

Р. Р. ШИГАПОВ
кафедра «Строительной и теоретической механики», аспирант

О. А. КОВАЛЬЧУК
кандидат технических наук, доцент, директор ИФО НИУ МГСУ

**ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет»**

УДК 624.04+699.842

АНАЛИЗ ПОВРЕЖДЕНИЙ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ ВО ВРЕМЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Развитие нефтегазовой отрасли приводит к большому количеству строящихся резервуаров для хранения жидкостных продуктов в сейсмоопасных районах. В результате землетрясений вертикальные цилиндрические резервуары получают разного рода повреждения. В статье рассмотрены основные типы повреждений, причины и характерные особенности их появления для разных типов резервуарных конструкций, а также предложена классификация повреждений в соответствии с двумя уровнями оценки последствий землетрясений, принятыми в отечественных нормативных документах. По результатам анализа выявлены факторы, которые необходимо учесть при разработке единой расчетной методики для резервуаров на сейсмические воздействия.

Ключевые слова: резервуар, землетрясения, аварии, сейсмостойкость.

Введение

В современной мировой экономике и в РФ нефтегазовая отрасль является одной из важнейших для развития промышленных регионов. Возрастающие темпы роста строительства объектов нефтегазовой индустрии приводят к тому, что все больше таких сооружений появляется на территориях со значительной сейсмичностью. Наибольшую трудность для расчета, с учетом сейсмических воздействий, вызывают

сооружения с оболочечными конструкциями, такие, например, как наземные вертикальные шаровые и цилиндрические резервуары для хранения нефти и газа.

Факторы сейсмической опасности и получаемые повреждения для разных конструкций резервуаров разнятся. Основные типы применяемых конструкций приведем ниже в таблице 1.

Помимо индивидуальных особенностей конструкций необходимо также учесть, что фундаменты резервуаров могут быть свайными на монолитном ростверке, представлять собой уложенную на основание железобетонную плиту, а также резервуар может быть уложен прямо на песчаное основание.

Повреждения резервуаров

Мировой опыт резервуаростроения накопил достаточно большое количество данных о поведении резервуаров во время землетрясений.

По результатам наблюдений за землетрясениями Ниигата, Мияги, Нихонкай-Тюбу, Токати-Оки, Керн Каунти, Великое Аляскинское, Сан-Фернандо и Лима приведена таблица с характерными повреждениями в зависимости от объема нефтяных резервуаров [15]. Отмечено, что пустые резервуары практически не получали повреждений.

Типичные повреждения резервуаров во время землетрясений можно условно подразделить на два типа в соответствии с двумя уровнями расчета, заложенными в

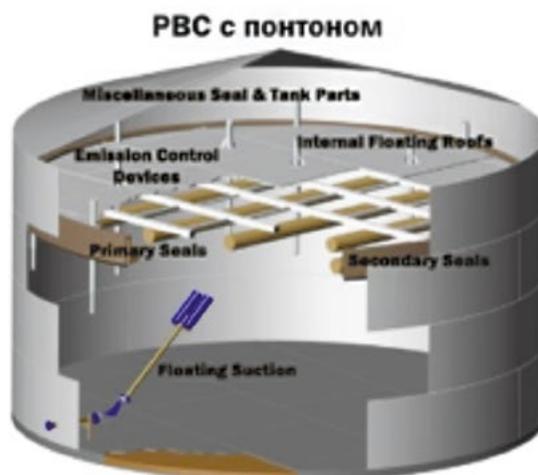
**Таблица 1** — Разновидности конструкций резервуаров

№	Продукт	Тип р-ра	Объемы, м ³	Внутреннее давление	Стенка	Крыша
1	Нефть и нефтепродукты с 26,6 кПа < Рн.п. < 93,3 кПа	РВСПК	50 000 – 100 000	отсутствует	С	плавающая
2		РВСП	100 – 50 000	низкое	С	стац. + понтон
3		РВС с УЛФ или ГО	100 – 50 000	низкое, до 2 кПа	С	стационарная
4	Нефть и нефтепродукты с Рн.п. < 26,6 кПа, светлые нефтепродукты	РВС	100 – 50 000	низкое, до 2 кПа	С	стационарная
5	Нефть и нефтепродукты	РГС	3 – 100	среднее, 40-70 кПа	С	–
6	Низкокипящие нефтепродукты, СУГ, СПГ, аммиак	ВЦИР	700 – 30 000	среднее, 10-30 кПа	С+Э/П	стационарная
7		ВЦИР полной герметизации	30 000 – 200 000	среднее, 10-30 кПа	С+Н+Ж	стац.+подвесная стац.+стац.
8		ВЦИР полной герметизации	5 000 – 60 000	среднее, 10-30 кПа	С+Н+С	стац.+подвесная стац.+стац.
9	СПГ	Мембранный ИР	2000 – 200 000	среднее, 10-30 кПа	М+Н+С	стац.+подвесная
10	СПГ, кислород, азот, аргон	РЦГ	50 – 250	высокое, до 500 кПа	С	–
11	Низкокипящие нефтепродукты, СУГ	ШР	50 – 2500	высокое, до 1800 кПа	С+Э/П	–
12	СПГ, кислород, азот, аргон	ШИР	50 – 2500	высокое, до 1800 кПа	С+Н+С	–

Обозначения в таблице:

РВСПК – вертикальный стальной резервуар с плавающей крышей; РВСП – вертикальный стальной резервуар с понтоном; РВС с УЛФ или ГО – вертикальный стальной резервуар, оборудованный уловителем легких фракций или газовой обвязкой; РГС – горизонтальный стальной резервуар; ВЦИР – вертикальный изотермический резервуар; РЦГ – цилиндрический горизонтальный резервуар; ШР – шаровой резервуар; ШИР – шаровой изотермический резервуар.

М – гофрированная стальная мембрана, С – стальная стенка, Ж – железобетонная стенка, Н – теплоизоляция насыпная (перлит), П – теплоизоляция пористая (пенополиуретановые плиты), Э – теплоизоляция экранная (алюминиевая фольга+полимерная пленка+алюминиевый лист).



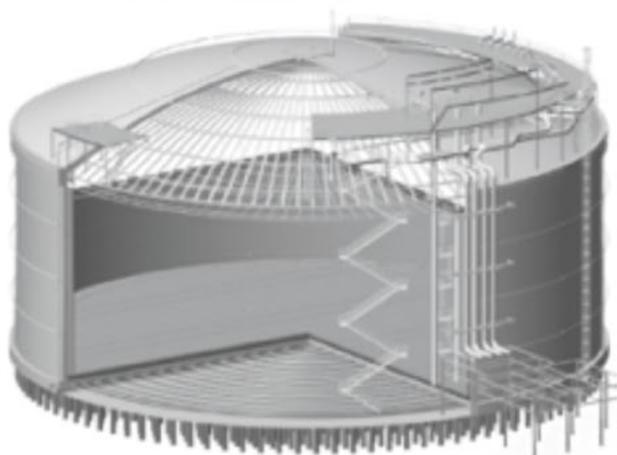
РВС



Шаровой резервуар



ВЦИР полной герметизации



Мембранный ИР

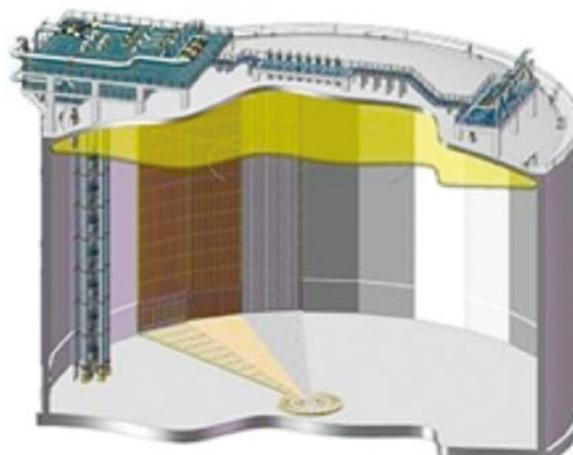


Рисунок 1 — Примеры различных конструкций резервуаров



Таблица 2 — Частота повреждений в зависимости от объема резервуара

Повреждение	Объем, м ³				
	1000	1000-5000	5000-10000	10000-50000	50000-100000
Перелив через верх	–	–	–	5	6
Повреждение ПК	–	–	1	9	1
Повреждение конической крыши	–	2	3	1	–
Повреждение верха цил. оболочки	–	1	4	4	–
Повреждение частей ПК (лестниц, стоек уровнемеров)	–	–	3	7	12
Упругая потеря устойчивости нижней части стенки	9	5	2	–	–
Разрыв уторного узла с разливом содержимого	5	1	2	10	–
Проскальзывание	1	1	–	–	–
Отрыв анкеров	1	1	2	–	–
Опрокидывание	3	–	1	–	–
Неравномерная осадка	3	11	1	3	–
Повреждение штуцеров	14	–	–	–	–

отечественных нормативных документах (проектное землетрясение, после которого предполагается продолжение эксплуатации и максимальное расчетное землетрясение, при котором должен обеспечиваться безопасный вывод из эксплуатации).

Выводы

Проанализированы и классифицированы типичные повреждения резервуаров в результате землетрясений. Для повышения сейсмостойкости резервуаров рекомендуется разработка методики проектного расчета конструкций резервуаров с использованием линейно-спектральной теории в зависимости от их типоразмеров и потенциальных уязвимостей в соответствии с двухуровневой системой сейсмической опасности. При разработке методики рекомендуется выполнить следующие исследования и анализ:

- механизма упругопластичной потери устойчивости (т.н. «слоновьей ноги»);
- корреляции между осевыми напряжениями и ромбовидной формой потери устойчивости;
- диссипации энергии вследствие отрыва днища от основания;

- эффекта проскальзывания;
- изменения частот и коэффициента демпфирования вследствие учета отражающего эффекта демпфирования почвы;
- влияния начальных несовершенств;
- особенностей изотермических резервуаров – влияния насыпной теплоизоляции на сейсмическую реакцию резервуара, возможности возникновения спровоцированного колебаниями жидкости эффекта стратификации СПГ.

Также рекомендуется при проектировании оснований резервуаров проводить учет возможных нарушений структуры основания разжижения грунта, потери устойчивости откосов, значительной неоднородной осадки, потери их несущей способности или размыва, вызванным разрушением трубопроводов.

Комплекс предлагаемых мероприятий позволит повысить точность и достоверность проектировочных и проверочных расчетов резервуарных конструкций, тем самым позволяя оценить их сейсмостойкость и риск аварийных ситуаций.

Таблица 3 — Типичные повреждения резервуаров

№	Тип	Описание	Причина	Характерность
А. Повреждения, затрудняющие эксплуатацию и требующие ремонта (недопустимы или нежелательны на уровне ПЗ, возможны на уровне МРЗ)				
1	Потеря устойчивости типа «слоновья нога»	В стенке развивается двухосное напряженное состояние – растягивающие напряжения в кольцевом направлении и сжимающие – в меридиональном. Радиальная связь в месте соединения стенки с дном препятствует радиальной деформации от действия давления с внутренней стороны стенки, что приводит к возникновению изгибающего момента в стенке. Данный вид повреждения характеризуется упругопластическими деформациями.	Резкое увеличение сжимающих напряжений в части резервуара, не испытывающей отрыв. Действие изгибающего момента, отрыв части дна от основания, неравномерная осадка вследствие нарушений структуры основания.	Все типы цилиндрических резервуаров с отношением $H/D = 1-1,5$ при больших диаметрах
2	Ромбовидная форма потери устойчивости	Упругая потеря устойчивости цилиндрической оболочки.	Действие опрокидывающего момента, отрыв дна от основания, неравномерная осадка вследствие нарушений структуры основания.	Все типы цилиндрических резервуаров с отношением $H/D = 2$ при больших высотах
3	Смещение резервуара	Проскальзывание незакрепленных резервуаров встречается достаточно редко и чаще всего не приводит к серьезным последствиям.	Горизонтальное сейсмическое воздействие, превосходящее силу трения дна об основание	Небольшие незакрепленные резервуары
4	Повреждения несущих конструкций стационарных крыш	Потеря устойчивости отдельных несущих конструкций крыш, потеря устойчивости оболочек крыш от удара волн	Совместное действие нагрузок от удара волн, инерциального движения жидкости и вертикальных статических нагрузок.	Большие широкие резервуары со стационарными крышами
5	Переливы, не вызывающие серьезных последствий	Переливы от значительных амплитуд волн на поверхности жидкости при наличии внешнего корпуса/барьеров безопасности	Большие амплитуды волн на поверхности жидкости при значительных длительных сейсмических воздействиях	Большие широкие резервуары
6	Повреждение конструкций ПК, подоплечия ПК	Повреждения структурных элементов ПК - лестниц, стоек уровнемеров и т.д.	Большие амплитуды волн на поверхности жидкости при значительных длительных сейсмических воздействиях	РВСПК
7	Отрыв и разрушение анкерных болтов, не приводящие к разрыву стенки	Вырыв анкерных устройств из фундамента вследствие действия опрокидывающего момента	Действие опрокидывающего момента, отрыв дна от основания, неравномерная осадка вследствие нарушений структуры основания.	Все типы цилиндрических резервуаров, закрепленных с фундаментом (чаще небольших)

Б. Повреждения, вызывающие вывод из эксплуатации или могущие привести к катастрофическим последствиям (недопустимы в любом случае)

1	Разрыв уторного узла с разливом содержимого	Разрыв шва приводит к утечке содержимого резервуара, и возникающая разница давлений от быстрой утечки может также привести к повреждению верхних поясов и крыши. Такие повреждения получили несколько резервуаров во время Чилийского землетрясения в 1985.	Во время отрыва днища резервуара от основания в месте соединения стенки с днищем возникают растягивающие напряжения в сварочном шве за счет деформирования цилиндра, что может привести к разрыву шва.	Все типы цилиндрических резервуаров
2	Растрескивание стенки	Растягивающие кольцевые напряжения могут привести к растрескиванию стенки	Жесткое болтовое/клепанное соединение, не позволяющее снизить напряжения за счет пластичности.	Происходит только в сборно-разборных (на болтах) и клёпаных резервуарах (более не производятся).
3	Разрушение трубопроводов	Разрушение трубопроводов, соединенных с резервуаром, как результат взаимных относительных перемещений резервуара и поддерживающих опор. Разрушение трубопроводов также ведет к утечке содержимого.	Излишняя жесткость трубопровода между штуцером и ближайшей поддерживающей колонной.	Все типы резервуаров с недостаточно гибкими подводящими трубопроводами
4	Разрыв стенки	Разрыв стенки или днища резервуара в местах прикрепления к ним лестниц и переходных площадок; штуцеров трубопроводов и анкерных устройств.	Излишняя жесткость соединения. Закрепленные резервуары с неподатливым соединением с фундаментом плохо проявили себя во время землетрясений	Небольшие закрепленные резервуары, небольшие резервуары с недостаточно гибкими подводящими трубопроводами
5	Переливы, могущие привести к серьезным последствиям	Переливы токсичных или криогенных продуктов, ЛВЖ от значительных амплитуд волн на поверхности жидкости при отсутствии внешних сдерживающих барьеров	Большие амплитуды волн на поверхности жидкости при значительных долгопериодных сейсмических воздействиях	Большие широкие резервуары
6	Пожары	Возгорания и пожары резервуаров с ЛВЖ	Возникновение искры вследствие трения о стенку при вертикальных перемещениях плавающей крыши	РВСПК
7	Разрушение несущих опорных конструкций	Разрушение колонн сферических резервуаров, разрушения опорных теплоизоляционных конструкций и фундамента ВЦИР	Потеря устойчивости опорных стоек при внецентренном сжатии, неравномерная осадка	ШР, ШИР, ВЦИР полной герметизации

Литература

1. Нехаев Г.А. Проектирование и расчет стальных цилиндрических резервуаров и газгольдеров низкого давления: учеб. пособие. М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2005. 216 с.
 2. Поповский Б.В., Майлер А.З. Строительство изотермических резервуаров. Москва: Недра, 1988. 120 с.
 3. Конструкционные методы снижения риска при эксплуатации изотермических резервуаров для хранения СПГ/ Х. М. Ханухов, А. В.

Алипов, Н. В. Четвертухин, А. В. Коломыцев, Р. Р. Шигапов// Вести Газовой Науки. 2017. Т. 1. № 29. С. 249–258.
 4. Обеспечение несущей способности узла сопряжения стенки и днища взрывозащищенных вертикальных цилиндрических стальных резервуаров/И. С. Холопов, С.Э. Еленицкий, Э.Я. Еленицкий, О. А. Ковальчук//Промышленное и гражданское строительство. 2010. № 7. С. 52–54.
 5. Шигапов Р.Р., Ковальчук О.А. Обзор упрощен-

ных методик расчета резервуаров на сейсмические воздействия //Вестник МГСУ. 2017. № 1. С. 53–62.
 6. Guidelines for Seismic Evaluation and Design of Petrochemical Facilities/Committee on Seismic Evaluation and Design of the Petrochemical Committee of the Energy Division of the American Society of Civil Engineers. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2011. 363 p.
 7. Godoy L.A. Buckling of vertical oil storage steel tanks: Review of static buckling studies//Thin-

Walled Struct. 2016.Vol.103.Pp. 1–21.

8. Hamdan F.H. Seismic behaviour of cylindrical steel liquid storage tanks // J. Constr. Steel Res. 2000.Vol. 53, No. 3.Pp. 307–333.

9. Hanson R. Behaviour of liquid storage tanks // The great Alaska Earthquake of 1964. Washington D.C.: Committee on the Alaska Earthquake, Division of the Earth Sciences, National Research Council, National Academy of Sciences, 1973.Pp. 331–339.

10. Haroun M.A., Bhatia H. Analysis of tank damage during the 1994 Northridge Earthquake // Proceedings of the 4th US Conference on Lifeline Earthquake

Engineering, ASCE. New York, 1995.Pp. 763–770.

11. Hatayama K. Lessons from the 2003 Tokachi-oki, Japan, earthquake for prediction of long-period strong ground motions and sloshing damage to oil storage tanks // J. Seismol. 2008.Vol. 12, no. 2. Pp. 255–263.

12. Seismic Performance of LNG Storage Tank Foundations During the Very Large Earthquake/S. Higuchi, T. Mori, T. Matsuda, Y. Goto, H. Akiyama, K.Toki, M. Kobayashi // 12th World Conferences on Earthquake Engineering. Auckland, New Zealand, 2000. Pp.1–8.

13. Koketsu K., Miyake H. A seismological overview

of long-period ground motion // J. Seismol. 2008. Vol.12, no. 2. Pp.133–143.

14. Manos G.C., Clough R.W. Tank damage during the may 1983 coalinga earthquake // Earthq. Eng. Struct. Dyn. 1985. Vol. 13, no.4.Pp. 449–466.

15. Shimizu N. Advances and Trends in Seismic Design of Cylindrical Liquid Storage Tanks // JSME. 1990. Vol. 33, no. 2. Pp. 111–124.

Материалы хранятся по адресу:
129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26
НИУ МГСУ, кафедра «Строительной
и теоретической механики»

**SHIGAPOV R., D. Sc., PHD student,
KOVALCHUK O., PHD, docent, MSUCE IBE director**

ANALYSIS OF DAMAGE OF VERTICAL CYLINDRICAL STORAGE TANKS DURING EARTHQUAKES

Abstract

development of Oil and Gas Industry leads to significant amount of storage tanks being built in earthquake-prone zones. During seismic events, tanks suffer damage of different types. This article discusses main types of defects and failures, their causes, and applicability to each kind of tanks. A classification of these damages

in accordance with two levels of assessment of the consequences of earthquakes adopted in regulatory documents of Russian Federation is proposed. Based on the results of the analysis, factors that ought to be taken into account for developing the seismic procedure of storage tanks are identified.

Keywords: tank, earthquake, accident, seismic resistance.

References

1. Nехаев G.A. Proektirovanie i raschet stal'nyh tsilindricheskikh rezervuarov i gazgol'derov nizkogo davleniia: ucheb. posobie [Design and calculation of steel cylindrical tanks and low-pressure gasholders: tutorial]. M.: Izd-vo Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov, 2005. 216 p. (In Russian).

2. Popovskii B.V., Mailer A.Z. Stroitel'stvo izitermicheskikh rezervuarov [Construction of cryogenic tanks]. Moskva: Nedra, 1988. 120 p. (In Russian).

3. Konstruktsionnye metody snizheniia riska pri ekspluatatsii izitermicheskikh rezervuarov dlia khraneniia SPG [Constructional methods of risk reduction at operation of isothermal reservoirs for storage of liquefied natural gas] / H.M. Hanuhov, A.V. Alipov, N.V. Chetvertuhin, A.V. Kolomytsev, R.R. Shigapov // Vesti Gazovoi Nauki. 2017. Vol. 1, no. 29. Pp. 249–258. (In Russian).

4. Obespechenie nesushchei sposobnosti uzla sopriazheniia stenki i dnishcha vzryvozashchishchennykh vertikal'nykh tsilindricheskikh stal'nykh rezervuarov [Provision of Bearing Capacity of a Junction of a Wall and a Bottom of Explosion-Proof Vertical Cylindrical Steel Reservoirs] / I.S. Kholopov, S.A. Elenitskii, A.Ya. Elenitskii, O.A. Kovalchuk // Pro-

myshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and civil engineering]. 2010. No. 7. Pp. 52–54. (In Russian).

5. Shigapov R.R., Kovalchuk O.A. Obzor uproshchennykh metodik rascheta rezervuarov na seismicheskie vozdviistviia [Review of Simplified Seismic Analysis Procedures for Storage Tanks] // Vestnik MGSU. 2017. No. 1. Pp. 53–62. (In Russian).

6. Guidelines for Seismic Evaluation and Design of Petrochemical Facilities / Committee on Seismic Evaluation and Design of the Petrochemical Committee of the Energy Division of the American Society of Civil Engineers. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2011. 363 p.

7. Godoy L.A. Buckling of vertical oil storage steel tanks: Review of static buckling studies // Thin-Walled Struct. 2016. Vol. 103. Pp. 1–21.

8. Hamdan F.H. Seismic behaviour of cylindrical steel liquid storage tanks // J. Constr. Steel Res. 2000. Vol. 53, No. 3. Pp. 307–333.

9. Hanson R. Behaviour of liquid storage tanks // The great Alaska Earthquake of 1964. Washington D.C.: Committee on the Alaska Earthquake, Division of the Earth Sciences, National Research Council, National Academy of Sciences, 1973. Pp. 331–339.

10. Haroun M.A., Bhatia H. Analysis of tank damage during the 1994 Northridge Earthquake // Proceedings of the 4th US Conference on Lifeline Earthquake Engineering, ASCE. New York, 1995. Pp. 763–770.

11. Hatayama K. Lessons from the 2003 Tokachi-oki, Japan, earthquake for prediction of long-period strong ground motions and sloshing damage to oil storage tanks // J. Seismol. 2008. Vol. 12, no. 2. Pp. 255–263.

12. Seismic Performance of LNG Storage Tank Foundations During the Very Large Earthquake/S. Higuchi, T. Mori, T. Matsuda, Y. Goto, H. Akiyama, K.Toki, M. Kobayashi // 12th World Conferences on Earthquake Engineering. Auckland, New Zealand, 2000. Pp. 1–8.

13. Koketsu K., Miyake H. A seismological overview of long-period ground motion // J. Seismol. 2008. Vol. 12, no. 2. Pp. 133–143.

14. Manos G.C., Clough R.W. Tank damage during the may 1983 coalinga earthquake // Earthq. Eng. Struct. Dyn. 1985. Vol. 13, no. 4. Pp. 449–466.

15. Shimizu N. Advances and Trends in Seismic Design of Cylindrical Liquid Storage Tanks // JSME. 1990. Vol. 33, no. 2. Pp. 111–124.

Для цитирования: Шигапов Р.Р., Ковальчук О.А. Анализ повреждений вертикальных цилиндрических резервуаров во время землетрясений // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2018. № 2. С. 46–52.

For citation: Shigapov R.R., Kovalchuk O.A. Analysis of damage of vertical cylindrical storage tanks during earthquakes. *Seismostoi koe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii* [Earthquake engineering. Constructions safety], 2018, no. 2, pp. 46–52. (In Russian).