

УДК 624.953

DOI [10.37153/2618-9283-2021-5-50-63](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2021-5-50-63)

Сейсмозащита и сейсмоизоляция зданий и сооружений

Реализация принципов сейсмоизоляции для эффективной сейсмозащиты нефтегазовых сооружений

Белаш Татьяна Александровна¹, Дымов Евгений Антонович²

^{1,2} Петербургский государственный университет путей сообщения Императора
Александра I. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация: На сегодняшний день в мировой практике сейсмостойкого строительства существует достаточно большое количество сведений о разрушениях резервуаров для хранения нефтегазовых продуктов. Для защиты таких сооружений за рубежом предлагается использование специальных средств сейсмозащиты, которые позволяют уменьшить разрушение конструкций резервуаров и сохранить хранимое в них топливо. Однако на территории России данные способы сейсмозащиты еще не получили широкого распространения. В статье представлено исследование вопросов применения сейсмоизоляции резервуаров для нефтегазовых продуктов в сейсмически активных районах.

Ключевые слова: Сейсмозащита резервуаров, нефтяной резервуар, газгольдер, сейсмоизоляционные опоры

Для цитирования: Белаш Т.А., Дымов Е.А. Реализация принципов сейсмоизоляции для эффективной сейсмозащиты нефтегазовых сооружений // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2021. № 5. С.50-63.

DOI: [10.37153/2618-9283-2021-5-50-63](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2021-5-50-63)

Seismic safety and seismic isolation of buildings

Implementation of the principles of seismic isolation for effective seismic protection of oil and gas facilities

Belash Tatiana Alexandrovna¹, Dymov Evgenii Antonovich²

^{1,2} Emperor Alexander I Petersburg State Transport University. Saint-Petersburg, Russian Federation

Abstract: Today, in the world practice of earthquake-resistant construction, there is a fairly large amount of information about the destruction of reservoirs for storing oil and gas products. To protect such structures abroad, it is proposed to use special means of seismic protection, which make it possible to reduce the destruction of tank structures and preserve the fuel stored in them. However, on the territory of Russia, these methods of seismic protection have not yet become widespread. This report presents research on the application of seismic isolation of reservoirs for oil and gas products in seismically active regions.

@ Белаш Т.А., Дымов Е.А., 2021

Keywords: Seismic protection of tanks, oil tank, gas tank, seismic isolation supports

For citation: Belash T. A., Dymov E.A. Implementation of the principles of seismic isolation for effective seismic protection of oil and gas facilities. *Seismostoitkoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii* = *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2021, no. 5, pp. 50-63. (In Russian) DOI: [10.37153/2618-9283-2021-5-50-63](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2021-5-50-63)

Нефтегазовую промышленность можно считать одной из главных отраслей топливно-энергетического комплекса, оказывающей существенное влияние на экономику страны. Она тесно связана со многими отраслями промышленности. За последние годы ежегодная добыча нефти на территории России составляет более 500 млн тонн, а добыча природного газа более 700 млрд м³ [1], транспортировка этого сырья осуществляется по трубопроводам к местам его потребления, а хранение происходит в специальных емкостных сооружениях. Для хранения нефтяных продуктов используют резервуары, а для хранения различных газов – газгольдеры. Эти сооружения обеспечивают непрерывную работу энергетических, химических, нефтегазовых, гидротехнических объектов и других предприятий. Резервуары для хранения нефтегазовых продуктов имеют повышенный уровень ответственности и являются особо опасными и технически сложными объектами. Неправильная их эксплуатация может вызвать серьезные аварии, которые влекут за собой угрозу жизни и здоровью людей, материальные убытки и серьезные экологические катастрофы. При проектировании и эксплуатации таких сооружений следует учитывать особые условия района, среди которых могут быть просадочные грунты, вечная мерзлота и сейсмическая активность.

Как известно на территории России встречаются сейсмоопасные зоны, в которых интенсивность землетрясений может достигать более 8 баллов [2]. Такие природные воздействия сильно сказываются на безаварийной эксплуатации резервуаров и безопасном хранении нефтегазовых продуктов, нарушение работы которых может привести к крупным авариям. Большое количество аварий, произошедших на нефтегазовых предприятиях при землетрясениях, подтверждают значимость данного вопроса. Поэтому защита емкостных сооружений во время сейсмической активности является одним из важных вопросов с точки зрения сейсмостойкого строительства.

Резервуары для хранения нефти и газа имеют большое количество конструктивных решений [3, 4], которые учитывают тип хранимого топлива, его количество, температуру и давление. В зависимости от этих параметров сооружения имеют различные конструктивные особенности. В данной статье рассматривается небольшая часть таких резервуаров, а именно стальные цилиндрические резервуары для хранения жидких нефтепродуктов и изотермические газгольдеры для хранения сжиженного природного газа (СПГ).

Цилиндрические резервуары для хранения нефти по конструктивным особенностям разделяют на [5]:

- резервуар со стационарной крышей без понтона (РВС) (рис.1, а);
- резервуар со стационарной крышей с понтоном (РВСП) (рис.1, б);
- резервуар с плавающей крышей (РВСПК) (рис. 1, в).

Эти сооружения предназначены для хранения топлива объемом от 100 до 120000 м³.

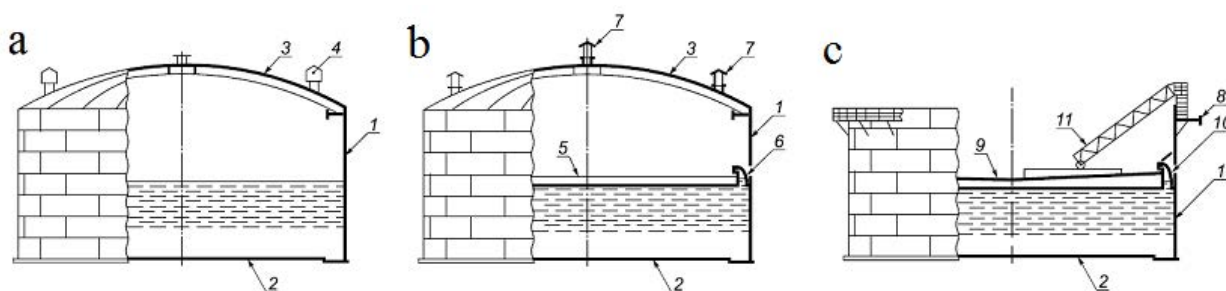


Рисунок 1 – Схемы стальных цилиндрических резервуаров [5]:

а – резервуар со стационарной крышей без понтона; б – резервуар со стационарной крышей с понтоном; в – резервуар с плавающей крышей

Figure 1 – Diagrams of steel cylindrical tanks [5]:

а – a tank with a fixed roof without a pontoon; б – a tank with a fixed roof with a pontoon; в – a tank with a floating roof;

1 – wall; 2 – bottom; 3 – fixed roof; 4 – breathing valve; 5 – pontoon; 6 – sealing gate; 7 – ventilation opening; 8 – wind ring; 9 – floating roof; 10 – sealing gate with weatherproof visor; 11 – rolling ladder

Изотермические газгольдеры предназначены для хранения газов под низкими отрицательными температурами, это позволяет сжать газ примерно в 600 раз [6]. Их конструкции представляют сложную многослойную систему, включающую в себя первичный резервуар, теплоизоляцию и вторичный резервуар. Различают несколько типов таких резервуаров, различающихся материалом и количеством оболочек, один из которых представлен на рисунке 2 [7, 8].

Землетрясения различной силы и интенсивности могут привести к частичным или полным разрушениям конструкций резервуаров. Наиболее типичными повреждениями цилиндрических резервуаров являются:

- смятие стенки резервуара;
- разрушение стенки резервуара;
- разрушение крыши резервуара;
- разрушение днища резервуара;
- сдвиг и опрокидывание резервуара;
- разрушение анкерных креплений.

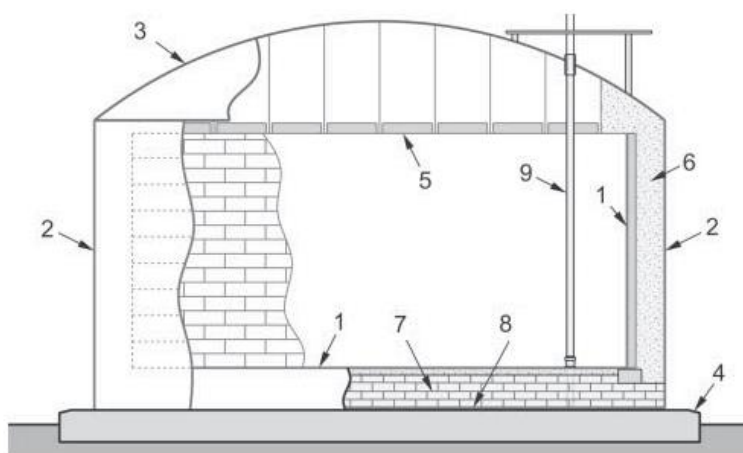


Рисунок 2 – Схема газгольдера для СПГ закрытого типа [7]:

- 1 – первичный металлический (9 % Ni) контейнер; 2 – вторичный стальной контейнер;
 3 – крыша с пароизоляцией (низкотемпературная сталь); 4 – бетонный фундамент;
 5 – подвесная крыша с изоляцией; 6 – перлитовая изоляция (межстенное пространство);
 7 – утеплитель (пеностекло); 8 – днище первого контейнера (низкотемпературная сталь);
 9 – насосная колонна

Figure 2 – Diagram of a closed-type LNG gas tank [7]:

- 1 – primary metal (9% Ni) container; 2 – secondary steel container; 3 – roof with vapor barrier (low-temperature steel); 4 – concrete foundation; 5 – suspended roof with insulation;
 6 – perlite insulation (inter-wall space); 7 – insulation (foam glass); 8 – bottom of the first container (low-temperature steel); 9 – pump column

При высокочастотном землетрясении может возникнуть два типа деформации стенки резервуара – «ромбовая» деформация и «слоновья нога». «Ромбовая» деформация возникает при малом кольцевом напряжении и сильном вертикальном, которое вызвано опрокидывающим моментом и другими вертикальными нагрузками. Стенка резервуара изгибается внутрь и возникают складки по её окружности (рис. 3). Этот вид деформации встречается в резервуарах с большим отношением высоты к радиусу [9].



Рисунок 3 – «Ромбовая» деформация небольшого резервуара. Кобе, Япония, 1995 г. [10]

Figure 3 – "Diamond" deformation of a small tank. Kobe, Japan, 1995 [10]

Деформация «слоновья нога» в резервуарах цилиндрической формы проявляется в опорной части (рис. 4). При действии сейсмической нагрузки на сооружение возникает опрокидывающий момент. С одной стороны сооружения происходит потеря устойчивости нижнего пояса стенки резервуара за счет сжатия боковой стенки о днище. А с другой стороны сооружения происходит отрыв днища и срыв анкерных закреплений [10-15].

В более критических случаях при сильных пластических деформациях может произойти разрушение уторного шва резервуара и начаться разлив топлива, при этом возрастает риск его возгорания. В качестве примера возможных последствий такого разрушения можно привести аварию, произошедшую в Норильске в мае 2020 года. Разрушение резервуара и разлив топлива произошли не вследствие сейсмических воздействий, однако и при землетрясениях возможны похожие повреждения.

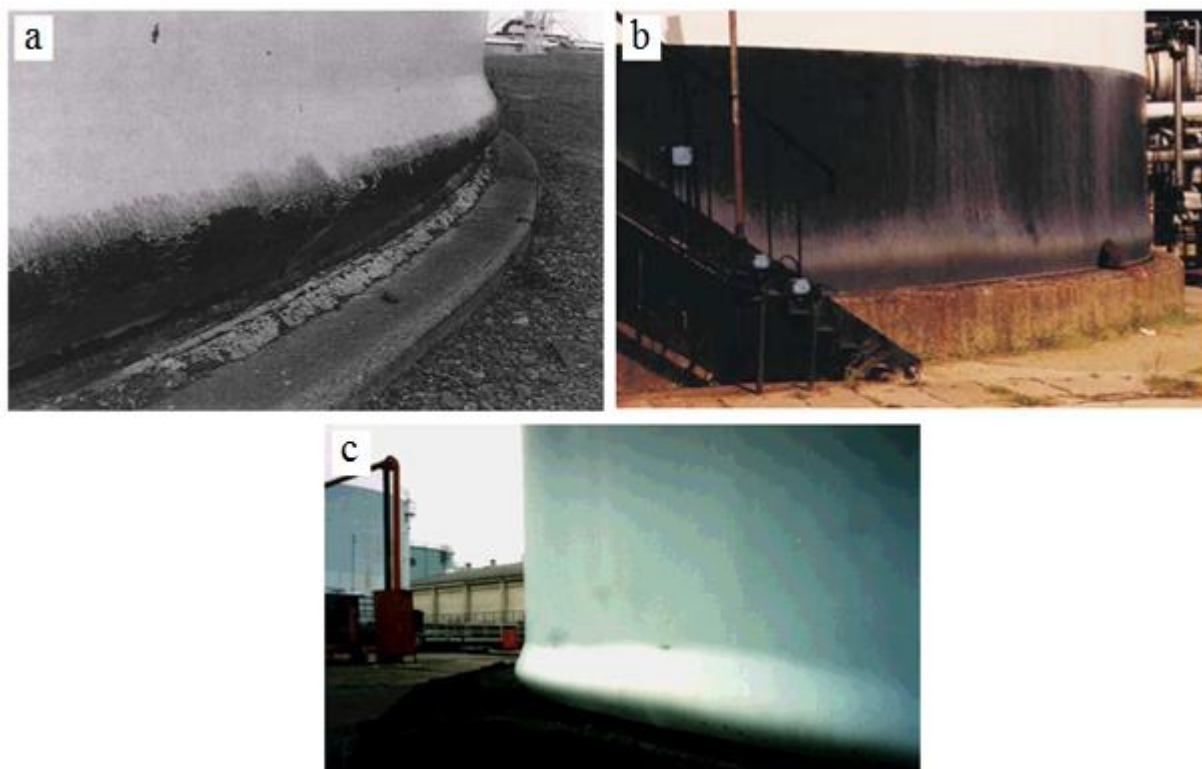


Рисунок 4 – Деформация стенки резервуара «слоновья нога» [10, 12, 13]:

а – Землетрясение Лома-Приета в Сан-Франциско, США, 1989 г.; б – Коджаэли, Турция, 1999 г.; в – Кобе, Япония, 1995 г.

Figure 4 – Deformation of the wall of the elephant's foot reservoir [10, 12, 13]:

а – The Loma Prieta earthquake in San Francisco, USA, 1989; б – Kocaeli, Turkey, 1999; в – Kobe, Japan, 1995

При низкочастотном землетрясении может произойти всплеск жидкости в резервуаре. В резервуарах со стационарной крышей волна жидкости может достигнуть уровня крыши, в этом случае в соединении крыши и стенки резервуара увеличивается внутреннее давление и происходит изгиб. В этот момент увеличивается избыточное давление газа из-за воспламеняющихся паров легковоспламеняющейся жидкости (рис. 5) [10].



Рисунок 5 – Сгоревший резервуар со стационарной крышей. Коджаэли, Турция, 1999 г. [16]

Figure 5 – A burnt-out tank with a fixed roof. Kocaeli, Turkey, 1999 [16]

В резервуарах с плавающей крышей при низкочастотных землетрясениях может произойти деформация и разрушение крыши из-за волны жидкости. Возгорание топлива происходит от искр, возникающих из-за трения конструкций плавающей крыши и стенок резервуара. Воспламенение всего топлива может произойти в случае, если плавающая крыша полностью разрушена и погрузилась на дно резервуара (рис. 6). Тушение таких пожаров не всегда бывает эффективным, тушение происходит, когда топливо полностью сгорает, это занимает несколько дней [10].

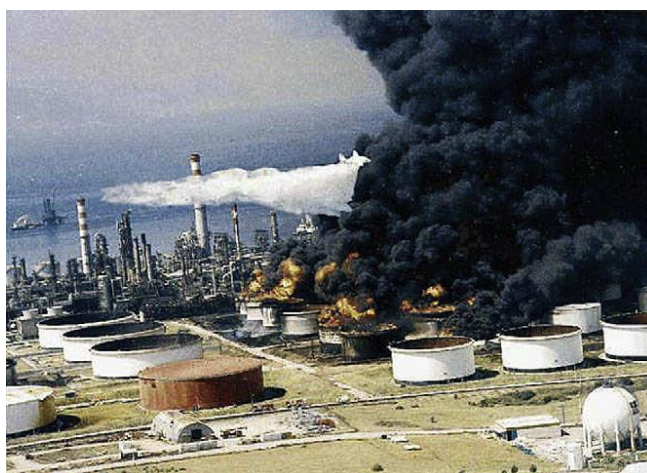


Рисунок 6 – Пожар в резервуарном парке после землетрясения. Коджаэли, Турция, 1999 г. [17]

Figure 6 – Fire in the tank farm after an earthquake. Kocaeli, Turkey, 1999 [17]

Зачастую резервуарные парки строятся в прибрежной зоне, где организуют терминалы приема нефти. В таких зонах в сейсмически активных районах возможно появление цунами. Если резервуар частично заполнен или полностью пустой, цунами может смыть его с фундамента. Полный резервуар волна не смывает, однако сильно повредит его корпус.

Данных о разрушениях резервуаров от цунами на сегодняшний день немного, однако крупные цунами в Японии в 2011 году и на Аляске в 1964 году дают возможность получить больше информации о возможных разрушениях конструкций резервуаров.

В Японии из-за большого цунами и площади затопления произошли разрушения резервуаров за счет гидродинамических сил воды и размыва фундамента (рис. 7) [10]. Действие воды привело к смытию и перемещению резервуаров, а также разрыву трубопроводов, вследствие этого произошел разлив топлива и пожар (рис. 8-9).

На Аляске в Уиттере во время Великого Аляскинского землетрясения произошло возгорание резервуаров из-за действия цунами (рис. 10).

Вопросам обеспечения сейсмостойкости объектов нефтегазового комплекса на сегодняшний день посвящено значительное количество исследований [20-25]. Зарубежная практика сейсмостойкого строительства показывает, что использование специальных средств сейсмозащиты позволяет значительно уменьшить риски повреждений не только объектов гражданского назначения, но и промышленного, таких как резервуары. Однако в России практически отсутствуют проекты сейсмоизолированных емкостных сооружений в виду отсутствия нормативных рекомендаций. При значительном количестве исследований, посвященных этой тематике, вопросы использования сейсмоизоляции до настоящего времени недостаточно изучены и реализуются лишь на предпроектных уровнях.

Для оценки эффективности принципов сейсмоизоляции были проведены расчетно-теоретические исследования в программно-вычислительном комплексе (ПВК) SCAD. Исследования проводились на простейших моделях резервуаров, спроектированных с помощью плоских конечных элементов. Были выбраны резервуары для хранения СПГ и нефти.

Газгольдер для хранения СПГ запроектирован в виде цилиндрического резервуара (рис. 11), внешняя оболочка которого выполнена из железобетона толщиной 1 м, высотой 48 м и диаметром 86 м. Внутренняя емкость выполнена из никелевой стали толщиной 16 мм. Фундамент запроектирован в виде свайного поля.

Резервуар для хранения нефти – цилиндрический резервуар со стационарной крышей без понтона объемом 5000 м³ (рис. 12). Стенки резервуара выполнены из металлических листов толщиной 10 мм, диаметр сооружения составляет 22,8 м, а высота стенок 12 м. Фундаменты в виде свайного поля.



Рисунок 7 – Опрокинутый цунами резервуар. Япония, 2011 г. [10]

Figure 7 – Overturned tsunami reservoir.
Japan, 2011 [10]



Рисунок 8 – Резервуар, разрушенный цунами. Япония, 2011 г. [18]

Figure 8 – A reservoir destroyed by a
tsunami. Japan, 2011 [18]



Рисунок 9 – Сгоревшие резервуары после цунами. Япония, 2011 г. [18]

Figure 9 – Burnt tanks after the tsunami. Japan, 2011 [18]



Рисунок 10 – Горящие резервуары. Уиттер, Аляска. 1964 г. [19]

Figure 10 – Burning tanks. Witter, Alaska. 1964 [19]

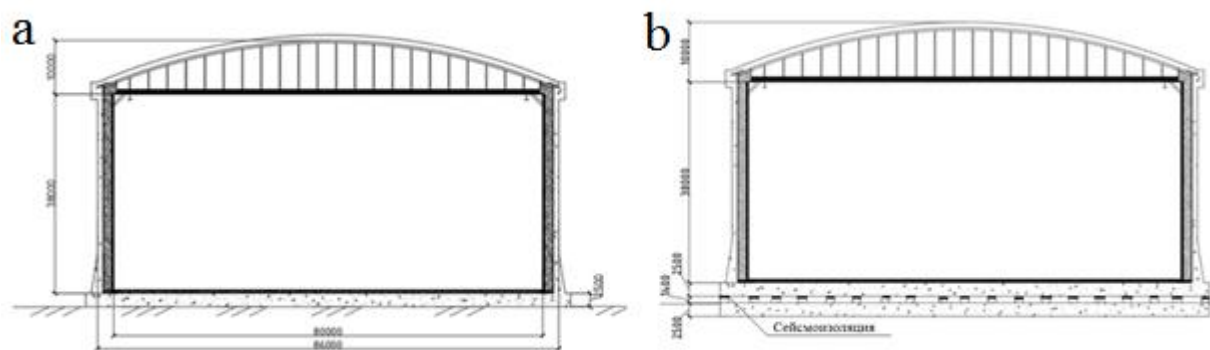


Рисунок 11 – Схема газгольдера для хранения СПГ:
а – без сейсмоизоляции; б – с сейсмоизоляцией

Figure 11 – Scheme of a gas tank for LNG storage:
a – without seismic isolation; b – with seismic isolation

В качестве сейсмоизоляции были выбраны резинометаллические опоры, характеристики которых принимались по каталогу компании FIP Industriale и задавались в программе с помощью функции «Ввод упругой связи». Характеристики резинометаллических опор представлены в таблице 1.

В расчете учтены различные сочетания нагрузок, однако были приняты некоторые допущения – не учитывалось влияние грунта, свайное поле задавалось жесткими связями, топливо учитывалось в виде гидростатической нагрузки и возможный его всплеск не учитывался. Результаты расчета сведены в таблицы 2-4.

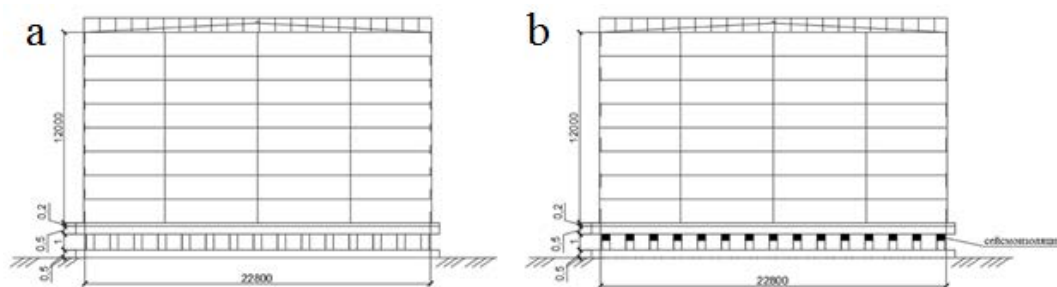


Рисунок 12 – Схема резервуара для нефти:
а – без сейсмоизоляции; б – с сейсмоизоляцией

Figure 12 – The scheme of the oil tank:
a - without seismic isolation; b - with seismic isolation

Таблица 1 – Характеристики опор

Table 1 – Characteristics of the supports

Маркировка опоры	Эффективная горизонтальная жесткость, т/м	Вертикальная жесткость, т/м	Применение
LRB-SN 1200/209-215	497	468500	Газгольдер для СПГ
LRB-SN 600/102-120	255	209100	Резервуар для нефти

Таблица 2 – Перемещения элементов газгольдера СПГ

Table 2 – Movements of LNG gas tank elements

Оси	Значения перемещений							
	Перемещения в верхней части стенки, мм							
	С сейсмоизоляцией				Без сейсмоизоляции			
X	-264,24	-263,57	-264,22	-262,02	-13,54	-10,68	-13,56	-10,89
Y	-187,53	-187,54	-185,88	-187,55	2,86	3,95	2,78	3,69
Перемещения в нижней части стенки, мм								
С сейсмоизоляцией					Без сейсмоизоляции			
X	-225,52	-229,12	-225,7	-227,54	-2,31	-3,69	-2,37	-4,14
Y	-162,8	-160,86	-161,42	-160,51	0,67	0,49	0,55	0,61

Таблица 3 – Перемещения элементов резервуара для нефти

Table 3 – Movements of elements of the oil tank

Оси	Значения перемещений							
	Перемещения в верхней части стенки, мм							
	С сейсмоизоляцией				Без сейсмоизоляции			
X	-224,35	-224,19	-224,34	-224,18	-113,14	-112,99	-113,14	-112,99
Y	3,37	3,38	3,37	3,38	0,93	0,93	0,93	0,93
	Перемещения в нижней части стенки, мм							
	С сейсмоизоляцией				Без сейсмоизоляции			
X	-110,09	-110,1	-110,09	-110,09	-9,99	-9,99	-9,99	-9,99
Y	1,65	1,66	1,66	1,66	0,08	0,08	0,08	0,08

Таблица 4 – Значения внутренних напряжений

Table 4 – Values of internal stresses

Резервуар	Параметр	С сейсмоизоляцией	Без сейсмоизоляции
Газгольдер для СПГ	$N_{max}, T/m^2$	1428,86	6977,43
	$N_{min}, T/m^2$	-1755,91	-7946,82
Резервуар для нефти	$N_{max}, T/m^2$	577,85	619,86
	$N_{min}, T/m^2$	-671,59	-708,32

Расчетный анализ показывает, что использование сейсмоизоляции позволяет снизить внутренние напряжения в конструкциях, однако ее применение значительно увеличивает перемещения в конструкциях резервуаров.

Заключение

При проектировании и эксплуатации резервуаров следует учитывать особые условия района, среди которых наиболее опасными являются сейсмические нагрузки. Землетрясения различной силы и интенсивности могут привести к частичным или полным разрушениям конструкции резервуаров.

Частотный характер землетрясения влияет на поведение резервуара.

При высокочастотном землетрясении основная нагрузка приходится на корпус сооружения, вследствие чего возникает опрокидывающий момент и происходит деформация стенок резервуара.

При низкочастотных землетрясениях из-за действия горизонтальных воздействий топливо в резервуаре начинает раскачиваться. Волна может повредить внутренние конструкции резервуаров, из-за чего возникает пожар, ликвидация которого может занять несколько дней.

Выполненные исследования показали, что использование специальных средств сейсмозащиты позволяет обеспечить сейсмостойкость рассматриваемых сооружений. При этом кроме гибких опор должны быть включены элементы ограничения опасных перемещений, которые возникают при низкочастотных сейсмических воздействиях.

Список литературы

1. Enerdata: Статистический ежегодник мировой энергетики 2020. URL: <https://yearbook.enerdata.ru/natural-gas/world-natural-gas-production-statistics.html>.
2. СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах: Актуализированная редакция СНиП II-7-81*. Москва, Стандартинформ. 2018. 122 с.
3. Веревкин С.И., Корчагин В. А. Газгольдеры. Москва: Издательство литературы по строительству. 1966. 239 с.
4. Едигаров С.Г., Бобровский С.А. Проектирование и эксплуатация нефтебаз и заохранилищ. М., «Недра». 1973, 180 с.
5. ГОСТ 31385-2016. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия. Москва, Стандартинформ. 2016. 98 с.
6. Костюков В., Шкода С. Разновидности газового топлива и их основные характеристики // Сфера. Нефть и газ. 2017. № 58. С. 58-66.
7. Rötzer J. Design and Construction of LNG Storage Tanks. Berlin, Germany: Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, 2020. 122 p.
8. Yang Y., Kim J., Seo H. Development of the world's largest above-ground full containment LNG storage tank. 23rd World Gas Conference. Amsterdam, 2006, pp. 1-14.
9. Saha S.K., Matsagar V.A. (2015) Reliability of Base-Isolated Liquid Storage Tanks under Horizontal Base Excitation. In: Kadry S., El Hami A. (eds) Numerical Methods for Reliability and Safety Assessment. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-07167-1_10
10. S. Yoshida, "Earthquake Damages and Disaster Prevention of Aboveground Storage Tanks", EPI International Journal of Engineering, vol. 1, no. 2, pp. 87-93, Nov. 2018
11. СТО-СА-03-002-2009. Правила проектирования, изготовления и монтажа вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов. Москва: Ростехэкспертиза. 2009. 61 с.
12. D. Whittaker. Seismic design of storage tanks, 2009: New Zealand Society for Earthquake Engineering, 2009. 177 p.
13. Rotter, J. M. (2006). Elephant's foot buckling in pressurised cylindrical shells. Stahlbau, 75(9), 742–747. doi:10.1002/stab.200610079
14. Malhotra, P. K., Wenk, T., & Wieland, M. (2000). Simple Procedure for Seismic Analysis of Liquid-Storage Tanks. Structural Engineering International, 10(3), 197–201. doi:10.2749/101686600780481509
15. Шигапов Р.Р., Ковальчук О.А. Обзор характерных аварий вертикальных цилиндрических резервуаров в результате землетрясений. Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2018. №1. С. 14-19.
16. Manser, W. S., Touati, M., & Barros, R. C. (2017). The maximum sloshing wave height evaluation in cylindrical metallic tanks by numerical means. MATEC Web of Conferences, 95, 17005. doi:10.1051/mateconf/20179517005
17. Korkmaz, K. A., Sari, A., & Carhoglu, A. I. (2011). Seismic risk assessment of storage tanks in Turkish industrial facilities. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 24(4), 314–320. doi:10.1016/j.jlp.2011.01.003
18. Krausmann, E., & Cruz, A. M. (2013). Impact of the 11 March 2011, Great East Japan earthquake and tsunami on the chemical industry. Natural Hazards, 67(2), 811–828. doi:10.1007/s11069-013-0607-0
19. The Atlantic. 1964: Alaska's Good Friday Earthquake URL: <https://www.theatlantic.com/photo/2014/05/1964-alaskas-good-friday-earthquake/100746/>

20. Stefano Barone, Mauro Sartori. Seismic isolation of LNG storage tanks in Italy with curved surface sliders. Conference: 17th World Conference on Earthquake Engineering, 17WCEE. Sendai, Japan. 2020.
21. Saha, S., Matsagar, V. and Jain, A. (2013) Comparison of base-isolated liquid storage tank models under bi-directional earthquakes. *Natural Science*, 5, 27-37. doi: 10.4236/ns.2013.58A1004.
22. Baumann, T., & Böhrer, J. (2001). Seismic Design for Base-Isolated LNG-Storage-Tanks. *Structural Engineering International*, 11(2), 139–144. doi:10.2749/101686601780347165
23. Alhan, C, Gazi, H, Guler, E. Influence of isolation system characteristic strength on the earthquake behavior of base-isolated liquid storage tanks. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*. 2018. 25(4):346-352.
24. Zhou, Y., Li, X., & Chen, Z. (2018). Seismic Responses Analysis of Base-Isolated LNG Storage Tank. *Proceedings of GeoShanghai 2018 International Conference: Advances in Soil Dynamics and Foundation Engineering*, 331–339. doi:10.1007/978-981-13-0131-5_36
25. Nikomanesh, M. R., Moeini, M., & Goudarzi, M. A. (2019). An innovative isolation system for improving the seismic behaviour of liquid storage tanks. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. doi:10.1016/j.ijpvp.2019.04.012

References

1. Enerdata: Statistical Yearbook of World Energy 2020. URL: <https://yearbook.enerdata.ru/natural-gas/world-natural-gas-production-statistics.html>.
2. SP 14.13330.2018. Stroitelstvo v seismicheskikh raionakh: Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP II s-7-81* [Construction in seismic areas: Updated version of SNiP II with-7-81*] . Moscow, Standartinform, 2018. 122 p.
3. Verevkin S.I., Korchagin V. A. Gazgoldery [Gas tanks]. Moscow: Publishing House of Literature on Construction, 1966. 239 p.
4. Edigarov S.G., Bobrovsky S.A. Proektirovaniye i ekspluatatsiya neftebaz i zazokhranilishch [Design and operation of oil depots and storage facilities]. M., "Nedra", 1973, 180 p.
5. GOST 31385-2016. Rezervuary vertikalnye tsilindricheskie stalnye dlia nefti i nefteproduktov. Obshchie tekhnicheskie usloviya [Vertical cylindrical steel tanks for oil and petroleum products. General technical conditions]. Moscow, Standartinform, 2016. 98 p.
6. Kostyukov V., Skoda S. Raznovidnosti gazovogo topliva i ikh osnovnye kharakteristiki [Varieties of gas fuel and their main characteristics] // Sphere. Oil And Gas. 2017. No. 58. Pp. 58-66
7. Rötzer J. Design and Construction of LNG Storage Tanks. Berlin, Germany: Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, 2020. 122 p.
8. Yang Y., Kim J., Seo H. Development of the world's largest above-ground full containment LNG storage tank. – 23rd World Gas Conference. Amsterdam, 2006, pp. 1-14.
9. Saha S.K., Matsagar V.A. (2015) Reliability of Base-Isolated Liquid Storage Tanks under Horizontal Base Excitation. In: Kadry S., El Hami A. (eds) *Numerical Methods for Reliability and Safety Assessment*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-07167-1_10
10. S. Yoshida, "Earthquake Damages and Disaster Prevention of Aboveground Storage Tanks", *EPI International Journal of Engineering*, vol. 1, no. 2, pp. 87-93, Nov. 2018
11. STO-SA-03-002-2009 . Pravila proektirovaniya, izgotovleniya i montazha vertikalnykh tsilindricheskikh stalnykh rezervuarov dlia nefti i nefteproduktov [Rules for the design, manufacture and installation of vertical cylindrical steel tanks for oil and petroleum products]. Moscow: Rostekhpertiza, 2009. 61 p.

12. D. Whittaker. Seismic design of storage tanks, 2009 : New Zealand Society for Earthquake Engineering, 2009. 177 p.
13. Rotter, J. M. (2006). Elephant's foot buckling in pressurised cylindrical shells. Stahlbau, 75(9), 742–747. doi:10.1002/stab.200610079
14. Malhotra, P. K., Wenk, T., & Wieland, M. (2000). Simple Procedure for Seismic Analysis of Liquid-Storage Tanks. Structural Engineering International, 10(3), 197–201. doi:10.2749/101686600780481509
15. Shigapov R.R., Kovalchuk O.A. Obzor kharakternykh avarii vertikalnykh tsilindricheskikh rezervuarov v rezultate zemletriasenii. Seismostoikoe stroitelstvo. Bezopasnost sooruzhenii [Review of characteristic accidents of vertical cylindrical reservoirs as a result of earthquakes]. Earthquake engineering. Construction safety. 2018, no. 1, pp. 14-19.
16. Manser, W. S., Touati, M., & Barros, R. C. (2017). The maximum sloshing wave height evaluation in cylindrical metallic tanks by numerical means. MATEC Web of Conferences, 95, 17005. doi:10.1051/mateconf/20179517005
17. Korkmaz, K. A., Sari, A., & Carhoglu, A. I. (2011). Seismic risk assessment of storage tanks in Turkish industrial facilities. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 24(4), 314–320. doi:10.1016/j.jlp.2011.01.003
18. Krausmann, E., & Cruz, A. M. (2013). Impact of the 11 March 2011, Great East Japan earthquake and tsunami on the chemical industry. Natural Hazards, 67(2), 811–828. doi:10.1007/s11069-013-0607-0
19. The Atlantic. 1964: Alaska's Good Friday Earthquake URL: <https://www.theatlantic.com/photo/2014/05/1964-alaskas-good-friday-earthquake/100746/>
20. Stefano Barone, Mauro Sartori. Seismic isolation of LNG storage tanks in Italy with curved surface sliders. Conference: 17th World Conference on Earthquake Engineering, 17WCEE. Sendai, Japan. 2020.
21. Saha, S., Matsagar, V. and Jain, A. (2013) Comparison of base-isolated liquid storage tank models under bi-directional earthquakes. Natural Science, 5, 27-37. doi: 10.4236/ns.2013.58A1004.
22. Baumann, T., & Böhrer, J. (2001). Seismic Design for Base-Isolated LNG-Storage-Tanks. Structural Engineering International, 11(2), 139–144. doi:10.2749/101686601780347165
23. Alhan, C, Gazi, H, Guler, E. Influence of isolation system characteristic strength on the earthquake behavior of base-isolated liquid storage tanks. Indian Journal of Engineering and Materials Sciences. 2018. 25(4):346-352.
24. Zhou, Y., Li, X., & Chen, Z. (2018). Seismic Responses Analysis of Base-Isolated LNG Storage Tank. Proceedings of GeoShanghai 2018 International Conference: Advances in Soil Dynamics and Foundation Engineering, 331–339. doi:10.1007/978-981-13-0131-5_36
25. Nikomanesh, M. R., Moeini, M., & Goudarzi, M. A. (2019). An innovative isolation system for improving the seismic behaviour of liquid storage tanks. International Journal of Pressure Vessels and Piping. doi:10.1016/j.ijpvp.2019.04.012

Информация об авторах / Information about authors

Белаш Татьяна Александровна, д.т.н., профессор. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Tatiana A. Belash, D.Sc. (Technology), Professor. Saint-Petersburg, Russian Federation

Дымов Евгений Антонович, аспирант кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения», Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Evgenii A. Dymov, Postgraduate at the Department of «Building structures, buildings and structures», Emperor Alexander I Petersburg State Transport University