

УДК 629.138.4

**С. П. Высоцкий, д-р техн. наук, А. В. Писаренко, канд. техн. наук**

**ГОУВПО «Донбасская национальная академия строительства  
и архитектуры», г. Макеевка**

## **ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ В СТРОИТЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЯХ**

*Увеличение количества аномальных климатических явлений привело к усилению в грунтах тиксотропных явлений, что вызвало изменение структурно-текстурных свойств грунтов. При этом изменяются прочностные характеристики оснований сооружений, что приводит к их деформациям и разрушениям. Рассмотрена возможность улучшения прочностных свойств грунтов за счет применения силикатизации. Определена сдвиговая деформация при закреплении обводненного грунта активированными растворами кремниевой кислоты. Установлена аналитическая зависимость прироста вязкости растворов жидкого стекла от разности его плотности и плотности растворителя.*

**Ключевые слова:** сдвиговая деформация, силикатизация, активированное жидкое стекло, плотность, вязкость, эффект Томса, гелеобразование

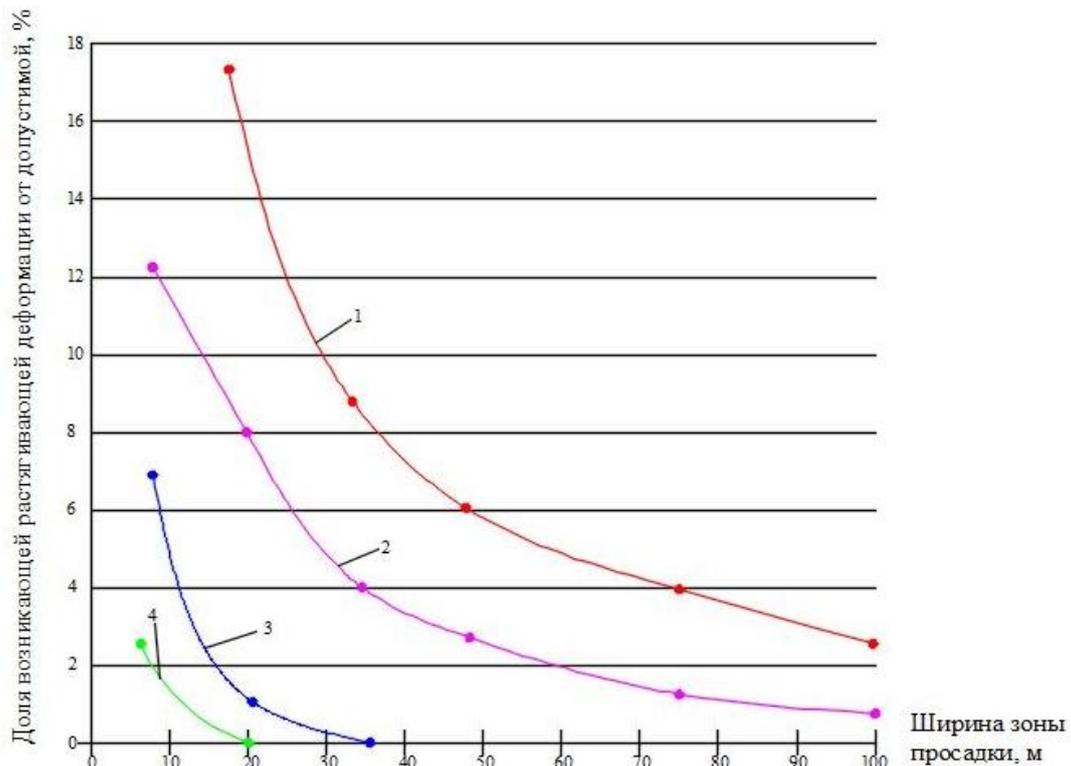
### **Введение**

Применение трубопроводного транспорта широко используется во всех отраслях промышленности. Трубопроводы относятся к опасным производственным объектам, отказы и аварии на которых влекут за собой значительный материальный и экологический ущерб. Возникает риск локальных и общих загрязнений окружающей среды, опасность для жизни и здоровья рабочего персонала и населения в результате протечек транспортируемых нефтепродуктов, ядовитых веществ. Следовательно, важной задачей является обеспечение безопасной эксплуатации трубопроводов. Воздействие транспортируемых продуктов осуществляется на поверхностные воды, ихтиофауну, почвы, растительность и атмосферный воздух. При работе нефтепровода в обычном режиме воздействие на окружающую среду минимально [1, 2].

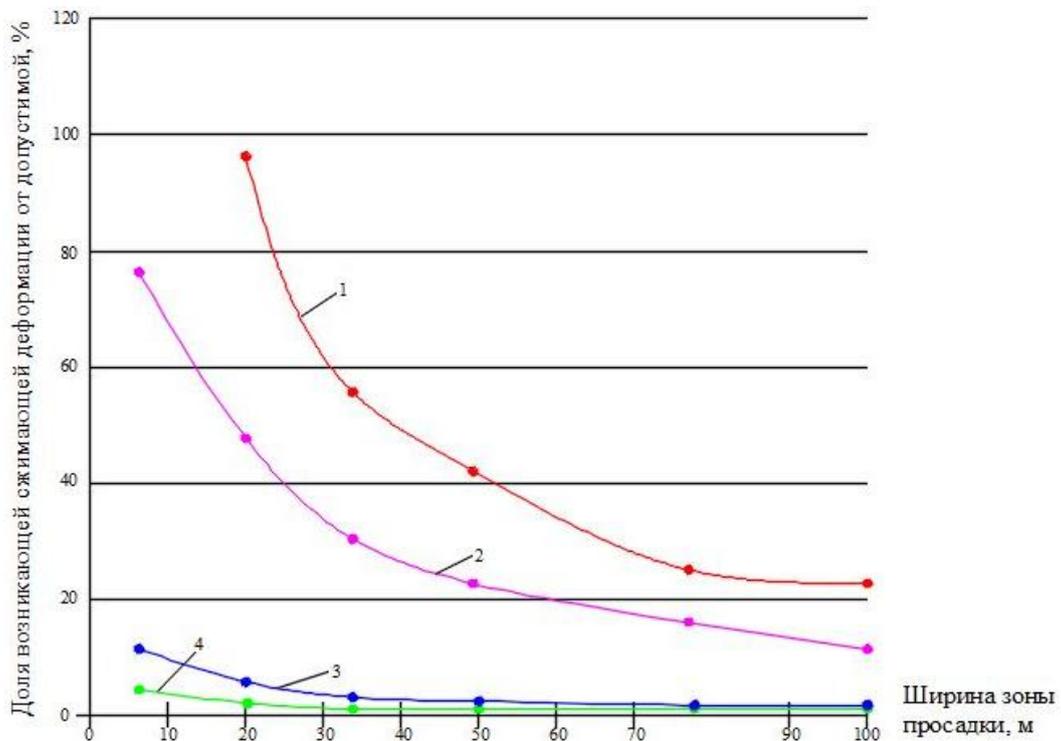
Трубопровод – это не только совокупность труб, но и соединительные детали (муфты, фланцы, раструбы, сварные швы и т. д.), запорно-регулирующая арматура, предохранительные клапаны, фасонные детали. Отказ одного из элементов конструкции промышленного сбора и транспорта продукции скважин вызывает нарушение работоспособности всей системы, оно связано с внезапной полной или частичной остановкой трубопровода из-за нарушения герметичности трубопровода или запорной и регулирующей арматуры или из-за закупорки трубопровода [3, 4].

При эксплуатации на трубопроводы действуют различные факторы и нагрузки, и по своей природе они знакопеременны, что приводит работу трубопровода в зону повышенной опасности (рисунок 1).

Проблема надежности трубопроводов непосредственно связана с исследованиями колебательных процессов упругих систем, зависящих от изменения параметров потока жидкости. Транспортировка жидкостей сопровождается вибрационными воздействиями на конструкцию трубопровода. Это вызывает дополнительные потери мощности потока транспортирования и приводит к ускоренному износу труб. Причинами этого могут служить неравномерное скопление жидкости на изгибных участках трубы; непроектные давления на стенки трубы от вихревых движений транспортируемой жидкости; динамические воздействия на трубопровод от просадок грунта [5, 6, 7].



а)



б)

1 – стальной трубопровод, смещение грунта 5 % от ширины зоны оползня;  
 2 – стальной трубопровод, смещение грунта 10 % от ширины зоны оползня;  
 3 – ПЭ трубопровод, смещение грунта 5 % от ширины зоны оползня;  
 4 – ПЭ трубопровод, смещение грунта 10 % от ширины зоны оползня  
 Рисунок 1 – Зависимость растягивающей (а) и сжимающей (б) деформации (в % от допустимой) от расстояния удаления от точки просадки грунта

**Целью исследования** является оценка эффективности присадок на основе силиката натрия к просадочным грунтам для повышения устойчивости строительных сооружений, в частности трубопроводного транспорта.

### **Изложение основного материала исследований**

В сложных условиях эксплуатации поддержание надежности и безопасности эксплуатации трубопроводного транспорта является важной задачей, определяющей сохранение чистоты окружающей среды и отсутствие необходимости расходов на внеплановый ремонт трубопроводов. Обеспечение безопасности невозможно без комплексного подхода, включающего в себя исследование закономерностей изменения состояния трубопровода в процессе эксплуатации и анализ показателей надежности.

Наибольшую потенциальную опасность для окружающей среды представляют магистральные нефтегазопроводы. Трубопроводный транспорт является важнейшей составляющей топливно-энергетического комплекса развитых стран. Поэтому поиск эффективных путей, направленных на гарантированное обеспечение конструктивной надежности трубопроводов, – весьма актуальная задача. Надежность нефтепровода – это основной фактор обеспечения его безопасности для окружающей среды.

В последнее время на нефтепроводах увеличилось число аварий, возникающих в результате внешнего механического воздействия на линейную часть нефтепровода, включающего силовое воздействие различного характера.

Анализ результатов расследования аварийных ситуаций, произошедших за последние годы на нефтепроводах, позволил выявить причины их возникновения. Факторами, влияющими на интенсивность аварий на нефтепроводах, согласно данным Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору, являются [8]:

- брак строительства / изготовления (37 %);
- конструктивные недостатки (18 %);
- механическое воздействие (18 %);
- износ оборудования (8,5 %);
- несанкционированные врезки (2,5 %);
- природные явления (15 %).

Для закрепления грунта широко применяются композиции на основе растворов жидкого стекла. Вязкость растворов зависит от их концентрации и модуля жидкого стекла. Для оценки влияния указанных свойств на вязкость растворов авторы определили влияние плотности и модуля растворов на их вязкость. Значения плотности и вязкости растворов определяли традиционными методами.

Обработка экспериментальных данных показала, что зависимость прироста вязкости над вязкостью растворителя от разности плотности растворов жидкого стекла и плотности растворителя для разных значений модуля хорошо описываются прямыми линиями в полупрологарифмических координатах (рисунок 2).

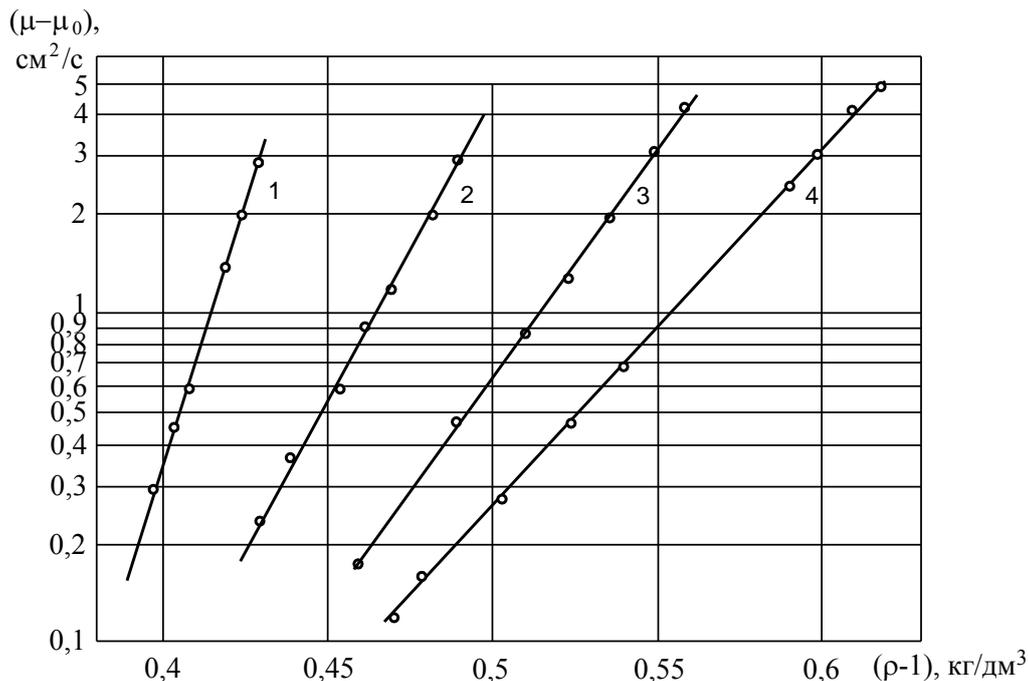


Рисунок 2 – Зависимость прироста вязкости растворов жидкого стекла от разности его плотности и плотности растворителя

Аналитическое решение зависимости вязкости растворов жидкого стекла от плотности при различных значениях модулей имеет вид

$$\eta - \eta_0 = A \cdot \exp[B(\rho - 1)],$$

где  $A$  – предэкспоненциальный множитель;

$B$  – показатель степени;

$\rho$  – плотность жидкого стекла, кг/дм<sup>3</sup>;

$1$  – плотность растворителя, кг/дм<sup>3</sup>.

Значение предэкспоненциального множителя и показания степени приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Зависимость вязкости растворов жидкого стекла от плотности кремниевой кислоты

Модуль $M$	Предэкспоненциальный множитель, $A$	Показатель степени, $B$
1,5	$1,26 \cdot 10^{-13}$	71,46
2,4	$2,97 \cdot 10^{-9}$	42,31
2,45	$7,71 \cdot 10^{-8}$	31,83
3,22	$1,38 \cdot 10^{-6}$	24,35

Согласно П. Флори характеристическая вязкость зависит от размеров макромолекулярного клубка:

$$\eta = \Phi_0 (\hat{h}^2)^{3/2} / M,$$

где  $\Phi_0$  – константа Флори, Па·с·г/(моль·м);

$\hat{h}^2$  – среднеквадратическое расстояние между конечными участками полимерной цепи, м;

$M$  – молекулярная масса полимерной структуры, г/моль.

Обращает на себя внимание то, что при меньших значениях модуля жидкого стекла влияние прироста разности плотности раствора и растворителя на увеличение прироста вязкости существенно больше, чем при использовании жидкого стекла с повышенными значениями модуля. Это можно объяснить увеличением соотношения  $(\hat{h}^2)^{3/2}/M$ , за счет уменьшения молярной массы полимера для малых значений модуля жидкого стекла.

Трубопроводный транспорт имеет огромную протяженность, и может пересекать структурно-неустойчивые грунты. Изменение прочностных характеристик грунтов приводит к деформациям и разрушениям сооружений, зданий и трубопроводов, соприкасающихся с ними. Деформации земной поверхности усиливаются также при наличии подработок в шахтерских городах и поселках. Одним из методов предотвращения аварийных ситуаций на трубопроводах может стать установление химически устойчивого «силоксанового экрана», ограждающего трубопровод по диаметру на всем участке структурно-неустойчивого грунта. Авторами были выполнены экспериментальные исследования по исследованию работоспособности и физических характеристик «силоксанового экрана» на разработанной и запатентованной установке. Работа системы основана на взаимодействии силикатов натрия с кислотой с образованием активной кремниевой кислоты ( $\text{SiO}_2$ ) [9]. В этой системе, как известно, при низких значениях pH кремнезем вначале полимеризуется до очень небольших дискретных частиц. Одним из важнейших свойств дисперсных систем является их устойчивость. Устойчивость коллоидной системы на основе  $\text{SiO}_2$  характеризуется временем ее жизни в практически неизменном состоянии.

Известно применение силикатирования для закрепления слабых грунтов. Однако при использовании силикатирования следует учитывать то, что это мероприятие обеспечит положительный эффект только при полимеризации кремниевой кислоты с образованием силоксановых структур. Химический процесс закрепления просадочных грунтов (рисунок 3) такими растворами осуществляется за счет силоксановых связей, которые характерны для силикатных полимеров.

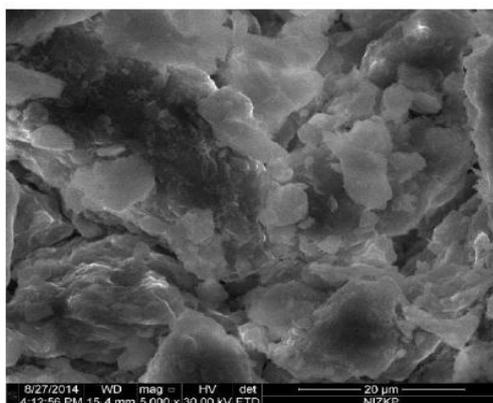
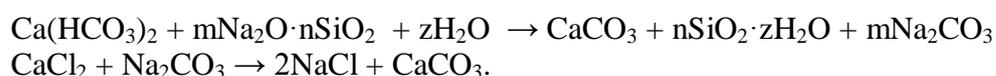


Рисунок 3 – Микроструктура просадочного грунта

Согласно химизму процесса жидкое стекло не образует полимерных структур. Эти связи являются устойчивыми по отношению к гидролизующему действию воды, вследствие чего придают грунтовому массиву твердость, жесткость и водонепроницаемость. Полимеризация может происходить при наличии в увлажненной почве гидрокарбонатных ионов. Процесс происходит по следующей схеме:



Доказано, что при насыщении водой смещение грунта обладает большей скоростью и

меньшей вязкостью. Раствор активной кремниевой кислоты обладает большей жесткостью по сравнению с жидким стеклом. Характерно, что жесткость раствора увеличивается при увеличении содержания  $\text{SiO}_2$  в растворе золя кремниевой кислоты.

На опытной установке проведены эксперименты по определению сдвиговой деформации при закреплении обводненного грунта растворами кремниевой кислоты, а также растворами кремниевой кислоты с добавлением анионоактивного полиакриламида Ecofloc [10]. В результате экспериментов получены зависимости, по которым видно, что напряжение сдвига при массовой доле раствора в грунте выше 3,0 % практически не меняется и резко возрастает при уменьшении массовой доли ниже 3,0 %. При равных концентрациях растворов в грунте, чем выше массовая доля  $\text{SiO}_2$ , тем больше напряжение сдвига (рисунок 4).

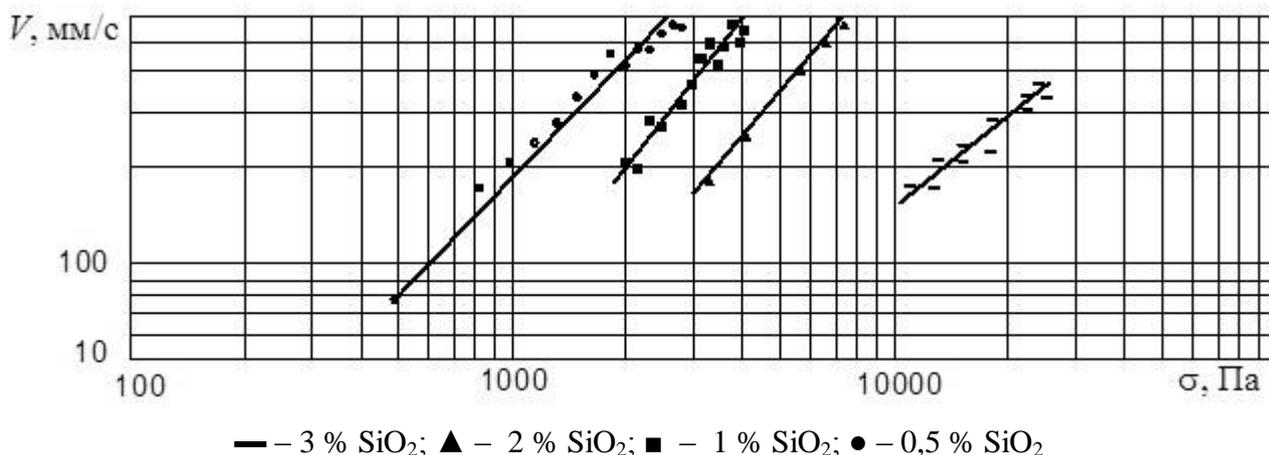


Рисунок 4 – График зависимости скорости смещения от напряжения сдвига при различных закрепляющих составах в грунте при 50 %-м соотношении грунт-раствор

Наименьшее сопротивление оказывали частицы в водонасыщенном состоянии, затем закрепленные жидким стеклом. Наибольшую эффективность для увеличения жесткости суспензии почва – вода – присадка обеспечивает концентрация присадки 1–2 %. Применение полиакриламида обеспечивает увеличение проникающей способности присадок. Это можно объяснить наличием эффекта Томса на грани сред жидкость – твердое тело (почва). Как известно, эффект Томса обеспечивает снижение гидравлического сопротивления и увеличение проникающей способности жидкости в структуру почвы.

Для обеспечения нормальной эксплуатации трубопроводов необходим целый комплекс научно-технического и аппаратно-программного обеспечения. С точки зрения обеспечения экологической надежности трубопроводов в эксплуатационный период важна разработка мероприятий, обеспечивающих предупреждение аварий, а не ликвидацию их последствий. Оценка надежности трубопроводов важна на каждом этапе эксплуатации.

### Выводы

1. Применение закрепления грунтового массива химическими растворами способно минимизировать или полностью предотвратить негативное влияние тиксотропного эффекта на здания и сооружения.
2. Раствор активной кремниевой кислоты наиболее эффективен с массовой долей 2 %  $\text{SiO}_2$  и может применяться для повышения несущей способности оснований зданий и сооружений, которые эксплуатируют на слабых (просадочных) грунтах.
3. Для обеспечения эксплуатационной надежности и повышения несущей способности оснований зданий (при обводнении грунта с поверхности) рационально применять раствор активной кремниевой кислоты с полиакриламидом. Увеличение в растворе массовой доли полиакриламида способствует повышению несущей способности грунта, так как в грунте возникает эффект Томса на границе сред, в результате которого происходит отведение грун-

ТОВЫХ ВОД ОТ ЗОНЫ ЗАКРЕПЛЯЕМОГО ГРУНТОВОГО МАССИВА.

### **Список литературы**

1. O'Rourke, M. J. Response of Buried Pipelines Subject to Earthquake Effects: Monograph № 3 / M. J. O'Rourke, X. Liu. – Текст : электронный // Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research. – New York, 1999. – 276 p. – URL: <https://ubir.buffalo.edu/xmlui/handle/10477/588> . – ISBN 0-9656682-3-1.
2. Dash, S. R. ИТК-GSDMA Guidelines for Seismic Design of Buried Pipelines: Provisions with Commentary and Explanatory Examples / S. R. Dash, S. K. Jain. – Текст : электронный. – India, Kanpur : Nicee, 2007. – URL : <http://www.iitk.ac.in/nicee/ИТК-GSDMA/EQ28.pdf> .
3. Green, K. P. Safety in the Transportation of Oil and Gas: Pipelines or Rail? / K. P. Green, T. Jackson. – Текст : электронный // Fraser Research Bulletin by the Fraser Institute. – Canada. – 2015. – URL: <https://www.fraserinstitute.org/sites/default/files/safety-in-the-transportation-of-oil-and-gas-pipelines-or-rail-rev2.pdf> .
4. Petroleum Pipeline Systems. – Текст : электронный // Pipeline & Hazardous Material Safety Administration. U.S. Department of Transportation : сайт. – URL: <https://primis.phmsa.dot.gov/comm/PetroleumPipelineSystems.htm?nocache=4446> Available from .
5. Belvederesi, C. Statistical Analysis of Oil and Gas Pipeline Accidents with a Focus on the Relationship between Pipeline Design and Accident Consequences : Unpublished master's thesis / C. Belvederesi. – Текст : электронный. – Calgary : University of Calgary, AB. – 2017. – 161 p. – URL: <http://dx.doi.org/10.11575/PRISM/5221> .
6. Завьялов, В. В. Проблемы эксплуатационной надежности трубопроводов на поздней стадии разработки месторождений : монография / В. В. Завьялов. – Москва : ВНИИОЭНГ, 2005. – 331 с. – ISBN 5-88595-139-7.
7. Rusanova, G. V. Evolution of Human-affected Soils Along a Gas Pipeline in the Northern Urals / G. V. Rusanova // Eurasian Soil Science = Pochvovedenie. – 1997. – Vol. 30, № 7. – P. 788–795.
8. РД 39-132-94. Правила по эксплуатации, ревизии, ремонту и отбраковке нефтепромысловых трубопроводов : официальное издание : утвержден Минтопэнерго РФ от 30.12.93 : введен в действие 01.07. 94. – Москва : НПО ОБТ, 1994. – 357 с. – ISBN 5-8103-00047-3.
9. Кройт, Г. Г. Наука о коллоидах. Том 1. Необратимые системы / Г. Г. Кройт. – Москва : Изд-во иностранной литературы. – 1955. – 538 с.
10. Писаренко, А. В. Анализ свойств закрепляющего раствора на основе активной кремниевой кислоты и полиакриламида для усиления просадочных грунтов / А. В. Писаренко, В. И. Братчун. – Текст : электронный // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – Макеевка : ДонНАСА – 2017. – Вып. 2017-2(124). – С. 154–160. – URL: [http://www.donnasa.ru/publish\\_house/journals/vestnik/2017/vestnik\\_2017-2\(124\).pdf](http://www.donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2017/vestnik_2017-2(124).pdf) .

**С. П. Высоцкий, А. В. Писаренко**

**ГОУВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка  
Предупреждение чрезвычайных ситуаций в строительных сооружениях**

В результате появления аномальных климатических явлений во многих грунтах увеличиваются тиксотропные явления, при которых изменяются структурно-текстурные свойства грунтов и их способность противостоять внешним воздействиям. При этом изменяются прочностные характеристики оснований сооружений, что приводит к их деформациям и разрушениям.

Показано, что увеличение вязкости почвенной суспензии обеспечивает повышение уровня сдвиговой деформации и, соответственно, повышение устойчивости строительных сооружений. Для улучшения строительных свойств грунтов нашла применение их силикатизация.

Вязкость растворов жидкого стекла в значительной степени зависит от его модуля. В работе выведена аналитическая зависимость влияния прироста вязкости над вязкостью растворителя от плотности растворов жидкого стекла и плотности растворителя для разных значений модуля. На сконструированной авторами опытной установке получены зависимости напряжения сдвига от массовой доли раствора в грунте. При равных концентрациях растворов в грунте увеличение массовой доли диоксида кремния приводит к росту сдвиговой деформации. Применение полиакриламида приводит к увеличению проникающей способности раствора. Установлено, что в зависимости от направления поступления воды – снизу вверх – при подтоплении грунта шахтными водами или сверху вниз – при наводнениях, целесообразно изменять рецептуру строительных растворов.

**СДВИГОВАЯ ДЕФОРМАЦИЯ, СИЛИКАТИЗАЦИЯ, АКТИВИРОВАННОЕ ЖИДКОЕ СТЕКЛО, ПЛОТНОСТЬ, ВЯЗКОСТЬ, ЭФФЕКТ ТОМСА, ГЕЛЕОБРАЗОВАНИЕ**

*S. P. Vysotskiy, A. V. Pisarenko*  
**Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeevka**  
**Emergency Prevention in Construction Structures**

As a result of abnormal climatic phenomena, thixotropic effects are increasing in many soils. They change the structural and textural properties of soils and their ability to withstand external actions. At the same time, the strength characteristics of the structure foundations are changed, which leads to their deformation and destruction.

It is shown that an increase in the viscosity of the soil suspension provides an increase in the level of shear deformation and, accordingly, an increase in the stability of structures. To improve the construction properties of soils, their silicatization has found application.

The viscosity of liquid glass solutions is largely dependent on its modulus. An analytical dependence of the viscosity increase impact over solvent viscosity on the density of liquid glass solutions and the density of the solvent for different values of the modulus is derived. On the pilot plant designed by the authors, the dependences of shear stress on the mass fraction of the solution in the soil are obtained. At equal concentrations of solutions in the soil, the increase in the mass fraction of silicon dioxide leads to the increase in shear strain. The use of polyacrylamide leads to the increase in the solution penetrability. It is determined that depending on the direction of water entry - from bottom to top - when the soil is flooded with mine water or from top to bottom - during floods, it is advisable to change the recipe of mortars.

SHEAR DEFORMATION, SILICATIZATION, ACTIVATED LIQUID GLASS, DENSITY, VISCOSITY, TOMS EFFECT, GELLING

**Сведения об авторах:**

**С. П. Высоцкий**

SPIN-код: 7497-0100  
 Scopus Author ID: 7004891012  
 ORCID ID: 0000-0002-2988-7245  
 Телефон: +38 (071) 391-35-97  
 Эл. почта: sp.vysotsky@gmail.com

**А. В. Писаренко**

SPIN-код: 5472-8598  
 Телефон: +38 (099) 786-99-48  
 Эл. почта: pisarenko\_av@mail.ru

*Статья поступила 15.01.2020*

© С. П. Высоцкий, А. В. Писаренко, 2020

*Рецензент: М. В. Коновальчик, канд. техн. наук, АДИ ГОУВПО «ДОННТУ»*