Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian journal of transport engineering <http://t-s.today/>

2015, Том 2, №3 / 2015, Vol 2, No 3 <http://t-s.today/issues/vol2-no3.html>

URL статьи: <http://t-s.today/PDF/01TS315.pdf>

DOI: 10.15862/01TS315 (<http://dx.doi.org/10.15862/01TS315>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Муравьева Л.В., Баширзаде С.Р. Поведение подземных трубопроводов, проложенных в водонасыщенных грунтах // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», Том 2, №3 (2015)

<http://t-s.today/PDF/01TS315.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

For citation:

Muravieva L.V., Bashirzade S.R. [Behaviour underground pipelines laid in saturated soil] Russian journal of transport engineering, 2015, Vol. 2, no. 3. Available at: <http://t-s.today/PDF/01TS315.pdf> (In Russ.)

УДК 539.4

Муравьева Людмила Викторовна¹

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет», Россия, Санкт-Петербург
Профессор кафедры «Водохозяйственное и гидротехническое строительство»

Доктор технических наук
E-mail: rfludmia@yandex.ru

Баширзаде Самир Рафаил оглы

ФГБОУ ВПО «Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина», Россия, Москва
Студент 5-ого курса спец. «Сооружение и ремонт газонефтепроводов и хранилищ»

E-mail: s.bashirzade2010@yandex.ru

Поведение подземных трубопроводов, проложенных в водонасыщенных грунтах

Аннотация. В работе отмечаются проблемы надежной и бесперебойной работы трубопроводов, их поведение под воздействием эксплуатационных нагрузок в водонасыщенных грунтах. Затронуты некоторые аспекты теории водонасыщенных оснований. Эта теория учитывает взаимодействие твердой и жидкой фаз в пористо упругой насыщенной жидкостью двухфазной среде. По степени связности между твердой и жидкой фазами грунта рассматриваются предельные случаи водонасыщенной среды. Среда "без связи" является первым предельным случаем, в которой жидкость свободно циркулирует между зернами твердой фазы (маловлажные пески, песчаники). Вариант "совершенная связь" - второй предельный случай, проявляется в том, что жидкость не может циркулировать в замкнутых порах (глины) и выдавливается из них при действии внутренних напряжений. Когда трубопровод заглублен в водонасыщенные пески (русло реки, морское дно), то в такой ситуации грунт, окружающий трубопровод может переходить в жидкое состояние под воздействием сейсмических колебаний. В данном случае, возможны перемещения трубопровода в горизонтальном направлении от действия масс грунта, а также под действием выталкивающей силы его всплытие, особенно когда на трубопровод действует сжимающая нагрузка. Сжимающая сила в трубопроводе возникает также в результате температурного воздействия транспортируемого продукта и ограничений по трассе трубопровода против продольного расширения. Выведены расчетные формулы, предназначенные для нахождения необходимых критериев для надежной работы трубопровода. Величина напряжений в трубопроводе зависит от ширины водонасыщенной зоны.

¹ 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, ФГБОУ ВПО СГТУ имени Гагарина Ю.А., кафедра «Транспортное строительство»

Ключевые слова: подземный трубопровод; водонасыщенный грунт; сейсмические колебания; разжижение грунта

Проблеме оценки надежности и моделирования трубопроводов посвящено довольно большое количество работ. Можно отметить публикации [1-9], в которых рассмотрено поведение, работоспособность трубопроводов, в грунте без учета его водонасыщения. Но весьма большой интерес представляет поведение трубопровода в водонасыщенных грунтах.

Обычно водонасыщенные грунты расположены ниже трубопровода. Однако, при землетрясении в г. Ниагата (Япония) газопровод диаметром 150 мм был поднят из земли под действием сочетания выталкивающей и сжимающей сил возникших от деформаций грунта при сейсмических воздействиях. Сжимающая сила в трубопроводе возникает также в результате температурного воздействия транспортируемого продукта и ограничений по трассе трубопровода против продольного расширения.

При рассмотрении протяженных энергетических сооружений, в особенности, следует учитывать, что грунты основания могут быть водонасыщенными. Теория водонасыщенных оснований развита Био [10]. Эта теория учитывает взаимодействие твердой и жидкой фаз в пористоупругой насыщенной жидкостью двухфазной среде. Но она достаточно сложна и применяется при решении специальных проблем. По степени связности между твердой и жидкой фазами грунта рассматриваются предельные случаи водонасыщенной среды, приведенные ниже.

Среда "без связи" является первым предельным случаем, в которой жидкость свободно циркулирует между зернами твердой фазы (маловлажные пески, песчаники). Вариант "совершенная связь" - второй предельный случай, проявляется в том, что жидкость не может циркулировать в замкнутых порах (глины) и выдавливается из них при действии внутренних напряжений.

Значение безразмерной константы является критерием перехода к предельным случаям:

$$B = \frac{e^2}{1-e} \times \frac{\rho_f}{\rho_s} \times \frac{Ag}{K_\phi V_s}, \quad (1)$$

где: e - пористость, ρ_f и ρ_s - плотность жидкой и твердой фаз, A - полуширина фундамента, K_ϕ - коэффициент фильтрации, V_s - скорость распространения поперечной волны в грунте, g - ускорение свободного падения. Константа B для несвязанной среды стремится к нулю, для связанной среды стремится - к бесконечности. При этом основными характеристиками, влияющими на критерий B , является коэффициент Пуассона и скорости распространения продольной и поперечной волн V_p и V_s в грунтах.

Скорости распространения волн, для несвязанной среды, вычисляются по формулам:

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho_1}}; \quad V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho_1}}; \quad \rho_1 = (1-e)\rho_s, \quad (2)$$

где: λ и μ — параметры Ляме.

Для среды с совершенной связью:

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu + \alpha^2 M}{\rho}}; \quad V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}; \quad \rho_1 = (1 - e)\rho_s + e\rho_f, \quad (3)$$

$$\alpha = 1 - K_g K_s, \quad M = K_f / e, \quad K_g = \lambda + 2/3\mu.$$

Здесь K_s и K_f — модули сжимаемости твердой и жидкой фаз водонасыщенных грунтов.

В указанных предельных случаях, расчеты выполняются как для упругой среды со следующими значениями упругих параметров: коэффициент Пуассона ν , модуль упругости E .

Перемещения трубопровода в горизонтальном направлении

В случае, когда трубопровод окружен водонасыщенным грунтом, он может смещаться в поперечном направлении от действия грунтовых масс.

При моделировании трубопровода в водонасыщенном следует обратить внимание на то, что трубопроводы очень чувствительны к жесткости пружин моделирующих работу грунта. Проведенные тесты показали что жесткость связана с эффективными напряжениями в водонасыщенном грунте. То есть, пружина моделирующая работу грунта - увеличивающаяся функция эффективного напряжения и следовательно, убывающая функция давления в поровой воде.

Для водонасыщенного песчаного грунта Т. О'Рурк (1994) предложил [11] коэффициент уменьшения, R_f , при поперечном движении грунта для трубопровода:

$$R_f = \frac{N_{qh}}{K_c} \cdot \frac{1}{0.0055 (N_l)_{60}} \quad (4)$$

где: K_c - коэффициент несущей способности для влажного грунта и $(N_l)_{60}$ - корректировочный коэффициент.

Уменьшение жесткости взаимодействия труба-грунт получается делением жесткости твердого грунта на уменьшающий коэффициент.

В методе описанном выше водонасыщенный грунт рассматривают как относительно мягкое тело. Водонасыщенный грунт можно рассматривать как вязкую жидкость. Для данной модели сила взаимодействия труба-грунт изменяется с относительной скоростью между трубопроводом и окружающим грунтом. Соответственно поперечная сила прикладывается на единицу длины трубопровода:

$$F = \frac{4\pi\eta V}{2.002 - \log R_e} \quad (5)$$

где: η - коэффициент вязкости водонасыщенного грунта, V - скорость движения водонасыщенного грунта относительно трубопровода, $R_e = \rho V D / \eta$ - число Рейнольдса и ρ - плотность водонасыщенного грунта. В методике имеется несколько вопросов связанных с определением скорости движения водонасыщенного грунта, а также ситуация при прекращении движения потока ($V=0$).

В данном случае можно применить расчетную схему подземного трубопровода окруженного водонасыщенным грунтом, где наличие водонасыщенного грунта моделируется пружинами по предположению о том, что коэффициент жесткости пружины (K_l) моделирующей грунт в поперечном направлении для водонасыщенного грунта является некоторой долей от соответствующего значения данного коэффициента для маловлажного

ненарушенного грунта (K_2). Как отмечено в работах японского исследователя Такады (1987г.) данное соотношение может находиться в пределах от 1/1000 до 1/3000 для маловлажного грунта, другие исследователи предлагают что отношение в пределах 1/100 до 5/100. Поэтому, гораздо менее вероятно повреждение трубопровода в водонасыщенном грунте. Однако, при проектировании кажется разумно принять, что трубопровод, при воздействии пространственно распределенной поперечной деформации грунта расположен в маловлажном грунте который расположен под слоем водонасыщенного грунта.

Перемещения трубопровода в вертикальном направлении

Если грунт в котором проходит подземный трубопровод насыщен водой, то может произойти всплытие трубопровода под действием выталкивающей силы. Был проведен ряд исследований данной реакции, так Йен и Янг в 1985 г. провели серию опытов и проанализировали отклик трубопровода на сейсмическое воздействие с учетом выталкивающей силы воды. По результатам исследований было установлено, что смещение при динамическом воздействии является относительно маленькими (менее 20% от перемещения от действия выталкивающей силы в условия статического нагружения).

Выталкивающая сила P_{uplift} действующая на трубопровод в пределах водонасыщенной зоны может быть определена, как:

$$P_{uplift} = \frac{1}{4} \pi D^2 (\gamma_{soil} - \gamma_{contents}) - \pi D t \gamma_{pipe} \quad (6)$$

где: γ_{soil} , γ_{pipe} , $\gamma_{contents}$ - соответственно удельный вес водонасыщенного грунта, труб и заполнения трубопровода (транспортируемого «продукта» - газ, вода и т.д.). Трубопровод за пределами водонасыщенной зоны находится в грунте с меньшей влажностью. Следовательно, расчетная схема трубопровода в данном случае может быть представлена в виде балки, закрепленной по краям водонасыщенной зоны [11], нагруженной равномерно распределенной нагрузкой направленной вверх. Максимальное напряжение в стальной трубе в зависимости от длины водонасыщенной зоны представлены на рис. 1, при $\gamma_{soil} = 2.0 \times 10^4 \text{ Н/м}^3$, $\gamma_{contents} = 0.8 \times 10^4 \text{ Н/м}^3$ и $t = 0.0079 \text{ м}$ для трех значений диаметров труб. Заметим, что начальное напряжение ($\sigma_{initial} = 180 \text{ МПа}$) возникает от действия внутреннего рабочего давления и температуры.

Рисунок 1. Изменение напряжений в стальном трубопроводе в зависимости от длины водонасыщенной зоны (рисунок авторов)

Figure 1. Stress changes in the steel depending on length of water-saturated zone (photo of author).

Максимальные напряжения в трубе возникают в центральной части водонасыщенной зоны W_{cr} . Если ширина меньше чем W_{cr} , то напряжение трубы - возрастающая функция от ширины, в то время как напряжение трубы уменьшается с увеличивающейся шириной. Критическая ширина определяется по соотношению:

$$W_{cr} = \sqrt[4]{\frac{3\pi^3 E t H_c D^3}{P_u}} \quad (7)$$

где: H_c - глубина засыпки над верхней образующей трубы.

При $H_c = 1.2$ м, $D = 0.61$ м и $P_u = 1.0 \times 10^4$ Н/м критическая ширина водонасыщенной зоны составляет 47 м.

Следует отметить, что для задания упругопластических свойств среды используются уравнения состояния грунтов, данные о их свойствах полученные экспериментальным путем. Но в отдельных случаях модели грунтов могут быть достаточно сложными, например если необходимо учесть изменение упругопластических свойств грунтов в зависимости от степени их влажности (на обводненных участках, в виду сезонных изменений свойств грунта).

При построении объемной КЭ модели используются пространственные элементы разной формы – параллелепипеда, тетраэдра, трехгранной призмы. Основными характеристиками при моделировании грунта объемными конечными элементами являются коэффициент Пуассона и модуль деформации. Коэффициент Пуассона слабых водонасыщенных грунтов примерно равен 0,5 и уменьшается с увеличением жесткости грунта.

Например, коэффициент Пуассона соотносится со скоростями сдвиговой V_s и продольных V_p волн согласно формулам [12]:

$$\nu = \frac{1}{2} \frac{(V_p/V_s)^2 - 2}{(V_p/V_s)^2 - 1}, \quad (8)$$

Ограничение для продольных смещений трубопровода в грунтовом массиве определяется по соотношению:

$$\max u_T = \frac{u_0}{1 + \left(\frac{2\pi}{\lambda_{np} T c_p} \right)^2} \quad (9)$$

где u_0 – максимальная амплитуда смещения частиц грунта в массиве, λ_{np} - длина волны, соответствующего типа, c_p - скорости распространения сейсмической волны вдоль продольной оси трубопровода, T – период колебаний частиц грунта.

Продольное перемещение трубопровода в водонасыщенном грунте при совместном действии эксплуатационных нагрузок и сейсмического воздействия составляет $U_y = 3.7$ см, $U_x = 8.3$ см.

Деформации сдвига в грунтовом массиве могут быть оценены на основании соотношения:

$$\frac{y_s}{h} \approx 0.08 \frac{H}{c_s^2} \quad (10)$$

где u_s – горизонтальное смещение частиц грунта при высоте h над коренными породами, H – толщина слоя грунта.

Вертикальное перемещение трубопровода в водонасыщенном грунте при совместном действии эксплуатационных нагрузок и сейсмического воздействия составляет $U_z = 10.4$ см.

Исследования напряженно-деформированного состояния выполнялись для подземного магистрального газопровода диаметром 1220 мм, с рабочим давлением 5,2 МПа. Трубопровод проложен в траншее. В его основании лежат пылеватые твердые глины, грунт обратной засыпки – песок с плотностью $\rho = 2100$ кг/м³. Максимальное напряжение составляет ($\sigma_y = 269,4$ МПа).

Так как максимальное напряжение - меньше чем критическое напряжение при растяжении, трубопровод вряд ли будет разрушен из-за выталкивающей силы, хотя возможны значительные деформации, когда ширина водонасыщенной зоны будет больше.

ЛИТЕРАТУРА

1. Муравьева Л.В., Овчинников И.Г., Пшеничкина В.А. Оценка надежности трубопроводной конструкции с эксплуатационными повреждениями. - Саратов: СГТУ, 2004.
2. Zhang S., Zhou W. An efficient methodology for the reliability analysis of corroding pipelines. - Journal of Pressure Vessel Technology: Ontario, 2014.
3. Qin H., Zhang S., Zhou W. Inverse Gaussian process-based corrosion growth modeling and its application in the reliability analysis for energy pipelines. - Frontiers of Structural and Civil Engineering, China, 2013.
4. Пономарева М.А., Овчинников И.Г. Оценка напряженного состояния магистрального трубопровода при неполной информации о ряде параметров расчетной схемы // Интернет-журнал «Науковедение» 2012, №4, <http://naukovedenie.ru/PDF/9tvn412.pdf>. - М. с. 1 - 9.
5. Бородавкин П.П. Подземные магистральные трубопроводы. - Москва: изд. Энерджи-Пресс.-2011.
6. Брагов А.М., Ломунов А.К., Деменко П.В. Исследование физико-механических свойств мягких грунтов при ударе // Труды НГГУ. – Н. Новгород: ННГУ, 2005.
7. Коровкин В.Н., Липский В.К., Шароглазова Г.А., Соловьев А.Н., Ялтыхов В.В. Геологические условия возникновения аварийности на магистральных трубопроводах // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. №1 (28), 2008.
8. ASME B31.8 Gas Transmission & Distribution Piping Systems. - New York: The American society of mechanical engineers, 2012.
9. Arya A.K., Shingan B., Ch. Vara Prasad. Seismic design of continuous buried pipeline // International Journal of Engineering and Science. – V.1 Issue 1, 2008.
10. В.М. Сеймов, А.Н. Трофимчук, О.А. Савицкий Колебания и волны в слоистых средах. – Киев: Наукова думка, 1990.
11. M.J. O'Rourke, X. Liu Responce of buried pipeekines subject to earthquake effects.- MCEER: Buffalo, 1999.
12. К. Ишихара Поведение грунтов при землетрясениях.- Санкт-Петербург: НПО «Геореконструкция-Фундаментпроект», 2006.

Muravieva Liudmila Victorovna

Saint Peterburg state polytechnic university, Russia, Saint-Petersburg
E-mail: rfludmia@yandex.ru

Bashirzade Samir Rafail ogly

Gubkin Russian State Oil and Gas University, Russia, Moscow
E-mail: s.bashirzade2010@yandex.ru

Behaviour underground pipelines laid in saturated soil

Abstract. The work marked the problems of reliable and uninterrupted operation of the pipelines, their behavior under the influence of operational loads in water-saturated soils. Affected some aspects of the theory of water-saturated grounds. This theory takes into account the interaction of the solid and liquid phases in porous elastic saturated liquid two-phase medium. On the degree of connectivity between the solid and liquid phases of the soil are considered the limiting cases of water-saturated environment. Medium "without regard" is the first limit case, in which the fluid circulates freely between the grains of the solid phase (slightly wet sands, sandstones). Option "perfect bond" - is the second limiting case, is that the liquid can circulate in closed pores (clay) and is squeezed out of them under the action of internal stresses. When the pipeline buried in water saturated sand (riverbed, seabed), in such a situation, the soil surrounding the pipeline may become liquid under the effect of seismic vibrations. In this case, the possible displacement of the pipeline in the horizontal direction from the action of masses of soil and under the action of the buoyancy force of his ascent, especially when the pipeline operates at a compressive load. The compressive force in the pipeline also occurs as a result of thermal exposure of product to be conveyed and restrictions along the pipeline against longitudinal expansion. Derived formulas intended for finding necessary criteria for reliable operation of the pipeline. The magnitude of the stresses in the pipeline depends on the width of the water-saturated zone.

Keywords: buried pipe; saturated soil; seismic shaking; liquefied soil

REFERENCES

1. Murav'eva L.V., Ovchinnikov I.G., Pshenichkina V.A. Otsenka nadezhnosti truboprovodnoy konstruktsii s ekspluatatsionnymi povrezhdeniyami. - Saratov: SGTU, 2004.
2. Zhang S., Zhou W. An efficient methodology for the reliability analysis of corroding pipelines. - Journal of Pressure Vessel Technology: Ontario, 2014.
3. Qin H., Zhang S., Zhou W. Inverse Gaussian process-based corrosion growth modeling and its application in the reliability analysis for energy pipelines. - Frontiers of Structural and Civil Engineering, China, 2013.
4. Ponomareva M.A., Ovchinnikov I.G. Otsenka napryazhennogo sostoyaniya magistral'nogo truboprovoda pri nepolnoy informatsii o ryade parametrov raschetnoy skhemy // Internet-zhurnal «Naukovedenie» 2012, №4, <http://naukovedenie.ru/PDF/9tvn412.pdf>. - M. s. 1 - 9.
5. Borodavkin P.P. Podzemnye magistral'nye truboprovody. - Moskva: izd. Enerdzhipress.-2011.
6. Bragov A.M., Lomunov A.K., Demenko P.V. Issledovanie fiziko-mekhanicheskikh svoystv myagkikh gruntov pri udare // Trudy NGGU. – N. Novgorod: NNGU, 2005.
7. Korovkin V.N., Lipskiy V.K., Sharoglazova G.A., Solov'ev A.N., Yaltykhov V.V. Geologicheskie usloviya vozniknoveniya avariynosti na magistral'nykh truboprovodakh // Avtomatizirovannyye tekhnologii izyskaniy i proektirovaniya. №1 (28), 2008.
8. ASME B31.8 Gas Transmission & Distribution Piping Systems. - New York: The American society of mechanical engineers, 2012.
9. Arya A.K., Shingan B., Ch. Vara Prasad. Seismic design of continuous buried pipeline // International Journal of Engineering and Science. – V.1 Issue 1, 2008.
10. V.M. Seymov, A.N. Trofimchuk, O.A. Savitskiy Kolebaniya i volny v sloistyykh sredakh. – Kiev: Naukova dumka, 1990.
11. M.J. O'Rourke, X. Liu Responce of buried pipekines subject to earthquake effects.- MCEER: Buffalo, 1999.
12. K. Ishikhara Povedenie gruntov pri zemletryasenyakh.- Sankt-Peterburg: NPO «Georekonstruktsiya-Fundamentproekt», 2006.