

Received: 31.10.2025

Revised: 01.12.2025



Accepted: 05.12.2025



DOI: 10.17804/2410-9908.2025.6.080-089

MODELING OF THE DEFORMED STATE OF UNDERGROUND MAIN PIPELINES MADE OF PE 80

G. N. Gusev^{a,*} and R. V. Tsvetkov^b

*Institute of Continuous Media Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
1 Akademika Koroleva St., Perm, 614013, Russia*

^a  <https://orcid.org/0000-0002-9072-0030>  gusev.g@icmm.ru;

^b  <https://orcid.org/0000-0001-9617-407X>  flower@icmm.ru

*Corresponding author. Email: gusev.g@icmm.ru

Address for correspondence: ul. Ak. Koroleva, 1, Perm, 614013, Russia

Tel.: +7 (342) 237-8384; fax: +7 (342) 237-8487

The development of underground layers of minerals induces significant deformations in the subsurface soil layer, thus causing surface subsidence troughs. The displacement zones can reach several kilometers and significantly affect the strained state of underground pipelines. In this regard, the assessment of the strained state of such pipelines is a technically difficult task. Long pipelines experience a complex strained state due to large diameters, high pressure, as well as the variability of the properties of the pipe material and soil. Based on the results of finite element simulation, an assessment of the deformations of the soil mass, which lead to a loss of the bearing capacity of various underground main pipelines, is made. Calculations are performed for a number of basic structural materials and operating conditions.

Keywords: mined soil mass, subsidence trough, deformed state, underground pipeline, ultimate strains, finite element model, monitoring

Acknowledgment

The research was performed under the state assignment, theme registration number 124020700047-3.

References

1. Borodavkin, P.P. A pipe-soil model designed to evaluate longitudinal pipeline displacements. *Stroitelstvo Truboprovodov*, 1977, 5, 24–25. (In Russian).
2. Yavarov, A.V., Kolosova, G.S., and Kuroedov, V.V. Stress-strain state of buried pipelines. *Stroitelstvo Unikalnykh Zdaniy i Sooruzheniy*, 2013, 1 (6), 1–10. (In Russian). DOI: 10.18720/CUBS.6.1.
3. Fayzullina, E.V. and Bitaeva, M.V. On the impact of subsidence on structures. *Vestnik Molodogo Uchenogo UGNTU*, 2022, 2 (18), 4–11. (In Russian).
4. Ravet, F. Transport infrastructure geohazard risk monitoring with optical fiber distributed sensors: experience with Andean and Arctic pipelines. In: *FMGM 2018 Conference*, Rio de Janeiro, Brazil, July 16–19, 2018: 10th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics.
5. Rai, A., Ahmad, Z., Hasan, M.J., and Kim, J.-M. A novel pipeline leak detection technique based on acoustic emission features and two-sample Kolmogorov–Smirnov test. *Sensors*, 2021, 21, 8247. DOI: 10.3390/s21248247.
6. Bazaluk, O., Kuchyn, O., Saik, P., Soltabayeva, S., Brui, H., Lozynskyi, V., and Cherniaiev, O. Impact of ground surface subsidence caused by underground coal mining on natural gas pipeline. *Scientific Reports*, 2023, 13, 19327. DOI: 10.1038/s41598-023-46814-5.

7. Han, J., Ma, Z., Sun, J., Gong, P., Yan, P., Cai, C., Xu, M., and She, T. Movement of overlying strata and mechanical responses of shallow buried gas pipelines in coal mining areas. *Applied Sciences*, 2025, 15, 622. DOI: 10.3390/app15020622.
8. Malinowska, A., Cui, X., Salmi, E.F., and Hejmanowski, R. A novel fuzzy approach to gas pipeline risk assessment under influence of ground movement. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2022, 9, 47. DOI: 10.1007/s40789-022-00511-2.
9. Zhou, Y., Teng, Z., Chi, L., and Liu, X. Buried pipeline collapse dynamic evolution processes and their settlement prediction based on PSO–LSTM. *Applied Sciences*, 2024, 14 (1), 393. DOI: 10.3390/app14010393.
10. Grygierek, M. and Kalisz, P. Influence of mining operations on road pavement and sewer system – selected case studies. *Journal of Sustainable Mining*, 2018, 17 (2), 56–67. DOI: 10.1016/j.jsm.2018.04.001.
11. Kalisz, P. and Zięba, M. Impact of mining exploitation on pipelines. *Acta Montanistica Slovaca*, 2014, 19 (3), 111–117.
12. Zhao, B., Zhang, H., Wang, Y., Zhou, Y., and Zhang, J. Mechanical behavior of gas-transmission pipeline in a goaf. *Processes*, 2023, 11 (4), 1022. DOI: 10.3390/pr11041022.
13. Shoshiashvili, M.E., Shoshiashvili, I.S., and Marov, S.Yu. A model of the stressed-deformed state of a pipeline using the displacement method for mechatronic construction complexes main pipelines. *Izvestiya Vysshykh Uchebnykh Zavedeniy. Severo-Kavkazskiy Region. Tekhnicheskie Nauki*, 2024, 2 (222), 53–59. (In Russian). DOI: 10.17213/1560-3644-2024-2-53-59.
14. Available at: <https://primis.phmsa.dot.gov/matrix/FilGet.rdm?fil=4507>
15. Zlobin, V.D. and Glushko, N.A. Remote monitoring of leaks on the main pipeline. *Voprosy Ustoychivogo Razvitiya Obshchestva*, 2020, 10, 643–648.
16. Kazarinov, Yu.I. Factors affecting the operational reliability of main pipelines during the transportation of gas and oil. *Components of Scientific and Technological Progress*, 2021, 12 (66), 6–9.
17. Guidelines for permissible undermining of operated buildings and structures at the Verkhnekamsk potash deposit, VNIIG Publ., Saint Petersburg, 2004, 46 p. (In Russian).



Подана в журнал: 31.10.2025



УДК 004.942, 69.04

DOI: 10.17804/2410-9908.2025.6.080-089

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОДЗЕМНЫХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ИЗ ПОЛИЭТИЛЕНА ПЭ 80

Г. Н. Гусев^{a,*}, Р. В. Цветков^b

^a  <https://orcid.org/0000-0002-9072-0030>  gusev.g@icmm.ru;

^b  <https://orcid.org/0000-0001-9617-407X>  flower@icmm.ru

«Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, ул. Академика Королева, 1, г. Пермь, 614013, Россия

*Ответственный автор. Электронная почта: gusev.g@icmm.ru

Адрес для переписки: ул. Ак. Королева, 1, г. Пермь, 614013, Россия

Тел.: +7 (342) 237-83-84; fax: +7 (342) 237-84-87

Разработка подземных пластов полезных ископаемых вызывает значительные деформации в приповерхностном слое грунта, что приводит к образованию мульды сдвижения земной поверхности. Зоны сдвижения могут достигать нескольких километров и существенно влиять на деформированное состояние подземных трубопроводов. В этой связи оценка деформированного состояния таких трубопроводов является технически сложной задачей. Протяженные трубопроводы испытывают сложное деформированное состояние из-за больших диаметров, высокого давления, а также вариативности свойств материала труб и грунта. На основе результатов конечно-элементного моделирования осуществлена оценка деформаций грунтового массива, которые приводят к потере несущей способности различных подземных магистральных трубопроводов. Произведены вычисления для ряда основных конструктивных материалов и режимов эксплуатации.

Ключевые слова: подрабатываемый грунтовой массив, мульда сдвижения, деформированное состояние, подземный трубопровод, предельные деформации, конечно-элементная модель, мониторинг

1. Введение

Проектирование и эксплуатация подземных магистральных трубопроводов в районах добычи полезных ископаемых требуют решения множества задач [1–12]. Это связано с интенсивными и неоднородными деформациями грунта, формирующимися в результате развития мульды сдвижения в приповерхностном слое грунтового массива, который подвергается подработке. Эти воздействия изменяют напряженно-деформированное состояние трубопроводов, что в некоторых случаях создает риск аварий. Особенно это актуально для трубопроводов высокого давления. Дополнительные нагрузки на стенки труб, вызванные деформациями грунта, могут привести к образованию дефектов. Для безопасной эксплуатации таких объектов необходимо разработать методы оценки их текущего и прогнозируемого состояния. Эти вопросы решаются с помощью математического моделирования и мониторинга [1, 2, 12, 13]. Кроме создания численных моделей для каждой вариации системы «трубопровод – грунтовой массив», существуют аналитические методы для оценки предельных параметров напряженно-деформированного состояния трубы и грунта [1, 2, 14]. Эти методы позволяют без значительных вычислительных затрат и прямого численного моделирования оценить состояние трубопровода и связать его с состоянием окружающего грунта. Практика показывает [15, 16], что наиболее эффективный способ контроля состояния трубопрово-

дов в условиях подработки – это мониторинг деформаций грунта. Однако такие методы имеют свои недостатки. В некоторых исследованиях оценка напряжений в трубопроводах проводится без учета всех компонент тензора напряжений в стенке трубы [10, 11, 14], а только на основе предельных осевых напряжений. Другие методики сложно применять для перехода к деформационным параметрам грунта, так как они основаны на жесткостных параметрах грунтов, а не на теории упругости. Общим недостатком этих подходов является их упрощенность и использование большого количества переменных с широким диапазоном значений. Кроме того, они не могут оценить возможность потери устойчивости трубопровода как локально, так и на участках с сжимающими напряжениями. Важным аспектом анализа состояния подземного трубопровода в условиях подработки является корректная оценка взаимодействия трубы с грунтом при одноосном деформировании (вдоль оси трубы), что характерно для приповерхностной части геологического разреза в зонах подработки. Еще одной из особенностей, затрудняющих оценку деформированного состояния таких систем по известным методикам, является использование новых полимерных материалов для труб. Одним из таких материалов является полиэтилен, который способен воспринимать существенные дополнительные деформации до стадии разрушения.

Таким образом, целью исследования является моделирование и оценка особенностей деформированного состояния подземного трубопровода, выполненного из полиэтилена ПЭ 80. В исследовании проведен численный анализ напряженно-деформированного состояния системы «подземный трубопровод под давлением – грунтовый массив в зоне подработки» с использованием конечно-элементных моделей на комплексе Ansys. Эти модели учитывают физико-механические свойства материалов и грунта, а также параметры деформации, такие как сжатие и растяжение в различных зонах мульды сдвижения.

2. Постановка задачи и методы решения

Под воздействием подземных горных работ в приповерхностном слое грунта, толщина которого существенно больше глубины залегания линейного объекта, возникает деформационное состояние активного слоя толщи за счет формирования мульды сдвижения (рис. 1).

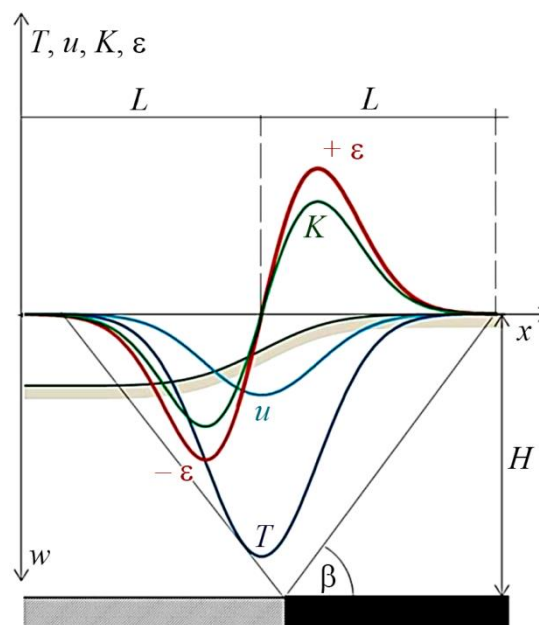


Рис. 1. Полу мульда сдвижения земной поверхности в зоне подрабатываемого породного массива: T – кривая наклонов земной поверхности, u – горизонтальные смещения, K – кривизна, ε – деформации земной поверхности, L – длины участков с деформациями разного знака, H – глубина подработки горного массива, w – ось вертикальных перемещений, β – угол подработки пласта

Допустим, что во фрагменте приповерхностного слоя в масштабе характерного линейного размера мулды сдвижения деформированное состояние однородно и одноосно, как представлено на рис. 1.

Требуется определить деформационное влияние на подземный трубопровод и критический для трубопровода уровень деформированного состояния грунта, который можно связать с измеряемыми величинами, например поверхностными деформациями грунтового массива на мулде сдвижения.

Для рассмотрения взяты участки зон оседания с положительной или отрицательной величиной горизонтальной деформации (рис. 1). Далее формируется два вида расчетных моделей согласно особенностям деформирования на описанных участках мулды (рис. 2).

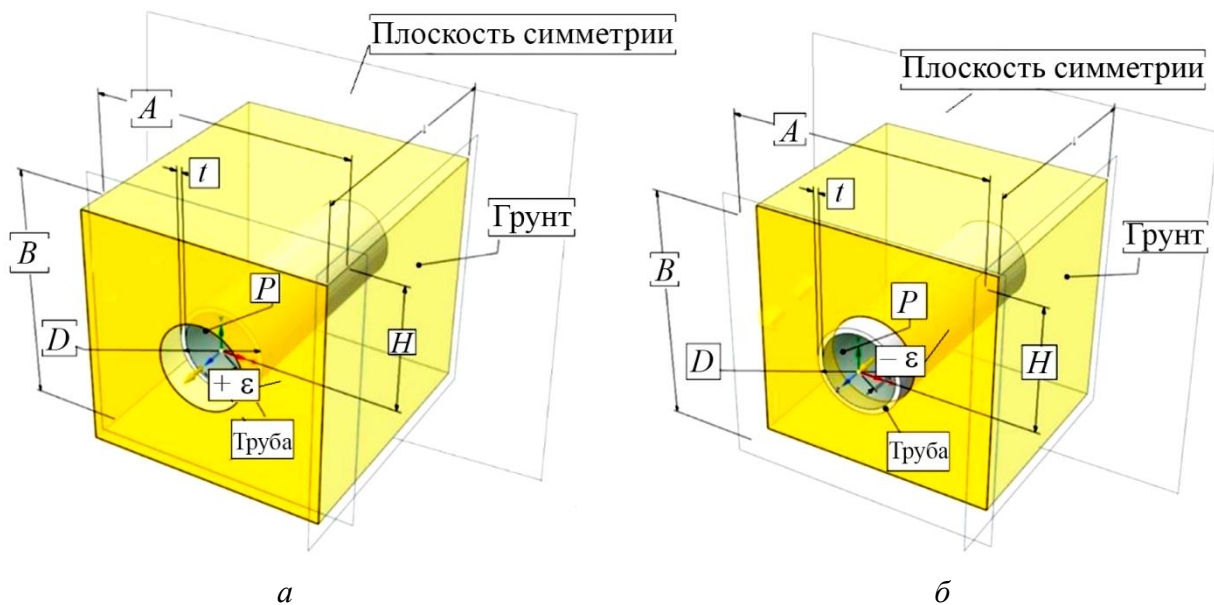


Рис. 2. Расчетные модели для двух участков полумулды сдвижения: участок растяжения грунтового массива (а); участок сжатия грунтового массива (б); D – внешний диаметр трубы, t – толщина стенки, A и B – размеры активного участка грунтового массива, H – глубина погружения (заложения) трубы, P – давление в трубопроводе

В общем случае на внешней границе грунтового фрагмента возможно определить краевые условия, обеспечивающие на некотором удалении от сооружения заданные значения величин и направление компонент деформаций $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ и их комбинаций. Однако такая постановка ведет, с одной стороны, к резкому увеличению числа расчетных вариантов, а с другой – требует наличия адекватного параметрического обеспечения. В этой связи рассмотрен вариант одноосного деформирования грунтового основания вдоль оси сооружений, что не противоречит общепризнанным подходам. Глубина заложения линейного объекта во всех расчетах принята равной 2 м от центра трубы. Размеры области $A \times B$ приняты на основании дополнительных расчетов на различных сетках КЭ-модели из условия отсутствия влияния граничных условий на распределение напряжений в месте сопряжения линейного объекта и грунтового массива с некоторым запасом: $A = 10$ м, $B = 10$ м. В расчетах приняты следующие длины расчетных зон половин мулд: 100, 150, 200, 300, 400, 500 и 600 метров как для зон растяжения, так и для зон сжатия. Отдельно решены задачи поиска устойчивого решения в зависимости от уровня дискретизации модели, и оценена сеточная сходимость.

Решение проведено в рамках линейной теории упругости для материала грунтового массива в предположении, что от его физически нелинейных деформационных свойств механизм передачи деформаций на трубу не зависит. Он определяется параметрами контактного взаимодействия по закону сухого трения Кулона (в общем случае). Материал же трубы

можно моделировать в любой необходимой постановке с учетом проявления физической нелинейности.

Расчеты проведены для следующих грунтов: песок (модуль упругости равен 30 МПа, плотность – 1700 кг/м³, коэффициент трения по полиэтилену – 0,35); глина (модуль упругости равен 15 МПа, плотность – 1900 кг/м³, коэффициент трения по полиэтилену – 0,3); суглинок (модуль упругости равен 20 МПа, плотность – 1800 кг/м³, коэффициент трения по полиэтилену – 0,45). Для полиэтилена приняты следующие механические характеристики: модуль упругости ПЭ 80 равен 800 МПа, коэффициент Пуассона – 0,3. Плотность ПЭ 80 равна 930 кг/м³. Минимальная длительная прочность ПЭ 80 принята равной 8 МПа. Внутреннее давление в трубе варьировалось от 5 до 500 кПа. Физико-механические характеристики полиэтилена и грунтов приняты на основании двух ГОСТов: «ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация» и «ГОСТ 18599-2001. Трубы напорные из полиэтилена. Технические условия».

Все расчеты состоят из двух принципиально разных фаз (этапов) нагружения, следующих одна за другой. Первая – гравитационное нагружение. Эта фаза расчета необходима для создания начального напряженно-деформированного состояния в породном массиве на глубину активной толщ в модели. На этой фазе расчета формируются условия сопряжения линейного объекта с окружающим грунтовым массивом в виде тензора напряжений в зоне контакта. Этой фазе соответствуют следующие граничные условия. На трех вертикальных боковых гранях фрагмента грунта по направлению их нормалей задаются нулевые перемещения. На одной (ортогональной к оси линейного объекта) плоскости задаются условия симметрии – отсутствие нормальных перемещений и поворота в направлении двух других осей. На нижней горизонтальной грани грунта краевые условия в точности соответствуют краевым условиям на первых двух боковых гранях. И на оставшейся (свободной) поверхности формируются силовые граничные условия нулевой интенсивности. Производится расчет с учетом массовых сил, давления в трубопроводе и вектора гравитации. Формируется начальное напряженное состояние в системе.

На второй фазе расчета формируются условия однородного вдоль оси сооружения растяжения или сжатия заданной интенсивности – до деформации 50 мм/м. Величина деформации 50 мм/м выбрана таким образом, чтобы превышать в несколько раз предельно допустимую величину, которая приведена в нормативной документации [17] и которая равна 15 мм/м. Данной фазе расчета соответствуют похожие для первой фазы граничные условия. Отличие заключается в создании на противоположной грани с симметричными граничными условиями условий перемещения по направлению нормалей, равных постоянным величинам, обеспечивающим необходимые значения деформаций ε_1 .

3. Результаты и обсуждение

Для каждого решения произведены и проанализированы параметры, характеризующие несущую способность трубопровода (в совокупности с грунтовым массивом). Рассмотрено деформированное состояние трубопроводов с учетом контактного взаимодействия с грунтовым массивом, дана оценка их несущей способности с использованием критерия эквивалентных напряжений Мизеса для ПЭ 80. Построены зависимости напряженного состояния в стенке трубопровода от деформаций в окружающем грунтовым массиве. Часть результатов можно рассмотреть на рис. 3. На нем представлены результаты вычисленных деформаций грунтового массива в окрестностях полиэтиленового трубопровода (оси абсцисс), которым соответствует величина эквивалентных напряжений по критерию Мизеса для материала трубы, равная пределу длительной прочности ПЭ 80. Эти величины отложены по оси ординат на графиках. На рис. 3 приведены результаты моделирования для трубопровода с внешним диаметром 219 мм и толщиной стенки 5 мм. Внутреннее давление среды в трубе составило 5000 Па. Глубина погружения трубопровода равна 2 м. Результаты приведены для песков. На рисунке представлены 14 кривых. Номера с 1-го по 7-й – участки растяжения в зоне

мульды сдвига с соответствующими длинами по порядку в сторону возрастания: 100, 150, 200, 300, 400, 500 и 600 метров. Номера с 8-го по 14-й – участки области сжатия.

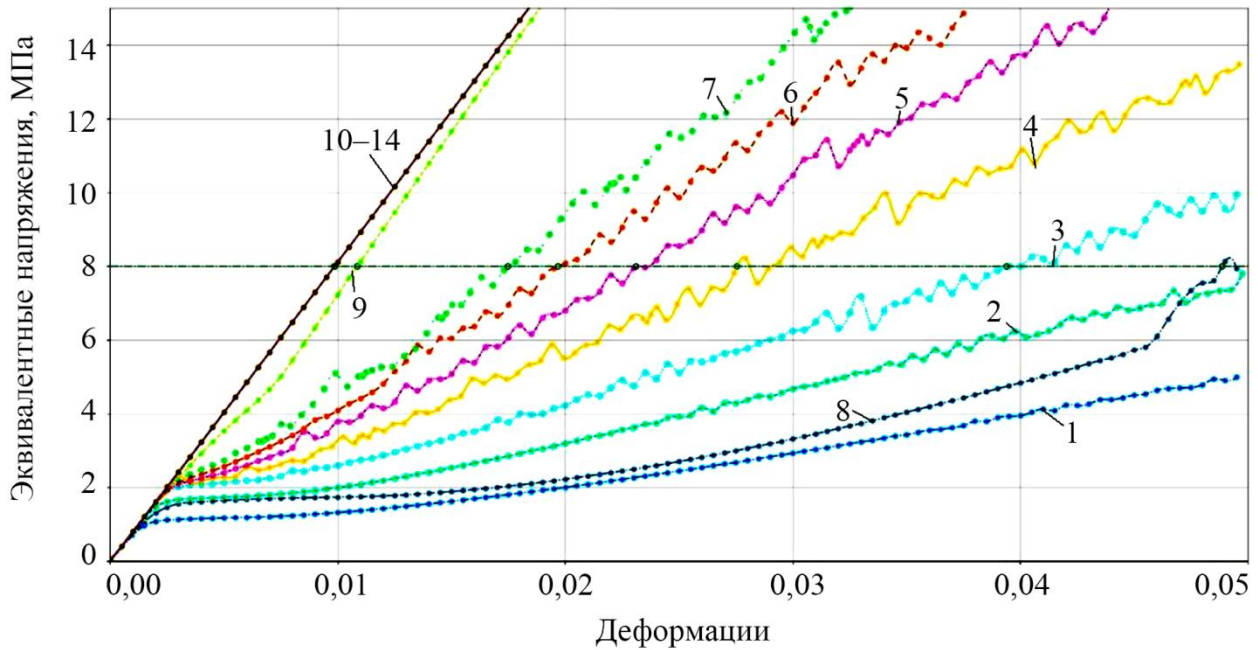


Рис. 3. Результаты расчета деформированного состояния полиэтиленового трубопровода

Прямая горизонтальная линия на рис. 3, которая соответствует значению 8 МПа – это значение длительного предела прочности для полиэтилена ПЭ 80. Из результатов анализа видно, что для различных длин активного участка деформирования трубопровода в модели определены величины эквивалентных напряжений в стенке трубы (точки пересечения кривых напряжений 1–14 с пределом длительной прочности), которые можно назвать предельными значениями напряжений. Соответствующие им значения деформаций грунтового массива можно также считать предельными. Также можно сделать вывод, что для случая растяжения массива грунта предельные деформации грунта тем меньше, чем длиннее активный участок трубопровода, что физически оправданно, поскольку суммарное сопротивление сил трения тем больше, чем длиннее участок трубопровода. Несколько по-иному выглядит картина зависимости эквивалентных напряжений в стенке трубы от длин активных участков для зоны сжатия в полумульде сдвига (кривые 8–14). Величины предельных деформаций в грунтовом массиве, которым соответствует предельное напряженное состояние в стенке трубы, существенно меньше для таких же длин активных участков в области растяжения полумульды. Более того, начиная с определенной длины характер кривых не меняется и напряжения нарастают по линейному закону.

На рис. 4 для вышеописанного варианта конструктива трубопровода приведены зависимости предельных деформаций в грунтовом массиве для разных типов грунта в зависимости от длин активных участков. Деформации представлены в мм/м для удобства сравнения с данными геодезических измерений для профильных линий, которые строят для мульд сдвига.

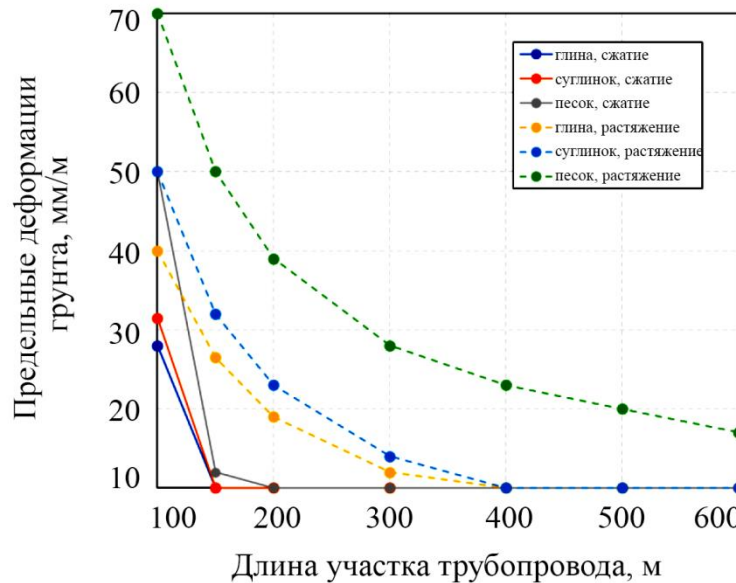


Рис. 4. Зависимости предельных деформаций для разных типов грунтов от длин активного участка трубопровода ПЭ 80 Ø 219 мм и толщиной стенки 5 мм

На основании проведенных расчетов для разных типов грунтов и целого сортамента типов полиэтиленовых трубопроводов предложен алгоритм мониторинга деформированного состояния подземных трубопроводов, находящихся в зоне добычи полезных ископаемых. Данный алгоритм строится на совместном использовании данных численного моделирования и результатах геодезических измерений в зонах развития деформаций.

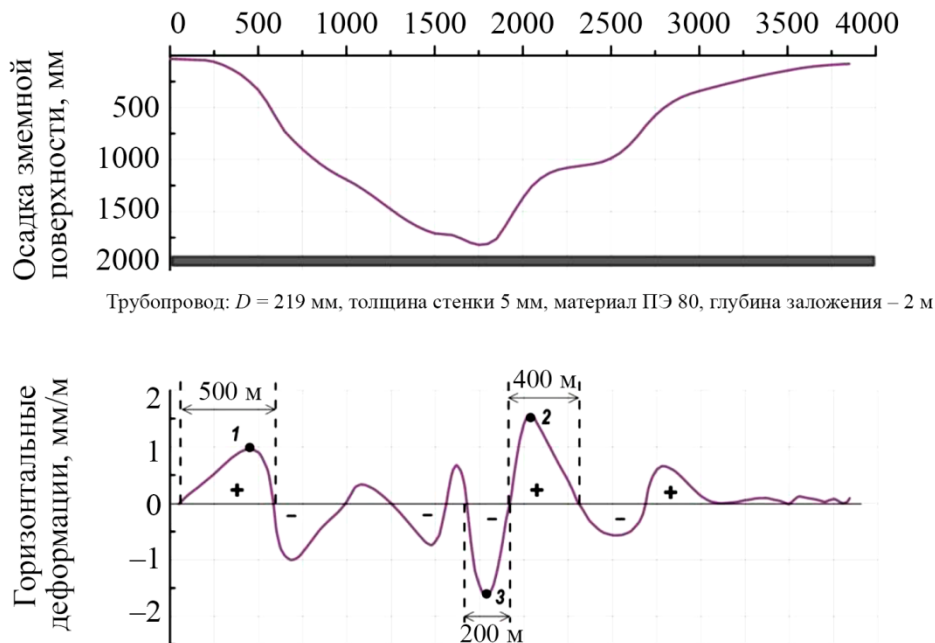


Рис. 5. Результаты наблюдений за деформациями земной поверхности в зоне добычи полезных ископаемых: профиль мульды сдвижения земной поверхности на момент измерений (а); горизонтальные деформации в приповерхностном слое подрабатываемого массива грунта (б)

На рис. 5 изображены данные геодезических наблюдений за поверхностью подрабатываемого грунтового массива. На глубине 2 м вдоль всей зоны развития осадок находится линия подземного трубопровода. На текущую дату измерений величины горизонтальных

деформаций для разных зон мульды не превысили 1,6 мм/м в абсолютном выражении. Основываясь на данных проведенных измерений и вычислительных экспериментов, возможно осуществлять мониторинг деформированного состояния трубопровода. Достаточно вести наблюдения за величинами деформаций земной поверхности различными методами и осуществлять сравнение полученных величин с предельными значениями, которые определены расчетами для разных типов грунтов. Более того, зная условия подработки и скорости развития деформаций, возможно осуществлять прогнозирование изменения деформированного состояния трубопровода.

4. Заключение

По результатам серии расчетов построены зависимости эквивалентных напряжений в стенке трубопровода от деформаций грунтового массива, вызванных подработкой. Из расчетов видно, что для области сжатия грунтового массива и трубопровода характерно относительно быстрое нарастание величин эквивалентных напряжений (для ряда длин), которое соответствует линейному закону. Характер деформационного поведения для зон растяжения существенно отличается от наблюдаемого в зонах сжатия. Можно выделить зоны упругой работы системы и совместного деформирования, а также проскальзывание трубопровода относительно сопряженного с ним грунта. Такой характер деформирования обусловил существенные различия между величинами деформации грунтового массива в области сжатия и растяжения, которые соответствуют предельным величинам эквивалентных напряжений. Иными словами, стадия предельного деформирования трубопроводов для зоны сжатия наступает существенно быстрее, чем для области растяжения. Для оценки предельных величин деформации грунтового массива следует учитывать данные различия. Все данные расчетов сведены в базу данных. Каждой расчетной модели соответствует графическое изображение серии результатов, которым можно пользоваться для анализа. Предложен алгоритм использования данных вычислений для мониторинга подземных трубопроводов в зоне развития осадок земной поверхности в результате подработки.

Благодарность

Исследование выполнено в рамках государственного задания, регистрационный номер темы 124020700047-3.

Литература

1. Бородавкин П. П. Модель системы труба-грунт для определения продольных перемещений трубопровода // Строительство трубопроводов. – 1977. – № 5. – С. 24–25.
2. Яваров А. В. Напряженно-деформированное состояние подземных трубопроводов // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2013. – № 1 (6). – С. 1–10. – DOI: 10.18720/CUBS.6.1.
3. Файзуллина Э. В., Битаева М. В. О воздействии процесса просадки на линейную часть магистральных трубопроводов // Вестник молодого ученого УГНТУ. – 2022. – № 2 (18). – С. 4–11.
4. Ravet F. Transport infrastructure geohazard risk monitoring with optical fiber distributed sensors: experience with Andean and Arctic pipelines // FMGM 2018 Conference, Rio de Janeiro, Brazil, July 16–19, 2018 : 10th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics.
5. A novel pipeline leak detection technique based on acoustic emission features and two-sample Kolmogorov–Smirnov test / A. Rai, Z. Ahmad, M. J. Hasan, J.-M. Kim // Sensors. – 2021. – Vol. 21. – 8247. – DOI: 10.3390/s21248247.
6. Impact of ground surface subsidence caused by underground coal mining on natural gas pipeline / O. Bazaluk, O. Kuchyn, P. Saik, S. Soltabayeva, H. Brui, V. Lozynskyi, O. Cherniaiev // Scientific Reports. – 2023. – Vol. 13. – 19327. – DOI: 10.1038/s41598-023-46814-5.

7. Movement of overlying strata and mechanical responses of shallow buried gas pipelines in coal mining areas / J. Han, Z. Ma, J. Sun, P. Gong, P. Yan, C. Cai, M. Xu, T. She // *Applied Sciences*. – 2025. – Vol. 15. – 622. – DOI: 10.3390/app15020622.
8. A novel fuzzy approach to gas pipeline risk assessment under influence of ground movement / A. Malinowska, X. Cui, E. F. Salmi, R. Hejmanowski // *International Journal of Coal Science & Technology*. – 2022. – Vol. 9. – P. 47. – DOI: 10.1007/s40789-022-00511-2.
9. Buried pipeline collapse dynamic evolution processes and their settlement prediction based on PSO–LSTM / Y. Zhou, Z. Teng, L. Chi, X. Liu // *Applied Sciences*. – 2024. – 14 (1). – P. 393. – DOI: 10.3390/app14010393.
10. Grygierek M., Kalisz P. Influence of mining operations on road pavement and sewer system – selected case studies // *Journal of Sustainable Mining*. – 2018. – Vol. 17 (2). – P. 56–67. – DOI: 10.1016/j.jsm.2018.04.001.
11. Kalisz P., Zięba M. Impact of mining exploitation on pipelines // *Acta Montanistica Slovaca*. – 2014. – Vol. 19 (3). – P. 111–117.
12. Mechanical behavior of gas-transmission pipeline in a goaf / B. Zhao, H. Zhang, Y. Wang, Y. Zhou, J. Zhang // *Processes*. – 2023. – Vol. 11 (4). – 1022. – DOI: 10.3390/pr11041022.
13. Шошиашвили М. Э, Шошиашвили И. С., Маров С. Ю. Модель напряженно-деформированного состояния трубопровода по методу перемещений для мехатронных комплексов при строительстве магистральных трубопроводов // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. – 2024. – № 2 (222). – С. 53–59. – DOI: 60-3644-2024-2-53-59.
14. URL: <https://primis.phmsa.dot.gov/matrix/FilGet.rdm?fil=4507>
15. Zlobin V. D., Glushko N. A. Remote monitoring of leaks on the main pipeline // *Voprosy Ustoychivogo Razvitiya Obshchestva*. – 2020. – Vol. 10. – P. 643–648.
16. Kazarinov Yu. I. Factors affecting the operational reliability of main pipelines during the transportation of gas and oil // *Components of Scientific and Technological Progress*. – 2021. – Vol. 12 (66). – P. 6–9.
17. Указания по допустимым условиям подработки эксплуатируемых зданий и сооружений на Верхнекамском месторождении калийных солей. – С.-Петербург : ВНИГ, 2004. – 46 с.