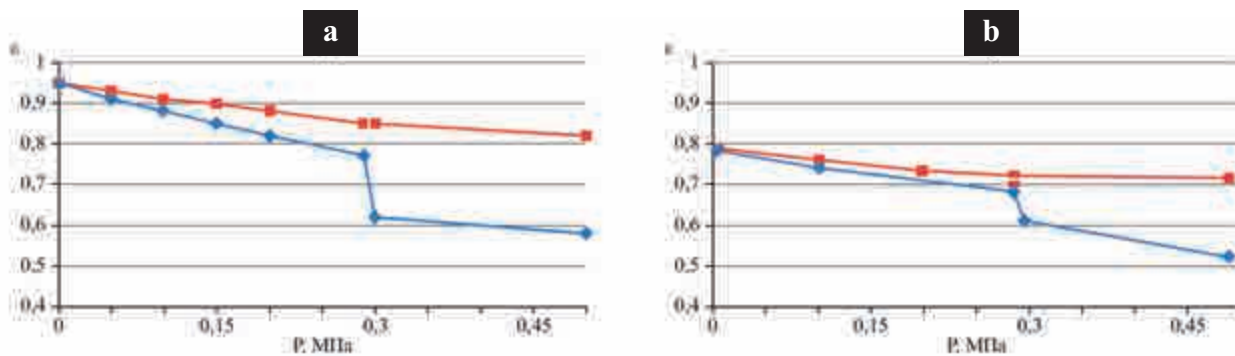


Рис. 4. Компрессионные кривые лесовых грунтов, замоченных водой при $P=0,3$ МПа: а — лесовидный суглинок средний; б — лесовидный суглинок тяжелый; синяя линия — исходный образец; красная — закрепленный образец

Гель кремниевой кислоты является основой искусственного цемента при закреплении силикатными растворами, поэтому и эффективность способа в конечном счете зависит от характера распределения и устойчивости кремнекислоты в грунте. Прочность на одноосное сжатие тесно связана с общим содержанием SiO_2 в образцах преобразованных грунтов. В микроструктуре лесовых грунтов, закрепленных раствором силиката натрия, наблюдаются лишь отдельные «сгустки» кремнегеля на контактах и поверхности частиц (рис. 3, а). Изучение образцов грунта, закрепленных органосиликатными растворами десятидневного хранения в водной среде, с использованием растрового электронного микроскопа показало, что частицы грунта покрыты почти сплошной пленкой кремнегеля. В цементирующем частицы грунта геле преобладает агрегативная структура из слившихся коллоидных частиц кремнезема, что, вероятно, связано с адсорбцией органических соединений и образованием органосиликатных комплексов (рис. 3, б).

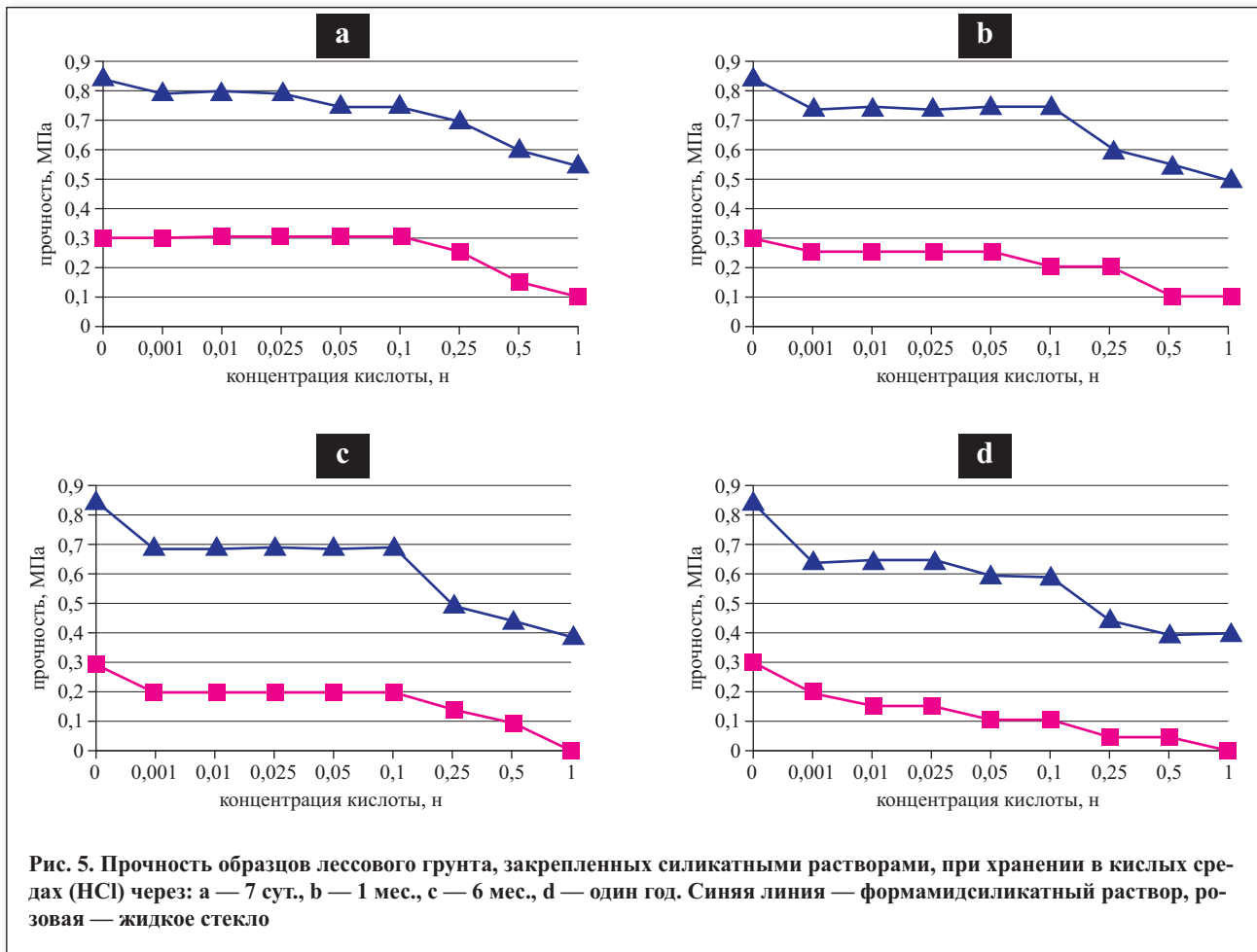
Структура геля, цементирующего частицы среднего лесовидного суглинка, при хранении закрепленных образцов в воде в течение одного года резко меняется (рис. 3, в). Гель покрывает частицы грунта такой плотной «стекловидной» пленкой, что уже трудно разобрать форму самих частиц. Исследование цемента при увеличении больше 20 000 раз позволило установить, что он также состоит из очень мелких (доли микрона) плотно слившихся глобулярных частиц.

После взаимодействия формамидсиликатного раствора с лесовыми грунтами последние становятся непро-

садочными. Компрессионные кривые для среднего лесовидного суглинка (обр. 4) и тяжелого лесовидного суглинка (обр. 8) представлены на рис. 4. Из полученных данных следует, что закрепленные грунты становятся не только непросадочными, но и менее сжимаемыми.

Определение устойчивости силикатизированных лесовых грунтов в условиях воздействия техногенно-кислых сред

В настоящее время в связи с проблемой защиты геологической среды возникает практическая задача — предупреждение неблагоприятных последствий агрессивного воздействия техногенных вод на подземные конструкции. Неблагоприятные последствия вызывают проливы, утечки, стоки различных промышленных предприятий, инфильтрации от твердых бытовых отходов и кислотных дождей. В результате внедрения или инфильтрации техногенных вод в грунты происходит их активное взаимодействие. Комплекс физико-химических процессов и реакций грунтов с инфильтрующимися растворами приводит к существенным изменениям составов как грунтов, так и поровых вод. В зависимости от типа пород, минерализации, химического состава техногенных инфильтратов может произойти потеря несущей способности грунта, разжижение, плавунность, пучинистость, просадка, набухание, растворение и суффозионная неустойчивость. В связи с этим эффективность защитных мероприятий в этих случаях может быть достигнута с помощью использования различных методов силикатизации лесовых грунтов.



В работах С.С. Морозова, В.Г. Самойлова [12], Б.А. Ржаницына [15], В.Е. Соколовича [14], Н.А. Ларионовой и др. [11], Е.С. Чаликовой [16] и др. представлены результаты воздействия некоторых солей и кислот на лесовые грунты, закрепленные растворами, двух- и неорганическим аммиакпродуцирующим способами силикатизации, приводящие к снижению деформационных характеристик преобразованных грунтов. Несмотря на это, проблема воздействия агрессивных кислотных сред на лесовые грунты, преобразованные органическими растворами, практически не изучена.

Определение устойчивости силикатизированных грунтов при агрессивно-кислотном воздействии осуществлялось в лабораторных условиях на просадочном лесовом грунте, отобранном в г. Новосибирске со строящейся линии метрополитена. По физико-химической активности грунт отнесен к переходному типу (см. табл. 2, обр. 6). Емкость поглощения его в щелочной среде соответствует 17,0 мг-экв на 100 г грунта. Грунт содержит 13% карбонатов, 0,3% гипса, 0,4% легкорастворимых солей (см. табл. 2). Глинистая фракция частиц представлена в основном гидрослюдой. Содержание смектита, иллита и каолинита не превышает 10%.

Закрепление среднего лесовидного суглинка осуществлялось так же, как описано в разделе «Оценка эффективности силикатизации лесовых грунтов». В качестве первого, эталонного, использовался раствор силиката натрия без отвердителя. Вторым был формамидсиликатный той же плотности (1,13 г/см³).

В качестве техногенных инфильтратов были выбраны растворы соляной, серной кислот с концентрациями от

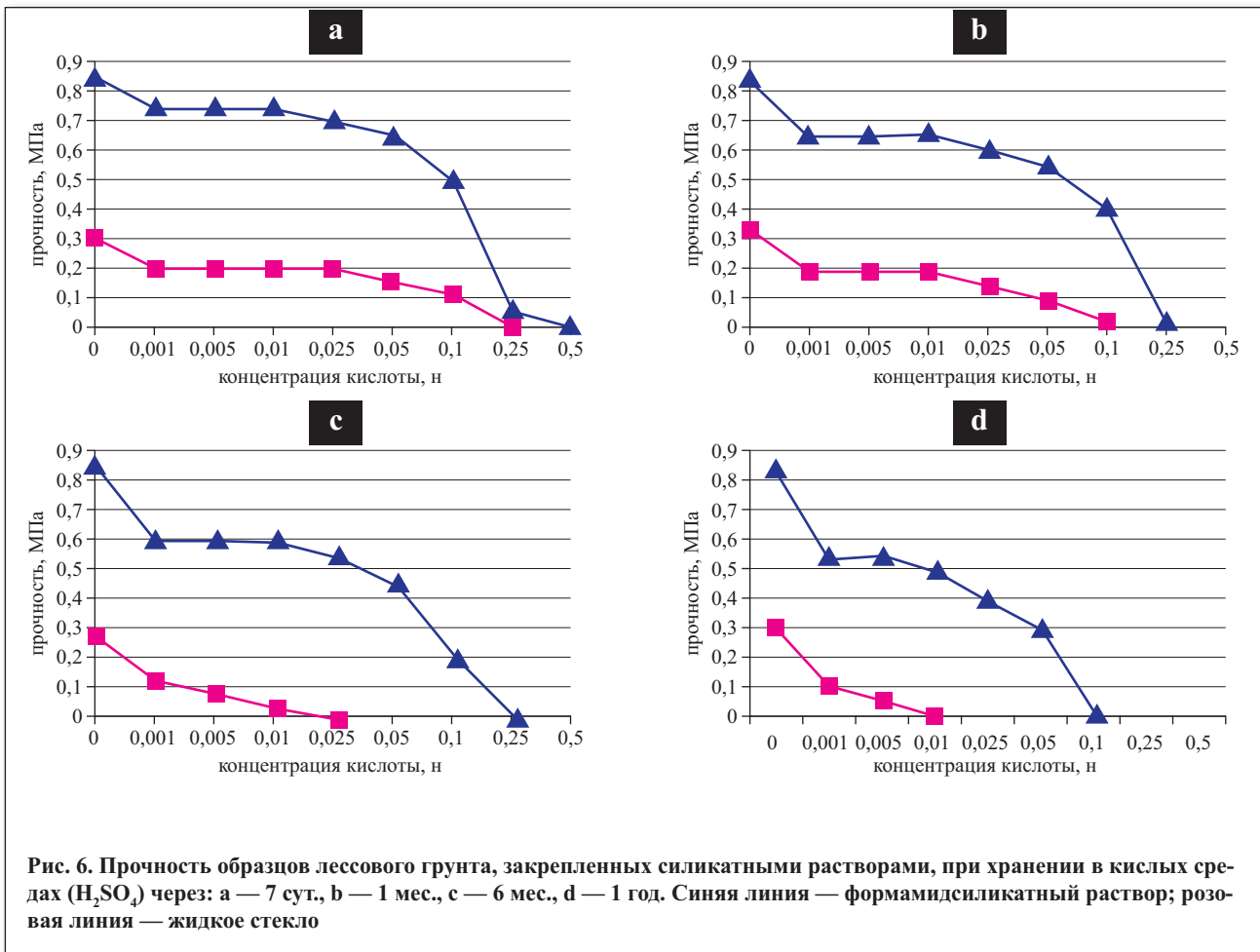
0,001 н (pH = 2,7–3,0) до 1 н (pH = 0,02–0,14) и растворы хлорного железа с концентрациями до 45 г/л (pH = 1,4).

Моделирование процессов воздействия агрессивных кислотных сред на закрепленный лесовый грунт проводилось при различных соотношениях твердой и жидкой фаз (ТЖ) в течение нескольких лет со сменой через определенные промежутки времени и без смены контактирующих растворов. В данной работе приводятся результаты с соотношением ТЖ 1:10 без смены контактирующих растворов.

Образцы среднего лесовидного суглинка после взаимодействия с силикатным раствором плотностью 1,13 г/см³ приобретают прочность 0,3 МПа. Прочность образцов постепенно понижается с повышением концентрации контактирующего с грунтом раствора и увеличением длительности воздействия кислой среды (HCl) на закрепленный грунт (рис. 5). Причем силикатизированные образцы лесового грунта обладают хорошей устойчивостью в растворе соляной кислоты до концентрации 0,1 н (pH = 1,02) и разрушаются только с повышением ее концентрации до 1 н (pH = 0,14) к одному году.

Из данных, представленных на рис. 5, видно, что образцы лесового грунта, закрепленного формамидсиликатным раствором, обладают значительно лучшей устойчивостью к солянокислому воздействию в течение одного года. Наибольшую агрессивность к закрепленному грунту проявляют растворы соляной кислоты (HCl) с концентрацией, превышающей 0,1 н.

В результате исследований было выявлено, что лесовый грунт, преобразованный формамидсиликатным раствором, устойчив к воздействию минерализованно-кис-



лых вод, содержащих соль хлорного железа с концентрациями до 45 г/л (рН = 1,4). Прочность образцов лесса, закрепленных формамидсиликатным раствором, через год хранения в такой среде соответствует 0,5 МПа.

Определено, что агрессивное воздействие серной кислоты на закрепленный лессовый грунт резко усиливается с увеличением концентрации кислоты в контактирующем с грунтом растворе и времени ее воздействия на образец (рис. 6). Через один год образцы, закрепленные органосиликатным раствором, теряют приобретенную прочность в растворах серной кислоты с концентрацией 0,1 н, а образцы, закрепленные раствором жидкого стекла, — значительно раньше (0,01 н). Это можно объяснить расклинивающим действием двуводного гипса, образующегося при взаимодействии серной кислоты и гидрата окиси Са, являющегося вторым вяжущим компонентом при силикатизации лессов.

Агрессивность серной кислоты по отношению к силикатизированному лессовому грунту может возрастать с увеличением в его составе глинистой составляющей. Р. Грим [9] считает, что растворимость всех глинистых минералов в этой кислоте возрастает по мере уменьшения размера частиц грунта. Наиболее уязвимыми к серной кислоте являются глинистые минералы группы монтмориллонита [10].

Проведенные исследования показали, что лессовый грунт, закрепленный органосиликатным раствором, обладает длительной устойчивостью к раствору серной кислоты (до 0,1 н). Более высокие концентрации серной кислоты в естественных условиях и даже при техногенном загрязнении грунтов сточными водами почти исключают-

ся. Они могут возникать лишь в экстремальных условиях при сильных проливах, протечках и т.п. В естественных условиях закрепленный массив лессового грунта обладает малой проницаемостью и поэтому при контакте его с агрессивной средой происходит только диффузионное взаимодействие, что обуславливает лучшую его устойчивость к кислотной агрессии.

Таким образом, интенсивность процессов взаимодействия в системе «силикатизированный лессовый грунт — кислый раствор» определяется:

- составом грунта;
- раствором, используемым для закрепления лессового грунта;
- составом и концентрацией контактирующего с грунтом раствора;
- условиями и длительностью этого воздействия.

Опытно-производственные исследования силикатизации лессовых грунтов

Закрепление среднего лессовидного суглинка двумя выбранными модификациями органосиликатных (формамид и кубовый остаток формамида — КОФ) растворов осуществлялось на объекте Академгородок (г. Душанбе) с использованием способа направленного разрыва, разработанного В.И. Сергеевым [13]. Этот метод позволил расширить границы использования силикатных растворов при инъектировании слабопроницаемых грунтов. Укрепленный массив грунта имел вид вертикальной стенки шириной 40–45 см и длиной до четырех метров (рис. 7).

Прочность образцов, отобранных из массива грунта на расстоянии от инъектора 0,5–1,5 м на глубинах 2,9–3,6 м,



Рис. 7. Общий вид закрепленного грунта (г. Душанбе, Академгородок) (фото автора)

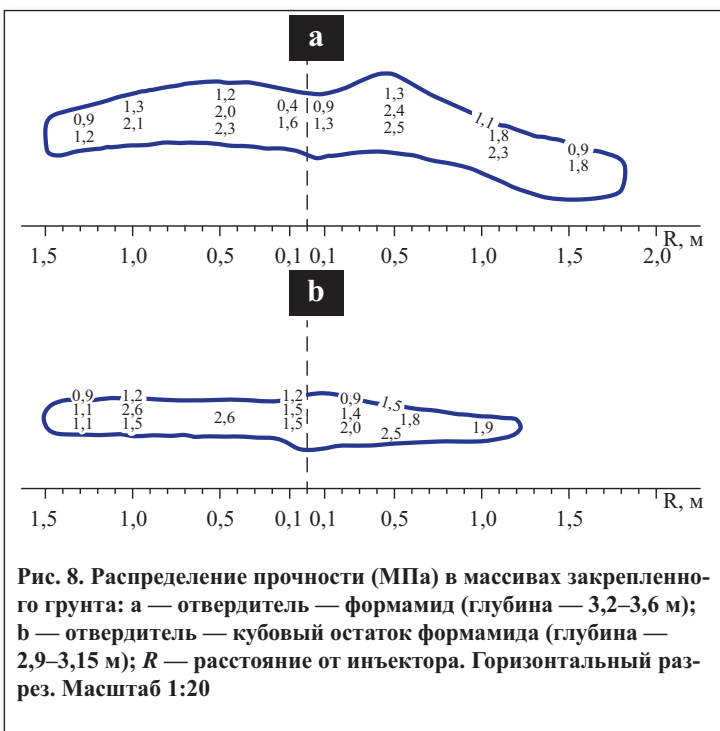


Рис. 8. Распределение прочности (МПа) в массивах закрепленного грунта: а — отвердитель — формамид (глубина — 3,2–3,6 м); б — отвердитель — кубовый остаток формамида (глубина — 2,9–3,15 м); R — расстояние от инжектора. Горизонтальный разрез. Масштаб 1:20

составила 0,9–2,6 МПа для двух испытуемых растворов (рис. 8).

На этом же участке при одинаковых технологических условиях осуществлялось инъецирование и других растворов: силиката натрия плотностью 1,13 г/см³; силиката натрия этой же плотности с добавкой соли KCl, отвердителя Al₂(SO₄)₃. Кроме этого проводилась газовая силикатизация без и с предварительной активизацией грунта углекислым газом. В результате исследований установлено, что при закреплении данного грунта гелеобразующими силикатными растворами с серноокислым алюминием и

хлористым калием количество образцов из закрепленных массивов, имеющих прочность до 0,6 МПа, составляет 50%. Использование способа газовой силикатизации приводит к возрастанию прочностных характеристик. Прочность образцов из массива грунта, преобразованного органосиликатными растворами, выше, чем с использованием газовой силикатизации с предварительной прокачкой газа (от 0,3 до 2,2 МПа). При этом последний способ включает две дополнительные трудоемкие операции, связанные с закачкой газа.

Основной объем лессового грунта, закрепленного двумя органосиликатными растворами, характеризуется величинами прочности на одноосное сжатие в пределах 1,5–2,5 МПа. Невысокие значения pH (≤ 10,4), низкое содержание (0,008–0,110 г/100 г грунта) водорастворимой кремниевой кислоты, высокая степень (до 97,75%) ее полимеризации в образцах из закрепленного массива подтверждают их длительную водостойкость.

Лабораторный контроль опытно-производственных исследований свидетельствует о практически одинаковой эффективности двух анализируемых растворов. Это, в свою очередь, подтверждает высокую эффективность КОФ в качестве отвердителя силиката натрия, что имеет существенное практическое значение из-за низкой его стоимости и ликвидации захоронения отхода химической промышленности.

Одна из разновидностей аммиакпроизводящей органосиликатной рецептуры [3] на основе жидкого стекла и диметилформамида была использована для закрепления лессовых просадочных грунтов основания фундамента оперного театра в Киеве. Контроль качества проведенных работ осуществлялся отбором проб грунта из шурфов сотрудниками ростовского ПромстройНИИ-проекта. Важным результатом явилось достаточно равномерное закрепление грунтового массива. Прочность на одноосное сжатие отобранных образцов из закрепленного массива колеблется в пределах 0,4–1,9 МПа в зависимости от расстояния от инжектора и глубины залегания просадочного лессового грунта. Максимальные значения соответствуют приинъекторной зоне. Высокие значения по прочности получены и для краевой зоны. Так, например, на расстоянии 0,7 м от инжектора она составляет 0,6–1,1 МПа на глубине 4,4 м и 0,4–0,6 МПа на глубине 5,4 м. Это обусловлено интенсификацией силикатизации данных грунтов с протеканием дополнительных физико-химических реакций с коллоидальной составляющей грунта (табл. 3).

В результате проведенных работ по взаимодействию органосиликатных растворов с лессовыми грунтами последние приобретают высокую прочность, водостойкость, становятся малосжимаемыми и непросадочными. Выявлено, что органосиликатные аммиакпроизводящие растворы наиболее эффективно использовать для преобразования структурно-неустойчивых лессовых грунтов с низкой физико-химической активностью.

Заключение

Лабораторные исследования и практические работы показали возможность и целесообразность применения органосиликатной рецептуры для целей устранения неблагоприятных свойств широкого спектра структурно-неустойчивых просадочных лессовых грунтов.

Таблица 3


Прочность образцов, отобранных из закрепленного массива грунта				
Шурф	Глубина от поверхности, м	Расстояние от инъектора, м	Прочность, МПа	
			Пределы значений	Среднее значение
1	4,4	0,1	0,5–1,4	1,0
		0,4	0,6–1,5	0,9
		0,7	0,6–1,1	0,8
	5,4	0,2	0,5–1,1	0,65
		0,4	0,4–0,5	0,4
		0,7	0,4–0,6	0,45
	7,1	0,2	1,5–1,9	1,7
		0,5	0,4–0,6	0,5
	7,7	0,2	1,1–1,9	1,5
0,5		1,0–1,7	1,4	
2	4,3	0,2	0,4–1,6	1,1
		0,5	0,5–1,6	0,9
	5,4	0,2	0,4–1,6	0,9
		0,5	0,4–0,4	0,4
	5,6	0,3	0,4–0,5	0,45

Примечание: среднее значение определялось по 6–7 образцам.

Разработанная методика отличается высокой проникающей способностью инъекционных растворов, обеспечивающей равномерную пропитку лессовых грунтов.

Достижимая прочность и стабильность закрепления устраняют структурную неустойчивость в состоянии практически полного обводнения грунтов, что обуслов-

лено дополнительным образованием органосиликатных комплексов.

Использование описанных в статье растворов для закрепления массивов просадочных лессовых грунтов с низкой физико-химической активностью подтвердило высокую их эффективность. 

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абрамова, Т.Т., Воронкевич, С.Д., 1979. А.с. 700583, СССР, МПК E01D 3/14, Состав для закрепления грунта, заявитель — Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, № 2617439/29-33, заявл. 18.05.78, опубл. 30.11.79. Бюл. № 44.
- Абрамова, Т.Т., Воронкевич, С.Д., Постникова, О.Н., 1987. А.с. 1333682, СССР, МПК E01D 3/14, Состав для закрепления грунта, заявитель — Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, № 3864596/29-33, заявл. 06.03.85, опубл. 30.08.87. Бюл. № 32.
- Абрамова, Т.Т., Воронкевич, С.Д., Валиева, К.Э., Шувалова, Л.П., Зеленский, Ю.В., 1990. Метод повышения эффективности силикатизации структурно-неустойчивых грунтов. Инженерная геология, № 5, с. 26–34.
- Айлер, Р.К., 1959. Коллоидная химия кремнезема и силикатов, пер. с англ. Госстройиздат, М.
- Аскалонов, В.В., 1946. Стабилизация лесса силикатно-солевым раствором. Почвоведение, № 11, с. 75–85.
- Воронкевич, С.Д., 1989. Управление свойствами массивов лессовых пород. Вопросы технической мелиорации. В кн. под ред. В.Т. Трофимова. Современные проблемы инженерной геологии лессовых пород. Наука, М., с. 70–85.
- Воронкевич, С.Д., Абрамова, Т.Т., Ларионова, Н.А., 1992. Повышение надежности инъекционного химического закрепления лессовых грунтов. Инженерная геология, № 6, с. 25–33.
- Воронкевич, С.Д., 1993. Геоэкологические возможности и функции методов технической мелиорации грунтов. Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, № 2, с. 18–24.
- Грим, Р.Е., 1967. Минералогия и практическое использование глин, пер. с англ. Мир, М.
- Зиангиров, Р.С., Окнина, Н.А., Лаврова, Н.А., 1982. Изменение физико-химических свойств хвалыньских глинистых пород под влиянием кислых техногенных вод. Сб. статей под ред. Р.С. Зиангирова, Изменение геологической среды под влиянием деятельности человека, Наука, М., с. 5–9.
- Макарова, О.В., Ларионова, Н.А., 2008. Оценка устойчивости силикатированных грунтов к воздействию агрессивных сред. Международный год планеты Земля: задачи геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии: Сергеевские чтения, Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, ГЕОС, М., Россия, вып. 10, с. 45–50.

12. Морозов, С.С., Самойлов, В.Г., 1964. Влияние химических сбросов на глинистые грунты в растворохранилищах. Материалы совещания по закреплению и уплотнению грунтов, Изд-во Груз. политех. ин-та, Тбилиси, СССР, с. 434–437.
13. Сергеев, В.И., Шимко, Т.Г., Кулешова, М.Л., Степанова, Н.Ю., 2012. Развитие инъекционного закрепления как одного из основных методов технической мелиорации грунтов. Инженерная геология, № 4, с. 6–12.
14. Соколов, В.Е., 1980. Химическое закрепление грунтов. Стройиздат, М.
15. Ржаницын, Б.А., 1986. Химическое закрепление грунтов в строительстве. Стройиздат, М.
16. Чаликова, Е.С., 1974. Долговечность силикатизированного лесса. Закрепление и уплотнение грунтов в строительстве, Материалы VIII Всесоюзного совещания, Будівельник, Киев, СССР, с. 160–163.

REFERENCES

1. Abramova, T.T., Voronkevich, S.D., 1979. A.s. 700583, SSSR, MPK E01D 3/14, Composition for soil fixation, the applicant — Lomonosov Moscow State University, no. 2617439/29-33, declared 18.05.78, published 30.11.79. Bulletin no. 44. (In Russ.).
2. Abramova, T.T., Voronkevich, S.D., Postnikova, O.N., 1987. A.s. 1333682, SSSR, MPK E01D 3/14, Composition for soil fixation the applicant — Lomonosov Moscow State University, no. 3864596/29-33, declared 06.03.85, published 30.08.87. Bulletin no. 32. (In Russ.).
3. Abramova, T.T., Voronkevich, S.D., Valieva, K.E., Shuvalova, L.P., Zelenskij, Yu.V., 1990. The method to increase silicification efficiency of structurally unstable soils. Engineering Geology, no. 5, pp. 26–34. (In Russ.).
4. Ailer, R.K., 1959. Colloidal chemistry of silica and silicates, translated from English. Gosstroizdat, M. (In Russ.).
5. Askalonov, V.V., 1946. Loess stabilization with silicate-brine solution. Eurasian Soil Science, no. 11, pp. 75–85. (In Russ.).
6. Voronkevich, S.D., 1989. Managing the properties of loessial massifs. Issues of technical melioration. In V.T. Trofimov (ed.), Modern problems of engineering geology of loess rocks. Nauka, Moscow, pp. 70–85. (In Russ.).
7. Voronkevich, S.D., Abramova, T.T., Larionova, N.A., 1992. Improving reliability of the loess soils chemical injection. Engineering Geology, no. 6, pp. 25–33. (In Russ.).
8. Voronkevich, S.D., 1993. Geocological possibilities and functions of soil technical amelioration methods. Environmental Geoscience, no. 2, pp. 18–24. (In Russ.).
9. Grim, R.E., 1967. Mineralogy and practical use of clay, translated from English. Mir, M. (In Russ.).
10. Ziagiurov, R.S., Oknina, N.A., Lavrova, N.A., 1982. Changes in the physico-chemical properties of Khvalyn clay rocks under the influence of acidic technogenic waters. In collection of papers, R.S. Ziagiurov (ed.), Change in the geological environment under the influence of human activity, Nauka, M., pp. 5–9. (In Russ.).
11. Makarova, O.V., Larionova, N.A., 2008. Evaluation of the stability of silicate soils at corrosive media. International Year of Planet Earth: problems of geoecology, engineering geology and hydrogeology: Sergeevsky readings, Materials of the annual session of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on the problems of geoecology, engineering geology and hydrogeology, GEOS, M., Russia, vol. 10. pp. 45–50. (In Russ.).
12. Morozov, S.S., Samoilov, V.G., 1964. Influence of chemical discharges on clay soils in solution storages. Materials of the meeting on consolidation and compaction of soils, Publ. of Georgian Polytechnic University, Tbilisi, USSR, pp. 434–437. (In Russ.).
13. Sergeev, V.I., Shimko, T.G., Kuleshova, M.L., Stepanova, N.Yu., 2012. The development of injection fixation as one of the main methods of soil technical amelioration. Engineering Geology, no. 4, pp. 6–12. (In Russ.).
14. Sokolovich, V.E., 1980. Chemical fixation of soils. Stroizdat, M. (In Russ.).
15. Rzhantsyn, B.A., 1986. Chemical fixation of soils at construction. Stroizdat, M. (In Russ.).
16. Chalikova, E.S., 1974. Longevity of silicified loess. Sealing and compaction of soils in construction, Materials of the VIII All-Union Conference. Budivelnik, Kiev, USSR, pp. 160–163. (In Russ.).

CAPTIONS TO FIGURES

Fig. 1. Microstructure of silica gel: a — 10 μm ; b — 2 μm (photo by V.N. Sokolov)

Fig. 2. Histogram of strength of loess soil samples fixed with solutions: 1 — sodium silicate, 2 — formamide silicate (hardener — formamide), 3 — amidesilicate (hardener — dimethylformamide). Types of Loess Soils: I — inactive, II — transitional, III — active. Solidification of samples in media: A — aqueous; B — air-dry

Fig. 3. Microstructure of samples of medium loess loam (sample no. 4), fixed: a — a solution of liquid glass (air-dry storage); b — formamide-silicate solution (10 days in water); c — formamide-silicate solution (one year in water) (photo by V.N. Sokolov)

Fig. 4. Compression curves of loess soils wetted with water at $P = 0.3 \text{ MPa}$: a — loess-like loam medium; b — loess loam heavy; the blue line — the original sample; red — fixed sample

Fig. 5. Strength of samples of loess soil, fixed with silicate solutions, when stored in acid media (HCl) through: a — 7 days, b — 1 month, c — 6 months, d — 1 year. Blue line — formamide silicate solution, pink — liquid glass

Fig. 6. Strength of samples of loess soil, fixed with silicate solutions, when stored in acidic media (H_2SO_4) in: a — 7 days, b — 1 month, c — 6 months, d — 1 year. Blue line — a formamide-silicate solution; pink — liquid glass

Fig. 7. General view of the anchored soil (Dushanbe, Akademgorodok) (photo of the author)

Fig. 8. Strength distribution (MPa) in arrays of anchored soil: a — hardener — formamide (depth — 3.2–3.6 m); b — hardener — bottoms of formamide (depth — 2.9–3.15 m); R — the distance from the injector. Horizontal section. Scale 1:20

CAPTIONS TO TABLES

Table 1. Geochemical parameters of loess soils of different physical and chemical activity [7]

Table 2. Characteristics of the investigated soils

Table 3. Strength of samples taken from a fixed mass of soil

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

АБРАМОВА Т.Т.

Старший научный сотрудник лаборатории исследования влияния геологических факторов на физико-химическое закрепление грунтов геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, к.г.-м.н., г. Москва, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

ABRAMOVA T.T.

Senior research scientist of the Research Laboratory of Geological Factors Influence on Physicochemical Soil Consolidation, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, PhD (Candidate of Science in Geology and Mineralogy), Moscow, Russia

ЭЛЕКТРОННАЯ ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛЫ

«ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ»,

«ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ»,

«ГЕОТЕХНИКА» И «ГЕОРИСК»



www.geomark.ru