

Проектирование, сооружение и эксплуатация систем трубопроводного транспорта

Designing, construction and operation of pipeline transport system

25.00.19 Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов,
баз и хранилищ (технические науки)

DOI: 10.31660/0445-0108-2020-1-122-127

УДК 621.642.39

Исследование влияния резиноканевых демпфирующих опор на сейсмостойкость СПГ-резервуаров

А. А. Тарасенко, П. В. Чепур*, А. А. Грученкова

Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия

**e-mail: chepurpv@tyuiu.ru*

Аннотация. В статье разработана конечно-элементная модель резервуара для хранения сжиженного природного газа. С использованием численной модели исследовано влияние коэффициента демпфирования резиноканевых опор на перемещение конструкции резервуара и движение хранимого продукта при различной частоте сейсмических волн. Установлены графические зависимости перемещения и ускорения конструкции по высоте стенки.

Ключевые слова: резервуар; сжиженный природный газ; сейсмическая активность; резиноканевые опоры; метод конечных элементов

Research of laminated rubbers influence on the LNG-tank seismic resistance

Aleksandr A. Tarasenko, Petr V. Chepur*, Alesya A. Gruchenkova

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

**e-mail: chepurpv@tyuiu.ru*

Abstract. The article developed a finite-element model of a tank for storing liquefied natural gas. The influence of the damping coefficient of laminated rubbers on the movement of the tank and the acceleration of the stored product at different frequencies of seismic waves is numerically studied. Graphic dependences of the displacement and acceleration of the structure along the height of the wall are established.

Key words: tank; liquefied natural gas; seismic activity; laminated rubbers; finite element method

Введение

В настоящее время природный газ является одним из наиболее востребованных и экологически чистых источников энергии в мировом топливно-энергетическом комплексе. По прогнозам Мировой Энергетической Ассоциации, в 2020 году природный газ станет первым компонентом мирового энергетического комплекса [1, 2]. Для удобства хранения и транспортировки природный газ искусственно переводится в жидкое агрегатное состояние. Сжиженный природный газ (СПГ) хранится в подземных и наземных резервуарах. Подземные резервуары для хранения СПГ более безопасны, чем наземные, особенно в случае расположения в сейсмоактивных районах. Однако затраты на строительство подземных резервуаров выше, чем для наземных, поэтому большинство резервуаров для хранения СПГ строится в наземном исполнении [3, 4]. Обеспечение надежной эксплуатации резервуаров, возведенных в сейсмоопасных районах, является важной задачей, требующей пристального внимания уже на этапе проектирования резервуара [5].

Исследования зарубежных авторов [6–8] показали, что изоляция основания резервуара приводит к увеличению сейсмостойкости конструкции. В сравнении с другими амортизационными опорами, резинотканевые демпфирующие вставки имеют высокую прочность, долговечны и экономичны, поэтому они широко используются в нефтегазовой отрасли.

Объект и методы исследования

Поскольку демпфирование и частота сейсмического воздействия являются основными параметрами, оказывающими влияние на сейсмостойкость резервуаров [9–12], для сравнительного анализа влияния данных параметров на сейсмическую реакцию резервуаров СПГ была построена конечно-элементная модель резервуара объемом 150 тыс. м³ в программном комплексе ADINA [13–15]. Наружная часть резервуара представляет собой железобетонную стенку, внутренняя часть резервуара — стальную стенку-мембрану. Хранимый продукт является несжимаемой жидкостью с постоянной плотностью. Граничные условия вводят запрет на перемещение днища и верхней кромки стенки, а влияние фундамента на сейсмическую реакцию резервуара не учитывается. Внутренняя часть резервуара смоделирована оболочечными конечными элементами (КЭ), наружная часть резервуара, днище и крыша — твердотельными КЭ [16, 17]. Разработанная конечно-элементная модель резервуара представлена на рисунке 1.

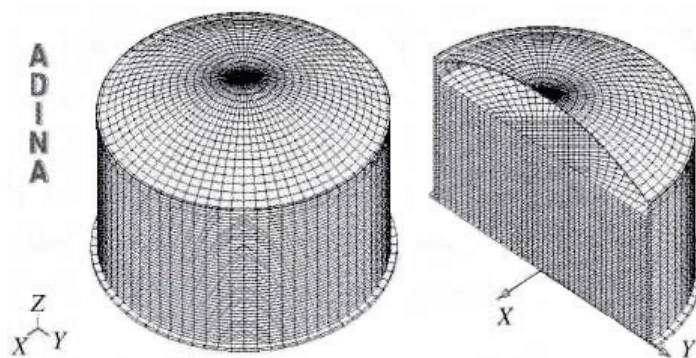


Рис. 1. Конечно-элементная модель резервуара в ПК ADINA

Экспериментальная часть

При проведении расчетов задавались следующие параметры: частота, равная 2 рад/с, и коэффициент сейсмичности, равный 0,05. Вычисления проводились при различных значениях форм-фактора (30; 5; 5,5) резиноканевых демпфирующих опор резервуара, влияющего на перемещение конструкции и ускорение хранимого продукта; коэффициента демпфирования (0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5). Путем изменения частоты и коэффициента демпфирования резиноканевых опор было исследовано влияние изоляционного покрытия и коэффициента демпфирования на сейсмостойкость резервуара для хранения СПГ [18–20].

Результаты расчетов в ПК ADINA при различных форм-коэффициентах резиноканевых опор

Часть резервуара	Форм-коэффициент	Максимальное перемещение, м	Максимальное ускорение, м/с ²	Эффект амортизации, %
Внутренняя	5	2,4695	8,4553	70,1
	5,5	2,2189	—	73,7
Наружная	5	1,9124	5,025	61,8
	5,5	1,7419	—	65,7

Результаты

По результатам расчета (таблица) в ПК ADINA для различных значений форм-фактора были получены графические зависимости максимального перемещения конструкции по высоте стенки резервуара и максимального ускорения хранимого продукта по высоте налива (рис. 2).

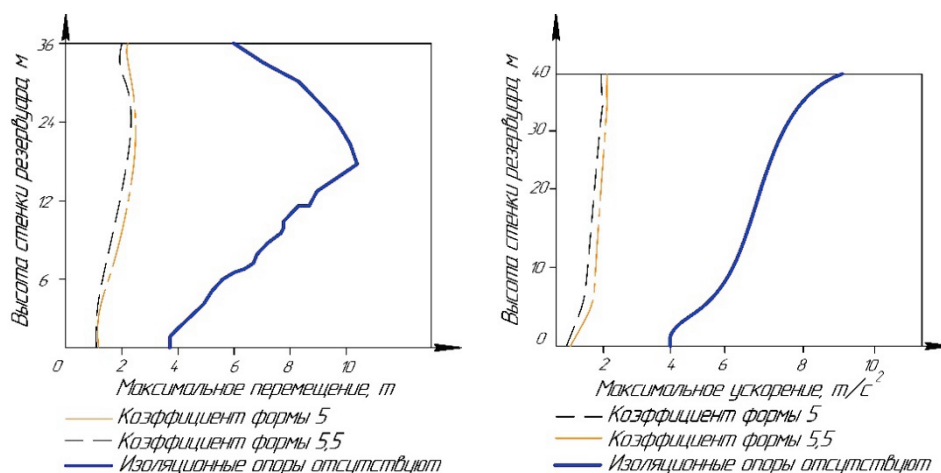


Рис. 2. Зависимости максимальных перемещений конструкции резервуара и максимального ускорения хранимого продукта по высоте стенки при различных форм-коэффициентах

Обсуждение

Анализ графиков, представленных на рисунке 2 показал, что градиент максимального ускорения хранимого продукта внутри резервуара принадлежит интервалу от 25 до 40 м, что соответствует максимальному перемещению конструкции резервуара. Кроме того, на высоте, соответствующей середине стен-

ки, перемещение относительно велико, чем в области верхнего пояса. Это связано с тем, что стенке резервуара (в ее срединной части) от хранимого сжиженного природного газа передается импульс, в то время как сила, влияющая на перемещение СПГ на уровне верхнего пояса стенки, относительно мала, поэтому перемещение конструкции в верхней части резервуара имеет тенденцию к уменьшению.

Также в результате анализа полученных зависимостей установлено, что при применении демпфирующих опор максимальные значения ускорения хранимого продукта и перемещения конструкции резервуара существенно ниже. Соответствующие кривые не имеют точек экстремума и близки к прямым, что свидетельствует об эффективности резиноктаневых опор в случае сейсмической активности. Как видно из таблицы, максимальное ускорение во внешней и внутренней частях резервуара после сейсмоизоляции значительно уменьшается (более чем на 60 %).

Выводы

Разработана численная модель резервуара для хранения СПГ объемом 150 тыс. м³ в программном комплексе ADINA, реализующем метод конечных элементов. Коэффициент демпфирования резиноктаневых опор оказывает значительное влияние на снижение сейсмической реакции резервуара. Чем больше коэффициент демпфирования, тем меньше ускорение хранимого продукта и перемещение конструкции, а влияние амортизирующего устройства на внутреннюю часть резервуара больше, чем на наружную.

Библиографический список

1. Xu Bo. Global energy development tendency and realistic choice of china energy structure adjustment // Coal Economic Research. – 2013. – № 33 (1). – P. 5–9.
2. Li Yang, Li Zili, Bi Jing. The study on frequency characteristics and isolation mechanism of isolated liquid storage tanks // World Earthquake Engineering. – 2009. – № 25 (4). – P. 117–124.
3. Сафарян М. К. Металлические резервуары и газгольдеры. – М.: Недра, 1987. – 200 с.
4. Фундаменты стальных резервуаров и деформации их оснований / П. А. Коновалов [и др.]; под ред. П. А. Коновалова. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2009. – 336 с.
5. Тарасенко А. А. Разработка научных основ методов ремонта вертикальных стальных резервуаров: дис. ... д-ра техн. наук. – Тюмень, 1999. – 299 с.
6. Zhou Fulin. Vibration control of engineering structure // Seismological Press. – 1997. – P. 24–25.
7. Baofeng Z., Haiying Y., Ruizhi W., Lili X. A new way of permanent displacement identification // China Civil Engineering Journal. – 2013. – № 46 (2). – P. 135–140.
8. Chen Yanhua, Liu Jianjun, Yuan Kang. Analysis on seismic dynamic response of base-isolated structures with laminated rubber bearings // Industrial Construction. – 2009. – № 39. – P. 289–294.
9. Исследование сейсмостойкости резервуара с применением линейно-спектрального метода / А. А. Тарасенко [и др.] // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 1. – С. 85–87. DOI: 10.24887/0028-2448-2018-1-85-87
10. Анализ сейсмостойкости вертикального стального резервуара РВСПК-50000 с использованием линейно-спектрального метода / Г. Г. Васильев [и др.] // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 10. – С. 120–123.
11. Анализ сейсмостойкости крупногабаритного резервуара РВС-20000 численным методом / А. А. Тарасенко [и др.] // Актуальные проблемы научного знания. Новые технологии ТЭК-2018: материалы II Междунар. науч.-практ. конф. – Тюмень, 2018. – С. 115–118.
12. Чепур П. В., Тарасенко А. А., Эсиева К. А. Исследование сейсмостойкости резервуара с применением линейно-спектрального метода // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе: материалы Национальной с междуна-

родным участием науч.-практ. конф. студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов, посвященной 10-летию создания Института промышленных технологий и инжиниринга / Отв. ред. А. Н. Халин. – Тюмень: ТИУ, 2018. – С. 181–185.

13. Вабищевич П. Н. Численные методы: вычислительный практикум. – М.: Ленанд, 2016. – 320 с.

14. Зарипов Р. С., Валяева Е. Р. Численные методы анализа. Приближение функций, дифференциальные и интегральные уравнения: учеб. пособие. – СПб.: Лань П, 2016. – 400 с.

15. Бате Н., Вилсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов: учебник / Пер. с англ. А. С. Алексеева и др. – М.: Стройиздат, 1982. – 448 с.

16. Филин А. П. Прикладная механика твердого деформируемого тела: сопротивление материалов с элементами теории сплошных сред и строительной механики. Т. 3. – М.: Наука, 1981. – 480 с.

17. Программирование, численные методы и математическое моделирование / И. Г. Семакин [и др.]. – М.: КноРус, 2018. – 288 с.

18. Луковский И. А., Пелькевич А. М. О движении жидкости в колеблющемся прямом круговом цилиндре // Сборник научных трудов института математики АН УССР. – Киев. 1985. – С. 3–11.

19. Золотенко Г. Ф. Компьютерное моделирование на основе уравнений Гамильтона нелинейных колебаний жидкости в цилиндрическом баке // Прикладна гідромеханіка. – 2003. – № 3. – С. 19–40.

20. Бирбраер А. Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость. – СПб.: Наука, 1998. – 255 с.

References

1. Xu Bo (2013). Global energy development tendency and realistic choice of china energy structure adjustment. Coal Economic Research, (33(1)), pp. 5-9. (In English).

2. Li Yang, Li Zili, & Bi Jing. (2009). The study on frequency characteristics and isolation mechanism of isolated liquid storage tanks. World Earthquake Engineering, (25(4)), pp. 117-124. (In English).

3. Safaryan, M. K. (1987). Metallicheskie rezervuary i gazgol'dery. Moscow, Nedra Publ., 200 p. (In Russian).

4. Konovalov, P. A., Mangushev, R. A., Sotnikov, S. N., Zemlyanskiy, A. A., & Tarasenko, A. A. (2009). Fundamenty stal'nykh rezervuarov i deformatsii ikh osnovaniy. Moscow, Izdatel'stvo Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov Publ., 336 p. (In Russian).

5. Tarasenko, A. A. (1999). Razrabotka nauchnykh osnov metodov remonta vertikal'nykh stal'nykh rezervuarov. Diss. dokt. tekhn. nauk. Tyumen, 299 p. (In Russian).

6. Zhou Fulin. (1997). Vibration control of engineering structure. Seismological Press, pp. 24-25. (In English).

7. Baofeng, Z., Haiying, Y., Ruizhi, W., & Lili, X. (2013). A new way of permanent displacement identification. China Civil Engineering Journal, (46(2)), pp. 135-140. (In English).

8. Chen Yanhua, Liu Jianjun, & Yuan Kang. (2009). Analysis on seismic dynamic response of base-isolated structures with laminated rubber bearings. Industrial Construction, (39), pp. 289-294. (In English).

9. Tarasenko, A. A., Chepur, P. V., Guan Youhai, & Gruchenkova, A. A. (2018). The research of seismic resistance of tank with linear-spectral method application. Oil Industry, (1), pp. 85-87. (In Russian). DOI: 10.24887/0028-2448-2018-1-85-87

10. Vasilyev, G. G., Tarasenko, A. A., Chepur, P. V., & Guan Youhai (2015). Seismic analysis of vertical steel tanks RVSPK-50000 using a linear-spectral method. Oil Industry, (10), pp. 120-123. (In Russian).

11. Tarasenko, A. A., Chepur, P. V., Guan Youhai, & Gruchenkova, A. A. (2018). Analiz seysmostoykosti krupnogabaritnogo rezervuara RVS-20000 chislennym metodom. Aktual'nye problemy nauchnogo znaniya. Novye tekhnologii TEK-2018: materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Tyumen, pp. 115-118. (In Russian).

12. Chepur, P. V., Tarasenko, A. A., & Esieva, K. A. (2018). Issledovanie seysmostoykosti rezervuara s primeneniem lineynno-spektral'nogo metoda. Energoberezhenie i innovatsionnye tekhnologii v toplivno-energeticheskom komplekse: materialy Natsional'noy s mezhdunarodnym uchastiem nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov, molodykh uchenykh i spet-

sialistov, posvyashchennoy desyatiletuyu sozdaniya Instituta promyshlennykh tekhnologiy i inzhiniringa. Tyumen, Industrial University of Tyumen Publ., pp. 181-185. (In Russian).

13. Vabishchevich, P. N. (2016). Chislennyye metody. Moscow, Lenand, 320 p. (In Russian).
14. Zaripov, R. S., & Valyaeva, E. R. (2016). Chislennyye metody analiza. Priblizhenie funktsiy, differentsial'nye i integral'nye uravneniya. St. Petersburg, Lan P Publ., 400 p. (In Russian).
15. Bathe, K.-J., & Wilson, E. L. (1943). Numerical methods in finite element analysis. Upper Saddle River, New Jersey, Prentice-Hall. (In English).
16. Filin, A. P. (1981). Prikladnaya mekhanika tverdogo deformiruемого tela: soprotivlenie materialov s elementami teorii sploshnykh sred i stroitel'noy mekhaniki. Tom 3. Moscow, Nauka, 480 p. (In Russian).
17. Semakin, I. G., Rusakova, O. L., Tarunin, E. L., & Shkaraputa, A. P. (2018). Programmirovaniye, chislennyye metody i matematicheskoe modelirovaniye. Moscow, KnoRus Publ., 288 p. (In Russian).
18. Lukovskiy, I. A., & Pel'kevich, A. M. (1985). O dvizhenii zhidkosti v koleblyushchemsya pryamom krugovom tsilindre. Sbornik nauchnykh trudov instituta matematiki AN USSR. Kiev, pp. 3-11. (In Russian).
19. Zolotenko, G. F. (2003). Komp'yuternoe modelirovaniye na osnove uravneniy Gamil'tona nelineynykh kolebaniy zhidkosti v tsilindricheskom bake. Prikladnaya gidromekhanika, (3), pp. 19-40. (In Russian).
20. Birbraer, A. N. (1998). Seismic analysis of structures. St. Petersburg, Nauka Publ., 255 p. (In Russian).

Сведения об авторах

Тарасенко Александр Алексеевич, д. т. н., профессор кафедры транспорта углеводородных ресурсов, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Чепур Петр Владимирович, к. т. н., доцент кафедры прикладной механики, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, e-mail: chepurpv@tyuiu.ru

Грученкова Аlesia Анатольевна, ассистент кафедры нефтегазового дела, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Information about the authors

Aleksandr A. Tarasenko, Doctor of Engineering, Professor at the Department of Transport of Hydrocarbon Resources, Industrial University of Tyumen

Petr V. Chepur, Candidate of Engineering Associate Professor at the Department of Applied Mechanics, Industrial University of Tyumen, e-mail: chepurpv@tyuiu.ru

Alesya A. Gruchenkova, Assistant at the Department of Oil and Gas Industry, Industrial University of Tyumen