

**Список литературы**

1. Wuebbles D, Jain A. Concerns about climate change and the role of fossil fuel use. *Fuel Processing Technology* 2001;71(1-3):99-119.
2. Hamsic, N., Schmelter, A., Mohd, A., Ortjohann, E., Schultze, E., Tuckey, A., et al. Increasing Renewable Energy Penetration in Isolated Grids Using a Flywheel Energy Storage System. In: *Proceedings of the International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives; 2007 Apr 12-14; Setúbal, Portugal.* p. 195-200.
3. Ruth M., Zinaman O., Antkowiak, M., Boardman R., Cherry R., Bazilian M. Nuclear-renewable hybrid energy systems: Opportunities, interconnections, and needs. *Energy Conversion and Management* 2014;78:684-94.
4. Bragg-Sitton S., Boardman R. Overview of U.S. DOE Research and Development of Nuclear-Renewable Hybrid Energy Systems. *Transactions of the American Nuclear Society* 2015;112:113-6.
5. Garcia H., Chen, J., Kim J., McKellar M., Deason W., Vilim R., et al. Nuclear Hybrid Energy Systems - Regional Studies: West Texas & Northeastern Arizona. Idaho Falls (ID): Idaho National Laboratory, Nuclear Science and Technology Division; 2015 Apr. Report No.: INL/EXT-15-34503. Contract No.: DE-AC07-05ID14517. Sponsored by the U.S. Department of Energy.
6. Cherry R., Aumeier S., Boardman R. Large hybrid energy systems for making low CO2 load-following power and synthetic fuel. *Energy & Environmental Science* 2012;5(2):5489-97.
7. Bragg-Sitton S., Boardman R., Rabiti, C., Kim J., McKellar M., Sabharwall P., et al. Nuclear-Renewable Hybrid Energy Systems: 2016 Technology Development Program Plan. Idaho Falls (ID): Idaho National Laboratory, Nuclear Science and Technology Division; 2016 Mar. Report No.: INL/EXT-16-38165. Contract No.: DE-AC07-05ID14517. Sponsored by the U.S. Department of Energy.
8. Panwar, M., Mohanpurkar, M., Osorio, JD, Hovsapien, R. Significance of Dynamic and Transient Analysis in the Design and Operation of Hybrid Energy Systems. In: *Proceedings of the 9th International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control, and Human Machine Interface Technologies [Internet]; 2015 Feb 23-26; Charlotte, NC.* Available: <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/1179379/>.
9. Eichman J., Harrison K, Peters, M. Novel Electrolyzer Applications: Providing More Than Just Hydrogen. Boulder (CO): National Renewable Energy Laboratory; 2014 Sep. Report No.: NREL/TP-5400-61758. Contract No.: DE-AC36-08GO28308. Sponsored by the U.S. Department of Energy.

## НАДЕЖНОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА

С. П. Высоцкий, д.т.н., профессор; А. В. Писаренко, к.т.н., доцент

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» г. Макеевка

**Аннотация.** Выполнен анализ внутренних причин – состава транспортируемой среды, и внешних причин – механических воздействий от подработок и обводнений территорий в результате затопления шахт и погодных аномалий различной природы, на вероятность отказов и надежность работы трубопроводного транспорта. Приведены результаты исследований упрочнения почвы с использованием различных композиций на основе жидкого стекла. В отличающихся условиях внешних воздействий при изменении причин обводнения территории обоснована целесообразность применения разных композиций. Проанализировано влияние длительности эксплуатации трубопровода при транспортировке средств с различной коррозионной активностью на вероятность появления повреждений и надежность работы трубопроводного транспорта. Выполнен анализ эффективности использования трубопроводного транспорта при транспортировке тепла по трубопроводам различного диаметра.

**Ключевые слова:** трубопроводные коммуникации; тиксотропный эффект; коррозионная активность; длительность эксплуатации.



Высоцкий  
Сергей Павлович



Писаренко  
Анастасия Валериевна

Транспорт товаров и услуг является неотъемлемой частью существования современной цивилизации. Для транспорта высокореакционных энергоносителей (нефть и природный газ), некоторых химических соединений (аммиак) используется, в основном, трубопроводный транспорт. При доставке указанных товаров между континентами используется танкерный флот. По сравнению с такими видами транспорта как железно дорожный, автомобильный, авиационный трубопроводный отличается высокой надежностью и относительно низкой стоимостью.

Безальтернативным решением является трубопроводный транспорт горячей воды для систем отопления и, в некоторых случаях, для систем горячего водоснабжения теплоэлектростанций и теплофикационных котельных. Транспорт водоугольных суспензий автомагистральным трубопроводом стал привлекательной альтернативой другим видам транспорта, прежде всего, железнодорожному. В России был построен и находится в опытно-промышленной эксплуатации трубопровод для переноса водоугольного топлива (ВУТ) Белово-Новосибирск, годовой производительностью 3 млн. тонн угля на сухую массу. По указанному трубопроводу ВУТ транспортировалось от шахты Ильская в г. Белово на расстояние 260 км до ТЭЦ 5 г. Новосибирска.

Началом российского трубопроводного транспорта можно считать 1908 год, когда был сооружен нефтепровод, а в 1944 г. был сооружен трубопровод по транспортировке природного газа. Оба трубопровода находятся в эксплуатации до настоящего времени. Сеть трубопроводного транспорта покрывает огромные расстояния и составляет 230 тысяч километров, из них 143 тысячи километров – трубопроводы природного газа и 87 тысяч километров трубопроводов для транспортировки опасных жидкостей (нефть, газовый конденсат, нефтепродукты, жидкий аммиак и пр.). Трубопроводы проложены по территории с пересечением более 6000 рек [1].

Надежная, безопасная и эффективная эксплуатация трубопроводного транспорта является важным условием обеспечения не только стабильности и устойчивости работы отдельных регионов, но и экономики многих стран. Кроме этого в некоторых регионах возникают опасности при транспортировке такого безопасного продукта, как вода. Так, например, в Донецкой Народной Республике в районе г. Горловка подача воды в Донбасс осуществляется по каналу Северский Донец-Донбасс и на протяжении более 17 км проходит по трубопроводам большого диаметра. Трубопроводы проходят по территории, расположенной в местах подработок шахт. В отдельных местах просадка почвы под трубопроводами достигала 2,7 м. Нарушение или разрывы трубопровода или нескольких трубопроводов могут привести к тяжелым экологическим последствиям вследствие так называемого «эффекта домино».

Своевременный качественный анализ причин и последствий аварийных ситуаций, имеющих место при эксплуатации трубопроводных транспортных коммуникаций, может являться одним из методов предотвращения необратимых, сложных последствий.

Основные причины разрушения трубопроводов следующие: коррозия металла труб под напряжением, конструкционные дефекты, влияние природного воздействия,

неудовлетворительный анализ рисков, низкое качество менеджмента [2]. Статистика аварийных ситуаций на трубопроводах транспорта газа и нефти показывает, что причины нарушений следующие: внешняя коррозия и коррозия под напряжением – 31%, конструкционные дефекты и повреждения – 29%, повреждения от внешних воздействий – 23%, дефект материала трубопроводов – 12%, ошибки операторов – 5%.

Целью исследования является анализ причин повреждения трубопроводов и методов их устранения для снижения уровня технических и экологических рисков.

**ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА ИССЛЕДОВАНИЙ**

Вероятность отказов и надежность работы трубопроводного транспорта связана с разгерметизацией трубопровода и обусловлена локальными дефектами, имеющими внутренние причины – коррозионные повреждения, и внешние – механические воздействия различной природы. При транспортировке коррозионно-активных сред или сред, содержащих коррозионно-активные вещества (например, нефтепродукты или природный и попутный газ, содержащие соединения серы), вероятность появления неблагоприятных последствий (разрывов, свищей) может отличаться в несколько раз, а длительность безопасной эксплуатации отличается на порядки. На рис. 1 показана зависимость вероятности повреждения на ТП от длительности эксплуатации при транспорте различных сред, а на рис. 2 – зависимость надежности транспортных систем от длительности эксплуатации для идентичных условий [3].

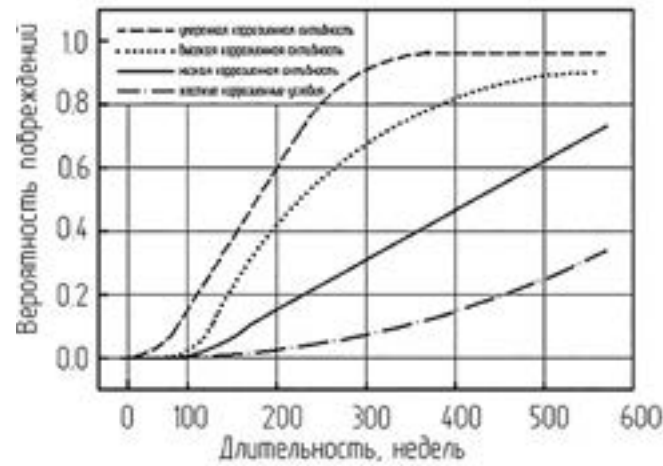


Рис. 1. Зависимость вероятности проявления повреждений от длительности эксплуатации при транспорте различных жидкостей

Стремление к экономии капитальных затрат, например, потоков горячей воды по теплотрассам, может служить причиной уменьшения внутреннего диаметра трубопроводов. При этом повышаются эксплуатационные затраты за счет увеличения перепада давления при транспортировке жидкостей. Зависимость величины перепада давления от количества транспортируемого тепла при разных диаметрах трубопроводов приведена на рис. 3. На рис. 4 приведена зависимость количества транспортируемого тепла от скорости среды в трубопроводе при разных диаметрах трубопроводов [4].

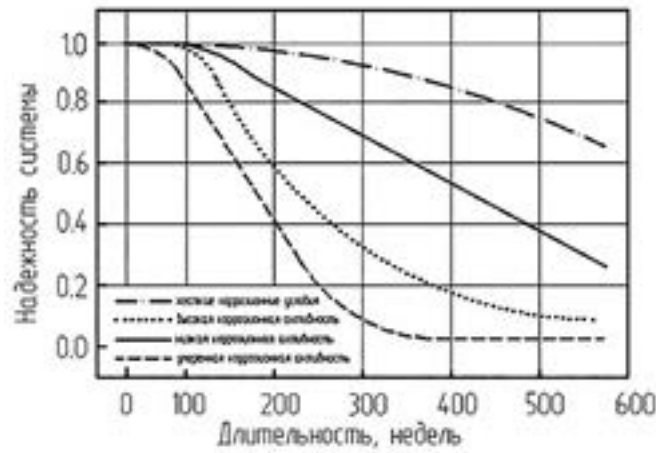


Рис. 2. Зависимость надежности транспортных систем от длительности эксплуатации при транспорте различных жидкостей

Приведенные данные показывают важность учета экономических и экологических факторов при проектировании и строительстве трубопроводных транспортных систем с оценкой перспективы развития данного региона.

Рассмотрение внешних воздействий особенно важно для нашего региона, т.к. их количество существенно

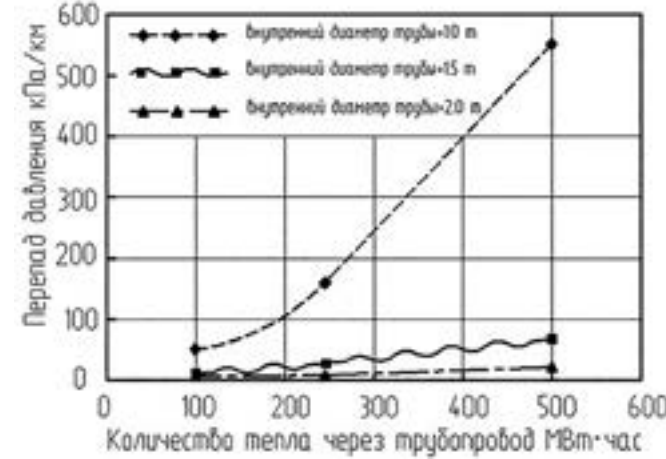


Рис. 3. Зависимость величины перепада давления от количества транспортируемого тепла при разных диаметрах трубопроводов

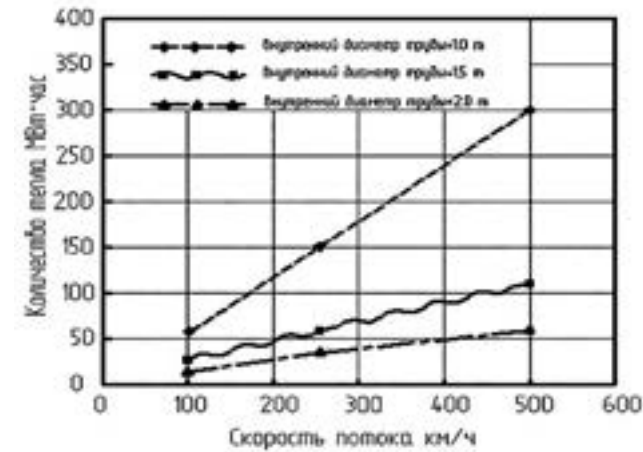


Рис. 4. Зависимость количества транспортируемого тепла от скорости среды в трубопроводе при разных диаметрах трубопроводов

превышает уровни в других странах. Одним из воздействий являются отмеченные ранее подработки территорий над полями шахтных выработок. Критическими параметрами являются уровни смещений трубопроводов, уровни сил, возникающих в сооружениях, или реакций на смещения, а также геометрические параметры воздействий. Авторы обработали экспериментальные данные, полученные в лабораторных условиях, в работе [5]. Полученные результаты показывают, что смещение грунта под воздействием ударной нагрузки описывается уравнением  $S = 68 \cdot L/V$ , мл, а усилия, возникающие при действии на трубопровод, уравнением  $N = 20 \cdot V/L$ , Н, где  $S$  – степень смещения почвы, мл;  $L$  – размер длинной стороны объекта, действующего на трубопровод, м;  $V$  – характерный размер почвы над трубопроводом, м (рис. 5).

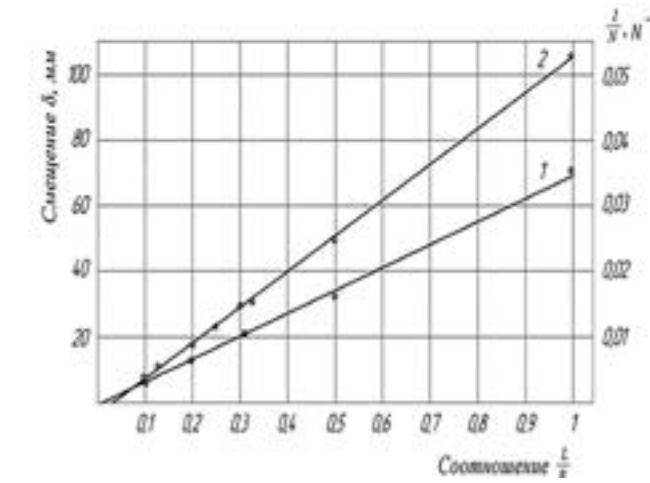


Рис. 5. Зависимость уровня воздействий на трубопровод в зависимости от соотношения L/V

В современных условиях происходит увеличение количества и длительности аномальных климатических явлений, что вызвало большое усиление последствий в результате развития во многих грунтах тиксотропных явлений. Неблагоприятные последствия их проявления усиливаются в результате развития во многих грунтах тиксотропных явлений, при которых резко изменяются структурно-текстурные свойства грунтов и их способность противостоять внешним воздействиям [6,7]. При этом изменяются прочностные характеристики оснований сооружений, что приводит к их деформациям и разрушениям. Деформации земной поверхности усиливаются также при наличии подработок в шахтерских городах и поселках. Такие явления имеют место на территории Донецкой, Луганской, Днепропетровской, частично Полтавской и Харьковской областей Украины; а также территории Ростовской области Российской Федерации, которые расположены в Донецком угольном бассейне. При добыче угля в пластах крутого падения на земной поверхности образуются вытянутые вдоль простирания пластов террасообразные уступы высотой до 60 см. В последнюю четверть прошлого века они стали причиной массового разрушения жилья, социальных объектов и инженерных коммуникаций городов Центрального Донбасса [8].

Влияние деформаций на трубопроводные коммуникации различного назначения приведено в табл. 1. На большей части территории Украины залегают лёссовые грунты (65% площади). Толщина лёссовых грунтов составляет от 3 до 35 м, а просадочность при давлении 0,3 МПа составляет от 0,01 до 0,15 м. В пределах Украины макропористые лёссовые грунты подсылаются глинистыми практически водонепроницаемыми грунтами,

поэтому образование водоносного слоя практически неизбежно. При малой остаточной влажности лёсс практически прочен, но с увеличением влажности лёсс склонен к просадкам. Все вышеперечисленные факторы приводят к снижению эксплуатационной надежности сооружений [9].

Деформация основания трубопроводных коммуникаций зависит от нагрузки «Р» на основание, а работа деформации определяется как  $A = P \cdot \Delta L$  путем интегрирования бесконечно малой величины работы при бесконечно малом нарастании сдвига dL с деформацией основания:

$$\int_0^A dA^+ = \int_0^{L_{разр}} \frac{1}{EF} P \cdot dlL, \quad (1)$$

в результате интегрирования получаем:

$$A = \frac{L_{разр}^2}{2} \frac{P}{EF} = \frac{L_{разр}^2}{2E} \cdot \sigma, \quad (2)$$

Таким образом, работа деформации пропорциональна произведению квадрата сдвиговой деформации на величину напряжения сдвига и обратно пропорциональна модулю упругости «Е».

По модели Ньютона касательное напряжение «τ», которое является наиболее опасным для строительных сооружений, равно относительной скорости сдвига «V» умноженной на вязкость среды при сдвиге «η»

$$\tau = \eta \cdot V \quad (3)$$

Из 3-го закона Ньютона для противодействия деформации необходимо повышать вязкость среды (в рассматриваемом случае – тиксотропной среды).

Из указанного уравнения следует, что увеличение вязкости суспензии обеспечивает повышение уровня сдвиговой деформации и соответственно увеличение устойчивости коммуникаций. Основным показателем устойчивости грунта от напряжения сдвига зависит от тиксотропных характеристик. Последние зависят также от типа воздействий на грунт: знакопеременные, частотные и т. д. Тиксотропные свойства грунтов проявляются в виде ползучести конструкции, например, при наличии вибрации в элементах конструкции при дрелировании потока жидкости или газа в местах наличия арматуры, сужения или расширения потока, а также значительного изменения направления потока. Подобные явления могут иметь место на газопроводах или нефтепроводах, а также на строительных сооружениях, размещенных на грунтах, подверженных тиксотропным воздействиям и расположенных вблизи потоков транспортных средств, которые создают вибрации в элементах конструкций.

Применение химических способов улучшения строительных свойств грунтов показало их эффективность при реконструкции коммуникаций либо усилении фундаментов существующих сооружений. Это в значительной степени объясняется тем, что дает возможность проводить работы без прекращения эксплуатации здания. Подавляющее большинство рецептов силикатизации грунтов были основаны на использовании неорганического полимера – силиката натрия [9]. Это обусловлено относительной дешевизной указанного химического соединения, а также возможностью регулирования его физико-химических характеристик. На рис. 1 показано влияние модуля жидкого стекла на плотность его раствора и вязкость. Кроме модуля вязкость растворов зависит от молекулярной массы. Последняя зависит от вида активации растворов.

Таблица 1.

Влияние деформаций на объекты различного назначения

Объект воздействия	Чувствительность разных объектов к отдельным видам деформации земной поверхности				
	Просадка	Уклон	Уступы	Растяжение	Сжатие
Магистральные трубопроводы			Б	С	С
Водопроводные сети			Б	С	С
Линии канализации	Б		Б	С	С
Газопроводы	М		Б	С	С
Подземные кабели			Б	М	С

Примечание: М – малая, С – средняя, Б – большая.

Следует отметить, что силикатизация может обеспечить положительный эффект только после активации жидкого стекла и получения геля кремниевой кислоты. Этот процесс может быть реализован за счет реакции гидросиликата Na с гидрокарбонатной щелочностью воды. При отсутствии последней положительного эффекта не будет наблюдаться или будет минимальный.

Согласно Флори, характеристическая вязкость зависит от размеров макромолекулярного клубка:

$$\eta = \Phi_0 (\bar{h}^2)^{3/2} / M, \quad (4)$$

где  $\Phi_0$  – константа Флори, Па·с·г/(моль·м);  $\bar{h}^2$  – 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  $(\bar{h}^2)^{3/2} / M$  за счет уменьшения молярной массы полимера для малых значений модуля жидкого стекла.

Эффективность использования закрепления грунта обычно проверяют пенетрометром – коническим грузом, погружаемым на определенную глубину под действием собственного веса. Однако этот процесс происходит в статических условиях. На практике при обводнении почвы процесс изменения физико-химических характеристик грунта происходит в динамических условиях, при этом возникает тиксотропный эффект.

Нами разработана установка, позволяющая оценить изменение тиксотропных характеристик грунта в зависимости от его типа, нагрузки и характеристик закрепляющего раствора [11].

На опытном образце установки проведены эксперименты по определению сдвиговой деформации при закреплении обводненного грунта растворами кремниевой кислоты, а также растворами кремниевой кислоты с добавлением анионоактивного полиакриламида Есофлос [12]. 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 SiO<sub>2</sub>, тем больше напряжение сдвига (рис. 6).

Наименьшее сопротивление оказывали частицы в водонасыщенном состоянии, затем закрепленные жидким

стеклом. Наиболее эффективным был грунт с массовой долей 1 и 2% SiO<sub>2</sub>. Проникающая способность раствора с присадкой полиакриламида оказалась значительно выше по сравнению с раствором гидросиликата Na.

В 40-е годы XX в. было замечено, что некоторые полимеры (полиэтиленоксид, полиакриламид, полиакриловая кислота и др.) в водных растворах проявляют необычные свойства, в частности, способность к комплексообразованию со многими неорганическими и органическими веществами; осаждение из водных растворов твердых примесей; снижение гидравлического сопротивления прокачиваемой жидкости; снижение турбулентности течения жидкости в трубах; усиление потока течения воды в трубах и пожарных шлангах и др.

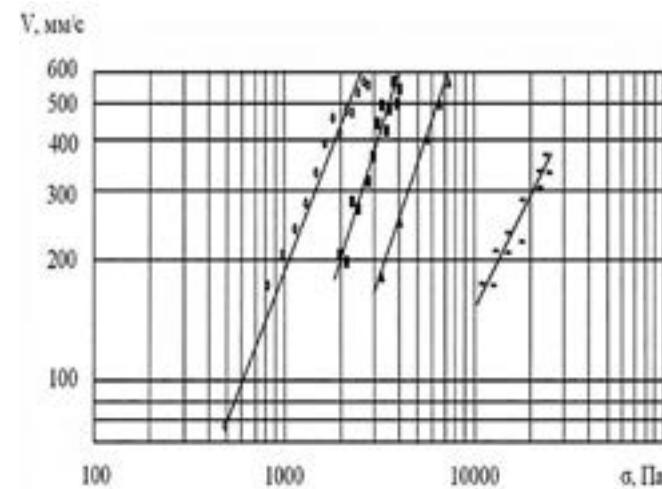


Рис. 6. График зависимости скорости от напряжения сдвига при различных закрепляющих составах в грунте при 50%-м соотношении грунт-раствор:  
 — — 3% SiO<sub>2</sub>; ▲ — 2% SiO<sub>2</sub>; ■ — 1% SiO<sub>2</sub>; ● — 0,5% SiO<sub>2</sub>

В экспериментальных условиях установлено, что в зависимости от направления поступления воды снизу вверх (при подтоплении шахтными водами) или сверху вниз (при паводках) целесообразно изменять рецептуру закрепляющих растворов. В первом случае рационально применять так называемый силоксановый экран из активированной кремнекислоты, а во втором – использовать эффект Томса для снижения тиксотропного эффекта.

**ВЫВОДЫ**

Выполнен анализ внутренних причин – состава транспортируемой среды, и внешних причин – механических воздействий различной природы, на вероятность отказов

и надежность работы трубопроводного транспорта. Приведены результаты исследований упрочнения почвы с использованием различных композиций на основе жидкого стекла. В отличающихся условиях внешних воздействий при изменении причин обводнения территории обоснована целесообразность применения разных композиций.

Эксплуатационная надежность трубопроводов зависит от тиксотропного эффекта. Применение своевременного закрепления грунтового массива может минимизировать или полностью предотвратить негативное влияние тиксотропного эффекта на трубопроводные коммуникации.

Раствор активной кремниевой кислоты с полиакриламидом наиболее эффективен с массовой долей 2% SiO<sub>2</sub> и может применяться для обеспечения эксплуатационной надежности и повышения несущей способности оснований зданий. Следовательно, рационально применять раствор активной кремниевой кислоты с полиакриламидом с массовой долей SiO<sub>2</sub> 2%. При увеличении в растворе массовой доли полиакриламида в грунте эффект Томса на грани сред способствует отводу грунтовых вод от укрепленного массива, что обеспечивает дополнительное усиление просадочного грунта.

Проанализировано влияние длительности эксплуатации трубопровода при транспортировке жидкостей с различной коррозионной активностью на вероятность появления повреждений и надежность работы трубопроводного транспорта. Выполнен анализ эффективности использования трубопроводного транспорта при транспортировке тепла по трубопроводам различного диаметра.

**Литература**

1. RUSANOVA, G. V. 1997. Evolution of human-affected soils along a gas pipeline in the Northern Urals. In Eurasian Soil Science C/C of Pochvovedenie, vol. 30, no. 7, pp. 889–897.
2. SZYPLAKY, D. – VASZI, Z. – VARGA, A. 2013. Effect of temperature on the properties of siloxane-based grouts. J. Appl. Polym. Sci. 108: 132–139.
3. Chinedu Ossai. A Data-Driven Machine Learning Approach for Corrosion Risk Assessment—A Comparative Study // School of Information Technology & Mathematical Sciences, University

of South Australia, Mawson Lakes Campus, GPO Box 2471 Adelaide, SA 5001, Australia-Big Data Cogn. Comput. 2019, 3(2), pp. 28-43.

4. Zhaolin Wang. Water Splitting Technologies for Hydrogen Cogeneration from Nuclear Energy // Nuclear Power – Deployment, Operation and Sustainability - Vol. 233, pp. 355-362.
5. Dong-ManRyu. Lab-scale impact test to investigate the pipe-soil interaction and comparative study to evaluate structural responses // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. – July 2015, Volume 7, Issue 4, Pages 720-738.
6. Belvederesi C. University of Calgary; Calgary, AB: 2017. Statistical Analysis of Oil and Gas Pipeline Accidents with a Focus on the Relationship between Pipeline Design and Accident Consequences. [Google Scholar].
7. Pipeline Hazardous Material Safety Administration. 2017. Petroleum Pipeline Systems. <https://primis.phmsa.dot.gov/comm/PetroleumPipelineSystems.htm?nocache=4446> Available from. [Google Scholar].
8. Завьялов, В. В. Проблемы эксплуатационной надежности трубопроводов на поздней стадии разработки месторождений. – М.: ОАО «ВНИИО-ЭНГ», 2005. 332 с.
9. Karol, R. H. Chemical Grouting and Soil Stabilization. N.-Y.: Dekker, 2003. 584 p.
10. Мишурова, Т. В. Закрепление песчаных оснований, загрязненных фосфорнокислыми проточками, в условиях действующего производства: Дисс. канд. техн. наук: 05.23.02. – Днепропетровск, 2001. – 171 с.
11. Пат. № 114230 Украина МПК G01N 3/24. Установка для дослідження тиксотропних характеристик ґрунтів [Текст] / С. П. Высоцкий, А. В. Писаренко; заявитель и патентообладатель С. П. Высоцкий, А. В. Писаренко; заявл. 04.05.2016; опубл. 10.03.2017, Бюл. № 5. – 10 с.
12. Писаренко, А. В. Анализ свойств закрепляющего раствора на основе активной кремниевой кислоты и полиакриламида для усиления просадочных грунтов [Электронный ресурс] / А. В. Писаренко, В. И. Братчун // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – Макеевка: ДОНАСА, 2017. – Вып. 2017-2(124) – С. 154-160. Режим доступа : [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).