DOI: 10.17122/ntj-oil-2020-3-74-82

УДК 622.692; 621.6

Х.М. Насиров (Государственная нефтяная компания Азербайджанской Республики, г. Баку, Азербайджанская Республика)

ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАЩИЩЕННОСТИ МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ ОТ ОПОЛЗНЕЙ, ВЫЗВАННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИМ СОБЫТИЕМ

Habib M. Nasirov (State Oil Company of Azerbaijan Republic, Baku, Azerbaijan Republic)

SAFETY ISSUES OF MAIN OIL PIPELINES FROM LANDSLANDS CAUSED BY SEISMIC EVENT

Введение

При деформациях земляного покрова, возникающих, например, из-за оползней, вызванных землетрясениями, подземные трубопроводы могут получить значительные повреждения. Обеспечение защищенности магистральных нефтепроводов, от всякого рода деформаций, возникающих из-за сейсмических событий, безусловно, является важной проблемой в регионах, характеризующихся значительной вероятностью возникновения оползней.

Цели и задачи

Целью работы является изучение вопросов обеспечения защищенности магистральных трубопроводов от оползневых процессов, возникающих в результате сейсмических событий.

Результаты

Сформулирована оптимизационная задача достижения максимальной защищенности магистральных трубопроводов от воздействия оползней, возникающих при сейсмических событиях. Дано ее модельное решение.

Background

Under deformations of the earth cover, arising, for example, due to landslides caused by earthquakes, underground pipelines can receive significant damage. Ensuring the protection of main oil pipelines from all sorts of deformations arising from seismic events is undoubtedly an important problem in regions characterized by a significant likelihood of landslides.

Aims and Objectives

The aim of the work is to study the issues of ensuring the protection of pipelines from landslide processes arising from seismic events.

Results

An optimization problem is formulated to achieve maximum protection of the main pipelines from landslides arising from seismic events. It's model solution is given.

На основе решения оптимизационной задачи разработана эвристическая рекомендация по выбору маршрута магистрального нефтепровода с учетом расположения склонов на трассе и прогнозируемого места эпицентра сейсмического события.

Based on the solution of the optimization problem, a heuristic recommendation for choosing the route of the main oil pipeline, taking into account the location of the slopes on the route and the predicted location of the epicenter of the seismic event was developed.

Ключевые слова: магистральный трубопровод; оптимизация; оползень; сейсмическое событие; модель; склоны

Key words: main pipeline; optimization; landslide; seismic event; the model; the slopes

Введение

Газовые и нефтяные трубопроводы в основном размещаются под землей, чтобы минимизировать повреждения из-за воздействия различных наземных факторов. Однако при деформациях земляного покрова, возникающих, например, из-за оползней, вызванных землетрясениями, подземные трубопроводы могут получить значительные повреждения. Обеспечение защищенности магистральных нефтепроводов, от всякого рода деформаций, возникающих из-за сейсмических событий, безусловно, является важной проблемой в регионах, характеризующихся значительной вероятностью возникновения оползней.

Нефтепровод Баку - Джейхан нагружается на терминале Сангачал, находящемся вблизи г. Баку. Защищенности самого нефтепровода и терминала в окрестностях г. Сангачал посвящены ряд исследований, например [1-3]).

В работе [1] сообщается об обнаружении значительной межсейсмической аккумулярованной напряженности на расстоянии 150 км вдоль бассейна реки Кура. Такая аномальная напряженность разрывных подземных структур, по мнению авторов, требует проведения детальных исследований по

обеспечению защищенности нефтяных производственных структур в указанной зоне.

В работе [2] отмечается важная роль космических технологий в решении важнейших геотехнических задач по обеспечению нормального функционирования различных производственных структур в зоне Сангачальского терминала.

Как сообщается в работе [3], измерения, проведенные с помощью InSAR, показали некоторое смещение почвы в зоне терминала Сангачал. Очевидно, что обеспечение устойчивой и стабильной работы терминала актуально не только для магистральной линии Баку - Тбилиси - Джейхан и Сангачальского терминала, но и других подобных нефтяных производственных сооружений.

В статье рассматриваются вопросы обеспечения защищенности таких сооружений от оползневых процессов, возникающих в результате сейсмических событий.

Известны многие методики оценки риска появления оползней, возникающих по причине землетрясений, например в работах [4-7] рассмотрены вопросы предсказания оползней на базе пространственного ГИС анализа.

В работе [8] данный вопрос методически решается путем использования мульт-

тиспектральных снимков высокого разрешения исследуемой зоны.

В работе [6] используется совместное ГИС моделирование и исследование топографических и геологических слоев в составе статических моделей для осуществления полук количественного раздела территории на зоны для вычисления степени подверженности оползню.

Согласно [9], уровень защищенности нефтяного трубопровода может быть определен путем рассмотрения вероятности превышения (PVR) порога возникновения сейсмического события и периода повтора (RP) при заданном номинальном времени жизни $V_n \geq 100$ лет.

1. Предлагаемый метод

1.1. Базовые положения

В работе [10] предложено оценивать пороговую величину безопасности (SLV) путем составления карты участка с указанием значения PGA_s (пиковая величина ускорения движения почвы для почвы A при значении $RP = 1900$ лет).

Для вычисления локальной эффективной величины PGA_s используется выражение

$$PGA_s = a_g \cdot S_s \cdot S_t, \quad (1)$$

где S_s - стратиграфический фактор, зависящий от показателей a_g и F_0 , где a_g - показатель типа почвы; F_0 - максимальное усиление спектра горизонтальной эластической реакции.

Согласно модели Ньюмарка [11] подверженность участка оползню, вызванному землетрясением, определяется коэффициентом безопасности SF , определяемым как

$$SF = \frac{(K_y \cdot g)}{PGA_s}, \quad (2)$$

где $(K_y \cdot g)$ - критическое ускорение, являющееся функцией геотехнических параметров.

Согласно методу Rapolla [6], эвристически выделены 3 фактора для прогнозирования подверженности участка оползню, вызванному землетрясением:

1) геотехнический показатель почвы/породы (V_s);

2) крутизна склона;

3) сейсмический показатель (PGA_s).

Вышеуказанные показатели в этом методе вычисляются на основе следующих трех коэффициентов:

1. коэффициент литологии (S_a);

2. коэффициент склона (S_b);

3. сейсмический коэффициент (S_c).

Согласно [6] между S_a и V_s имеется следующее соотношение

$$S_a = \frac{0.2045}{V_s} - 0.1363. \quad (3)$$

В соответствии с [4] между S_b и β имеются следующие соотношения:

$$S_b = 0.04 \cdot \beta \quad (\text{для почвы}); \quad (4)$$

$$S_b = 0.04\beta - 0.6 \quad (\text{для твердых пород}), \quad (5)$$

где β - склон (в градациях).

Согласно [10] итоговый индекс подверженности оползню, возникающему из-за сейсмического события, определяется по формуле:

$$SI = \frac{S_a + S_b}{2} \cdot S_c, \quad (6)$$

где S_c определяется через показатель локального максимума интенсивности по шкале MCS .

$$S_c = 0.6667(MCS) - 0.8333. \quad (7)$$

Согласно формуле Амбразеса [12],

$$MCS = \frac{(\log_{10} PGA_s + 0.408)}{0.36}. \quad (8)$$

С учетом выражений (3)-(4) и (6)-(8) получаем

$$SI = \frac{\frac{0.2045}{V_s} - 0.1363 + 0.04\beta}{2} \cdot \left[\frac{0.6667}{0.36} \cdot (\log_{10} PGA_s + 0.408 - 0.8333) \right]. \quad (9)$$

Выражение (9) представим следующим образом:

$$SI = \left(\frac{a_1}{V_s} - a_2 + a_3\beta \right) \cdot [a_4 [\log_{10} PGA_s + a_5] - a_6], \quad (10)$$

где $a_1 = \frac{0.2045}{2}$; $a_2 = \frac{0.1363}{2}$; $a_3 = \frac{0.04}{2}$; $a_4 = \frac{0.6667}{0.36}$; $a_5 = 0.408$; $a_6 = 0.8333$.

Таким образом, между индексом подверженности оползню SI и пиковой величиной ускорения почвы PGA_s существует логарифмическая связь в виде (10).

1.2. Разработка методики

Как было отмечено выше, целью проводимых исследований является *разработка методики интегральной оценки подверженности трубопровода по всей трассе оползневой опасности* и пиковой величине ускорения движения почвы.

Рассмотрим общий случай, когда пиковая величина ускорения движения почвы непрерывно уменьшается по мере удаления от эпицентра, что иллюстрирует рисунок 1.

Рисунок 1. Графическая интерпретация принятой модели взаимодействия сейсмических волн, приводящего к ускорению движения почвы и склонов на пути распространения волн

Рассматриваем множество склонов на пути распространения сейсмических волн

$$B = \{\beta_i\}; \quad i = \overline{1, n}. \quad (11)$$

Считаем, что множество является упорядоченным, т.е. имеет место условие

$$\beta_{i+1} = \beta_i + \Delta\beta; \quad \Delta\beta = const. \quad (12)$$

При этом по мере удаления трубопровода от эпицентра β либо растет, либо уменьшается. Далее считаем, что существует функциональная зависимость

$$PGA_s = f(\beta), \quad (13)$$

оптимальный вид которой необходимо определить.

Если условно перейти на непрерывную модель записи математических формул, т.е. переменную β принять за непрерывную величину, основной функционал оптимизации SI_{int} , характеризующий интегральную подверженность оползню, на основании выражения (10) определим как:

$$SI_{int} = \int_0^{\beta_{max}} \left(\frac{a_1}{V_s} - a_2 + a_3\beta \right) \cdot [a_4 [\log_{10} PGA_s + a_5] - a_6] d\beta. \quad (14)$$

С учетом (13) и (14) получим

$$SI_{int} = \int_0^{\beta_{max}} \left(\frac{a_1}{V_s} - a_2 + a_3\beta \right) \cdot [a_4 [\log_{10} PGA_s(\beta) + a_5] - a_6] d\beta. \quad (15)$$

Для постановки оптимизационной задачи воспользуемся методом уменьшения размерности, изложенным в работах [13, 14].

Так как рассматриваем линейную зависимость β от расстояния между трубой и эпицентром, то между β и PGA также получим линейную зависимость, т.к. в принятой линейной модели PGA уменьшается по мере удаления рассматриваемой точки трубы от эпицентра.

Таким образом, рассматриваемая задача выбора оптимальной функции $PGA_s(\beta)$ сводится к задаче дуального выбора одного из двух видов функции, приведенных на рисунке 2.

Рисунок 2. Графическое представление дуального выбора функции $PGA_s = f(\beta)$

С учетом графического представления, приведенного на рисунке 2, можно сформулировать следующее ограничительное условие выбора

$$\int_0^{\beta_{\max}} f(\beta) d\beta = C; \quad \text{где } C = \text{const}. \quad (16)$$

С учетом выражений (15) и (16) можно сформировать полный функционал безусловной вариационной оптимизации $F(f(\beta))$ в следующем виде:

$$F(f(\beta)) = \int_0^{\beta_{\max}} \left(\frac{a_1}{V_s} - a_2 + a_3\beta \right) \cdot [a_4 [\log_{10} PGA_s(\beta) + a_5] - a_6] d\beta + \lambda \left[\int_0^{\beta_{\max}} f(\beta) d\beta - C \right]. \quad (17)$$

Таким образом, согласно предлагаемой методике оптимизации вопрос поиска максимальной защищенности трубопровода от оползней, возникающих на склонах, сводится к решению задачи безусловной вариационной оптимизации (17).

Приведем модельное решение данной задачи.

2. Модельные исследования

Для упрощения дальнейших выкладок выражение (17) перепишем как $\beta_{\max}$

$$F(f(\beta)) = \int_0^{\beta_{\max}} (a_8 + a_3\beta) \cdot [a_4 \log_{10} PGA_s(\beta) + a_9 - a_6] d\beta + \lambda \left[\int_0^{\beta_{\max}} f(\beta) d\beta - C \right], \quad (18)$$

где $a_8 = \frac{a_1}{V_s} - a_2$; $a_9 = a_4 a_5$.

Согласно уравнению Эйлера-Лагранжа [15], решение задачи (18) должно удовлетворять условию:

$$\frac{\partial \{ (a_8 + a_3\beta) [a_4 \log_{10} PGA_s(\beta) + a_9 - a_6] + \lambda [f(\beta) - C] \}}{\partial (PGA_s(\beta))}. \quad (19)$$

Из условия (19) получим

$$\frac{(a_8 + a_3\beta) \cdot a_4}{(\ln 10) \cdot PGA_s(\beta)} + \lambda = 0. \quad (20)$$

Из (20) следует

$$PGA_s(\beta) = - \frac{(a_8 + a_3\beta) \cdot a_4}{\lambda (\ln 10)}. \quad (21)$$

С учетом условия (16) и (21) имеем

$$\int_0^{\beta_{\max}} -\frac{(a_8 + a_3\beta) \cdot a_4}{\lambda(\ln 10)} d\beta = C. \quad (22)$$

Из (22) находим

$$\lambda = -\int_0^{\beta_{\max}} \frac{(a_8 + a_3\beta) \cdot a_4}{C \cdot \ln 10} d\beta. \quad (23)$$

Обозначим результат вычисления λ по формуле (23) как λ_0 . В этом случае оптимальная функция $PGA_s(\beta)$ имеет вид

$$PGA_s(\beta) = \frac{(a_8 + a_3\beta) \cdot a_4}{\lambda_0 \cdot \ln 10}. \quad (24)$$

Для выявления типа экстремума функционала (18) достаточно взять вторую производную интегранта функционала (18) и убедиться, что она отрицательна. Следовательно, при решении (24) целевой функционал (18) достигает максимума, т.е. при решении (24) интегральная подверженность маги-

стрального трубопровода оползню максимальна.

Следовательно, результат (24) наводит нас на следующую эвристическую рекомендацию. Трубопровод и предсказанный эпицентр сейсмического события должны быть взаимно расположены таким образом, чтобы на склонах с большим углом регистрировались малые пиковые ускорения, а с малым углом - большие. При этом имеются в виду склоны, находящиеся вблизи трассы прокладки магистрального трубопровода.

Вывод

Проведенный анализ выбора оптимального маршрута строительства трубопровода в зонах, включающих различные склоны, с целью максимальной защищенности от оползней, возникающих в результате сейсмических событий, показал целесообразность обеспечения обратной зависимости между пиковым ускорением в зоне склона и крутизной склона по маршруту прокладки трубопровода с учетом взаимного расположения сейсмической зоны и существующих склонов.

Список литературы

1. Kadirov F., Floyd M., Alizadeh A., Guliev I., Reilinger R., Kuleli S., King R., Toksoz Nafi M. Kinematics of the Eastern Caucasus near Baku, Azerbaijan // *Natural Hazards*. 2012. Vol. 63. P. 997-1006. DOI: 10.1007/s11069-012-0199-0.
2. Kurnaz S., Aliyeva N.B., Rustamov R.B. Soil Environmental Studies with Application of Space Technology Advances and Geotechnical Investigations // *Researches and Applications in Mechanical Engineering*. 2015. Vol. 4. P. 10-19. DOI: 10.14355/rame.2015.04.002.
3. Grant C. Integrated Space Applications in Transport, Energy and Safety - Oil and Gas Exploration // *Exploration and Productions Technology Delivering Breakthrough Solutions*. 2009. 17 p. URL: https://business.esa.int/sites/default/files/4.%20Grant-BP_Nov12_.pdf (дата обращения: 13.04.2020).
4. Keeper D.K. Landslides Caused by Earthquakes // *Geological Society of America Bulletin*.

References

1. Kadirov F., Floyd M., Alizadeh A., Guliev I., Reilinger R., Kuleli S., King R., Toksoz Nafi M. Kinematics of the Eastern Caucasus near Baku, Azerbaijan. *Natural Hazards*, 2012, Vol. 63, pp. 997-1006. DOI: 10.1007/s11069-012-0199-0.
2. Kurnaz S., Aliyeva N.B., Rustamov R.B. Soil Environmental Studies with Application of Space Technology Advances and Geotechnical Investigations. *Researches and Applications in Mechanical Engineering*, 2015, Vol. 4, pp. 10-19. DOI: 10.14355/rame.2015.04.002.
3. Grant C. Integrated Space Applications in Transport, Energy and Safety - Oil and Gas Exploration. *Exploration and Productions Technology Delivering Breakthrough Solutions*. 2009, 17 p. URL: https://business.esa.int/sites/default/files/4.%20Grant-BP_Nov12_.pdf (accessed 13.04.2020).
4. Keeper D.K. Landslides Caused by Earthquakes. *Geological Society of America Bulletin*,

1984. Vol. 95. No. 4. P. 406-421. DOI: 10.1130/0016-7606(1984)95<406:LCBE>2.0.CO;2.

5. Jibson R.W., Harp E.L., Michael J.A. A Method for Producing Digital Probabilistic Seismic Landslide Hazard Maps // *Engineering Geology*. 2000. Vol. 58. Issues 3-4. P. 271-289. DOI: 10.1016/S0013-7952(00)00039-9.

6. Rapolla A., Paoletti V., Secomandi M. Seismically-Induced Landslide Susceptibility Evaluation: Applications of a New Procedure to the Island of Ischia, Campania Region, Southern Italy // *Engineering Geology*. 2010. Vol. 114. P. 10-25. DOI: 10.1016/j.enggeo.2010.03.006.

7. Rapolla A., Di Nocera S., Matano F., Paoletti V., Tarallo D. Susceptibility Regional Zonation on Earthquake-Induced Landslide in Campania, Southern Italy // *Natural Hazards*. 2012. Vol. 61. P. 115-126. DOI: 10.1007/s11069-011-9790-z.

8. Kamp U., Owen L.A., Growley B.J., Khattak A.G. Back Analysis of Landslide Susceptibility Zonation Mapping for the 2005 Kashmir Earthquake: an Assessment of the Reliability of Susceptibility Zoning Maps // *Natural Hazards*. 2010. Vol. 54. P. 1-25. DOI: 10.1007/s11069-009-9451-7.

9. Kouli M., Loupasakis C., Sopios P., Vallianatos F. Landslide Hazard Zonation in High Risk Areas of Rethymno Prefecture, Crete Island, Greece // *Natural Hazards*. 2010. Vol. 52. P. 599-621. DOI: 10.1007/s11069-009-9403-2.

10. Borfecchia F., Canio G., Cecco L., Giocoli A., Grauso S., Porta L., Martini S., Pollino M., Roselli I., Zini A. Mapping the Earthquake-Induced Landslide Hazard Around the Main Oil Pipeline Network of the Agri Valley (Basilicata, Southern Italy) by Means of Two GIS-Based Modelling Approaches // *Natural Hazards*. 2016. Vol. 81. P. 759-777. DOI: 10.1007/s11069-015-2104-0.

11. Newmark N.M. Effects of Earthquakes on Dams and Embankments // *Geotechnique*. 1965. Vol. 15. No. 2. P. 139-159. DOI:10.1680/geot.1965.15.2.139.

12. Ambraseys N. The Correlation of Intensity with Ground Motion // *Proceeding of the XIV General Assembly of the European Seismological Commission*. Trieste, Italy. 1974. P. 335-341.

13. Асадов Х.Г. Синтез оптимальных подсистем обработки измерительной информации на базе параллельных и параллельно-последовательных преобразователей // *Измерительная техника*. 2002. № 2. С. 19-21.

14. Асадов Х.Г. Применение принципа параметрического уменьшения размерности для синтеза одного подкласса информационных систем и планирования измерительного эксперимента // *Измерительная техника*. 2003. № 6. С. 3-6.

15. Эльсгольц Л.Е. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. М.: Наука, 1974. 472 с.

1984, Vol. 95, No. 4, pp. 406-421. DOI: 10.1130/0016-7606(1984)95<406:LCBE>2.0.CO;2.

5. Jibson R.W., Harp E.L., Michael J.A. A Method for Producing Digital Probabilistic Seismic Landslide Hazard Maps. *Engineering Geology*, 2000, Vol. 58, Issues 3-4, pp. 271-289. DOI: 10.1016/S0013-7952(00)00039-9.

6. Rapolla A., Paoletti V., Secomandi M. Seismically-Induced Landslide Susceptibility Evaluation: Applications of a New Procedure to the Island of Ischia, Campania Region, Southern Italy. *Engineering Geology*, 2010, Vol. 114, pp. 10-25. DOI: 10.1016/j.enggeo.2010.03.006.

7. Rapolla A., Di Nocera S., Matano F., Paoletti V., Tarallo D. Susceptibility Regional Zonation on Earthquake-Induced Landslide in Campania, Southern Italy. *Natural Hazards*, 2012, Vol. 61, pp. 115-126. DOI: 10.1007/s11069-011-9790-z.

8. Kamp U., Owen L.A., Growley B.J., Khattak A.G. Back Analysis of Landslide Susceptibility Zonation Mapping for the 2005 Kashmir Earthquake: an Assessment of the Reliability of Susceptibility Zoning Maps. *Natural Hazards*, 2010, Vol. 54, pp. 1-25. DOI: 10.1007/s11069-009-9451-7.

9. Kouli M., Loupasakis C., Sopios P., Vallianatos F. Landslide Hazard Zonation in High Risk Areas of Rethymno Prefecture, Crete Island, Greece. *Natural Hazards*, 2010, Vol. 52, pp. 599-621. DOI: 10.1007/s11069-009-9403-2.

10. Borfecchia F., Canio G., Cecco L., Giocoli A., Grauso S., Porta L., Martini S., Pollino M., Roselli I., Zini A. Mapping the Earthquake-Induced Landslide Hazard Around the Main Oil Pipeline Network of the Agri Valley (Basilicata, Southern Italy) by Means of Two GIS-Based Modelling Approaches. *Natural Hazards*, 2016, Vol. 81, pp. 759-777. DOI: 10.1007/s11069-015-2104-0.

11. Newmark N.M. Effects of Earthquakes on Dams and Embankments. *Geotechnique*, 1965, Vol. 15, No. 2, pp. 139-159. DOI:10.1680/geot.1965.15.2.139.

12. Ambraseys N. The Correlation of Intensity with Ground Motion. *Proceeding of the XIV General Assembly of the European Seismological Commission*. Trieste, Italy, 1974, pp. 335-341.

13. Asadov Kh.G. Sintez optimal'nykh podsystem obrabotki izmeritel'noi informatsii na baze parallel'nykh i parallel'no-posledovatel'nykh preobrazovatelei [Synthesis of Optimal Processing Information Processing Subsystems Based on Parallel and Serial Converters]. *Izmeritel'naya tekhnika - Measurement Techniques*, 2002, No. 2, pp. 19-21. [in Russian].

14. Asadov Kh.G. Primenenie printsipa parametricheskogo umen'sheniya razmernosti dlya sinteza odnogo podklassa informatsionnykh sistem i planirovaniya izmeritel'nogo eksperimenta [Application of the Principle of Parametric Dimensionality Reduction

for the Synthesis of One Subclass of Information Systems and the Planning of a Measurement Experiment]. *Izmeritel'naya tekhnika - Measurement Techniques*, 2003, No. 6, pp. 3-6. [in Russian].

15. Elsgolts L.E. *Differentsial'nye uravneniya i variatsionnoe ischislenie* [Differential Equations and Calculus of Variations]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 472 p. [in Russian].

Автор

• Насиров Хабиб Миргалиб оглы
Государственная нефтяная компания
Азербайджанской Республики
Старший специалист Управления экологии,
Департамент биоразновидности
AZ 1033, Азербайджан, г. Баку,
пр. Гейдара Алиева 121
e-mail: nasirovhabib@mail.ru

The Author

• Nasirov Habib M.
SOCAR
Ecology Directorate of SOCAR
Senior Specialist of Ecology Directorate,
Department of Biovariability,
121, Heydar Aliyev av., Baku, AZ 1033,
Republic of Azerbaijan
e-mail: nasirovhabib@mail.ru