

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

ОБЗОР ХАРАКТЕРНЫХ АВАРИЙ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ В РЕЗУЛЬТАТЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Значительное количество вертикальных цилиндрических резервуаров строятся в сейсмоопасных зонах. В статье приводятся данные об авариях резервуаров в результате сейсмических событий XX и XXI веков, рассмотрены характерные инциденты и их причины во время землетрясений в Коалинге (Калифорния, США), Ниигате, Токати-Оки и Тохоку (все – Япония), Эмили (северная Италия). При проведении исследовательской работы проанализированы характерные факторы риска и последствия аварий для резервуаров разных типоразмеров, на основании которых в статье представлены их характерные опасности и даны рекомендации для повышения их сейсмостойкости.

Ключевые слова: резервуар, землетрясения, аварии, сейсмостойкость.

1. Введение

Несмотря на развитие строительной науки, землетрясения все еще остаются опасным природным фактором, приводящим к многочисленным серьезным авариям зданий и сооружений.

Среди конструкций, которые во время землетрясений получают разного рода повреждения, иногда приводящие к катастрофическим последствиям, выделяются вертикальные цилиндрические резервуары для хранения различных жидких продуктов за счет влияния жидкости на реакцию

резервуара на сейсмические воздействия. Большинство аварий проходили по схожим сценариям.

В настоящей статье приведено описание некоторых характерных аварий резервуаров при землетрясениях, представлены соответствующие выводы и предложены рекомендации для повышения их сейсмостойкости.

2. Землетрясения и последствия аварий резервуаров

Ниже приводятся сводные данные об авариях резервуаров, произошедших во время известных землетрясений XX-XXI веков.

Представлено расширенное описание характерных аварий, чтобы можно было представить факторы риска и последствия аварий резервуаров:

1964 год: в Ниигата во время землетрясения магнитудой 7,5 было разрушено множество зданий и сооружений, обрушился мост. Помимо этого, были повреждены и разрушены несколько резервуаров. Пять нефтяных резервуаров загорелись, и огонь распространился на 286 зданий. Долгопериодные колебания привели к значительным перемещениям плавающей крыши [3]. Пожар начался на нефтяном резервуаре объемом 30000 м³ с плавающей крышей от искры, возникшей при соударении плавающей крыши со стенкой, и перекинулся на два шаровых резервуара СУГ на опорах объемом 1200 м³. Опора одного из резервуаров СУГ потеряла устойчивость, в результате чего резервуар был разрушен полностью.

**Таблица 1** — Землетрясения, во время которых происходили аварии резервуаров

№	Землетрясение	Год	M _w	Повреждения	Источник
1	Лонг-Бич	1933	6,4	1 водяной р-р разрушен, 16 нефтяных и водяных резервуаров испытали перелив продукта и повреждения разного рода	[11]
2	Великое Чилийское	1960	9,5	Несколько нефтяных р-ров получили повреждения разного рода. Также было повреждено множество водонапорных резервуаров	[15]
3	Ниигата	1964	7,5	Множество нефтяных р-ров, пожар на 2 р-рах, разлив нефти и сжиженного газа	[3]
4	Великое Аляскинское	1964	9,2	7 нефтяных р-ров с ПК получили повреждения, 1 водяной р-р разрушен, 10 р-ров получили повреждения стенки, крыши или анкеров	[6]
5	Сан Фернандо	1971	6,6	6 водяных р-ров получили повреждения стенки, крыши или анкеров, 1 разрушен; 8 р-ров с ПК испытали перелив продукта и повреждения ПК	[5]
6	Мияги	1978	7,4	Трещины в трех резервуарах с сырой нефтью, Повреждение анкеров одного водяного р-ра	[15]
7	Имперская долина	1979	6,4	16 р-ров с нефтепродуктами получили повреждения стенки и крыши, произошла утечка	[15]
8	Коалинга	1983	6,2	17 незакрепленных р-ров получили повреждения стенки и трубопроводов, испытали перелив продукта и повреждения ПК (9 со статичной крышей+8 р-ров с ПК)	[14]
9	Землетрясение в Японском море (Нихонкай Тюбу)	1983	7,9	Повреждения множества нефтяных р-ров с ПК, пожар на резервуаре с ПК	[11]
10	Лома-Приета	1989	7,1	Трещины в р-рах, разрушение вспомогательного оборудования вследствие явления отрыва, 2 р-ра машинного масла - повреждения стенки, 2 р-ра нефтепродуктов испытали отрыв	[8]
11	Нортбридж	1994	6,7	Разрушение 1 р-ра, повреждения нижних поясов и трубопроводов нескольких р-ров	[7]
12	Кокаэли, Измир	1999	7,6	Повреждения более сотни нефтяных р-ров, пожар на р-рах с ПК, разлив нефти	[16]
13	Чи-Чи	1999	7,7	Повреждения стенок, ПК, соединения стенки с дном нескольких нефтяных резервуаров	[11]
14	Токати-Оки	2003	8,3	У 7 нефтяных р-ров с ПК произошло подтопление ПК, 2 р-ра загорелись	[11]
15	Тохоку	2011	9,0	50 инцидентов на объектах газовой промышленности (4 пожара/взрыва, 6 утечек, 20 случаев повреждения трубопроводов, 20 повреждений конструкций р-ров) 139 инцидентов на объектах других отраслей (5 пожаров/взрывов, 23 утечки, 59 повреждений оборудования, 52 повреждений конструкций р-ров)	[13]
16	Эмилия	2012	6,1	Повреждения стенок и анкерных конструкций множества р-ров	[4]

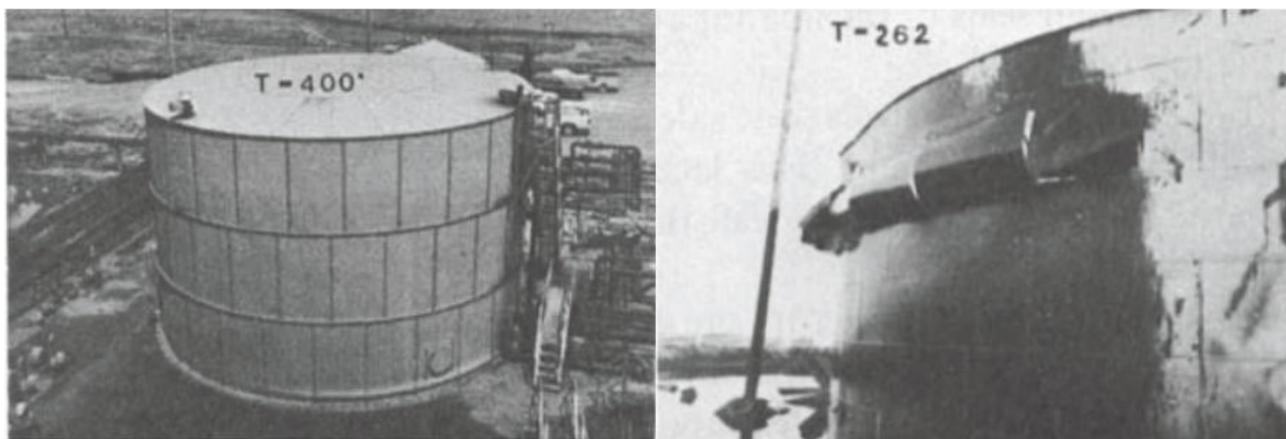


Рисунок 1 — Повреждения резервуаров в Калифорнии



Рисунок 2 — Пожар на нефтяных резервуарах при землетрясении Ниигата

Множество повреждений было вызвано разжижением песчаных переувлажнённых грунтов при вибрации. Конструкции, расположенные на таком грунте, погружаются в песок, а подземные, наоборот, «всплывают» на поверхность. Разжижение грунта привело к неоднородной осадке основания резервуаров, что вызвало деформации подводящих трубопроводов. Грунтовые воды вышли на поверхность и смешались с морской водой, принесенной цунами, и нефтью, разлившейся через поврежденные трубопроводы и конструкции резервуаров, что привело к быстрому распространению огня по всей территории склада. Также цунами сместило резервуары объемом менее 500 м³.

1983 год: при землетрясении в городе Коалинга (Калифорния) также было зафиксировано множество повреждений ВЦР. Во время землетрясения были серьезно повреждены резервуары без крыши; в резервуарах с конической крышей были повреждены соединения с трубопроводами. Для резервуаров с плавающей крышей главную роль играли долгопериодные колебания, приведшие к подтоплению плавающих крыш и разливам нефти. Пустые и полупустые резервуары не получили никаких повреждений. В работе [14] были исследованы повреждения всех резервуаров и дано сравнение их с результатами расчетов по американским стандартам тех лет.

2003 год: землетрясение Токати-Оки вызвало значительные повреждения семи крупных нефтяных резерву-

аров объемом 30-40 тыс. м³ с плавающей крышей вследствие долгопериодных колебаний (4-8 с) и вызванными ими большими амплитудами поверхностных волн, превышающими 3 метра. В двух случаях такие перемещения плавающей крыши привели к пожару. Помимо этого, произошло подтопление плавающих крыш у двух резервуаров объемом 110 тыс. м³ [10].

2011 год: мощное землетрясение Тохоку в Японии привело к многочисленным разрушениям построек, а также многочисленным людским жертвам. В числе сооружений, поврежденных в ходе землетрясения, было множество резервуаров [17]. При этом большинство серьезных аварий (80%) было вызвано не самим землетрясением, а вызванными им цунами и другими событиями [13].

2012 год: во время землетрясения Эмилия в Северной Италии, несмотря на малую силу сейсмического события, были зафиксированы значительные повреждения многих резервуаров. В работе [4] были проанализированы основные повреждения и проведено сравнение с результатами программного расчета. Наиболее типичными повреждениями были: разрушение анкеров, потеря устойчивости формы типа «слоновья нога» (рис. 3, а) для широких резервуаров, потеря устойчивости ромбовидной формы для высоких резервуаров (рис. 3, б, в, г), полное или частичное разрушение резервуаров на опорах вследствие потери устойчивости поддерживающих колонн.



Рисунок 3 — Повреждения резервуаров при землетрясении Эмилия. а – «слоновья нога», б, в, г – ромбовидная потеря устойчивости, г, д, е – повреждение анкерных конструкций, ж – потеря устойчивости опоры, з – проскальзывание незакрепленного резервуара

Как видно из представленных выше данных, аварии резервуаров при воздействии землетрясений могут повлечь многочисленные человеческие жертвы и серьезные экономические последствия.

3. Результаты выполненного анализа

По итогам проведенных исследований были проанализированы и обобщены характерные результаты последствий аварий цилиндрических резервуаров в результате землетрясений:

- для резервуаров больше 5000 м³ наблюдаются повреждения крыши и верхней части стенки, вызванные плесканием жидкости при долгопериодных колебаниях;
- для резервуаров меньше 5000 м³ наблюдаются повреждения в нижней части стенки, вызванные инерциальным движением жидкости совместно с самим резервуаром;
- для резервуаров с плавающей крышей в работе [9] были исследованы факторы, влияющие на повреждения резервуаров: связь между высотой волны и разрушениями, а также связь колебаний высших частот с разрушениями. В работе отмечено, что нет серьезных повреждений небольших резервуаров с периодом колебаний менее 5 секунд, несмотря на значительную высоту волны (более трех метров). С другой стороны, у двух больших резервуаров с периодом собственных колебаний более 12 секунд, произошло подтопление крыши несмотря на высоту волны порядка 1,3 м. В результате исследования было определено, что повреждения резервуаров объемом более 100 тыс. м³ с ПК связаны со второй формой колебаний жидкости, соответствующей волнам вблизи центральной оси резервуара;
- множество повреждений для резервуаров всех типов зафиксировано в области стыка стенки и дна, а также в области закрепления (анкерки) с нижележащими конструкциями. Закрепление делает поведение резер-

вуаров более предсказуемым и уменьшает вероятность потери устойчивости нижнего пояса стенки за счет предотвращения отрыва, однако создает возможность разрыва оболочки в месте прикрепления анкеров.

- уязвимыми являются места соединений резервуара с трубопроводами, а также сами подводные трубопроводы.

Результаты анализа были учтены при подготовке рекомендаций по повышению уровня сейсмостойкости резервуарных конструкций.

4. Заключение

В результате для увеличения сейсмостойкости резервуаров предлагаются следующие рекомендации:

1. Разработать отечественные методики для определения оптимальных толщин поясов стенок резервуара на основе двухуровневой системы (ПЗ и МРЗ), принятой в современных нормативных документах РФ. Аналогичные методики присутствуют в нескольких зарубежных стандартах[2];
2. При проектировании резервуара выполнить комплекс мер, включая расчет и моделирование, обеспечивающих прочность уторного узла и контроль сварочного шва между стенкой и дном [1];
3. Принимать меры по снижению сейсмической нагрузки с использованием демпферов и изоляторов;
4. Принимать меры по снижению амплитуд индуцированных землетрясением волн на поверхности жидкости при помощи гасителей колебаний;
5. Барьеры безопасности необходимо проектировать с составлением дерева событий с учетом возникающих во время землетрясения аварийных ситуаций, возможности разлива и смещения резервуара [12].
6. Усовершенствовать конструкции плавающих крыш для предотвращения возникновения искры при трении о стенки.

Литература

1. 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.
2. Шигапов Р.Р., Ковальчук О.А. Обзор упрощенных методик расчета резервуаров на сейсмические воздействия // Вестник МГСУ. 2017. № 1. С. 53–62.
3. Akatsuka H., Kobayashi H. Fire of petroleum tank, etc. by Niigata earthquake //Failure Knowledge Database, Japan Science and Technology Agency. 2008.
4. Seismic Performance of Storage Steel Tanks during the May 2012 Emilia, Italy, Earthquakes/E. Brunesi, R. Nascimbene, M. Pagani, D. Beilic// J. Perform. Constr. Facil. 2012. Vol. 29, № 6. P. 1–9.
5. Hamdan F.H. Seismic behaviour of cylindrical steel liquid storage tanks // J.Constr. Steel Res. 2000. Vol. 53, № 3. P. 307–333.
6. 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. P. 331–339.
7. 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. P. 763–770.
8. Haroun M.A., Mourad S.A., Izzeddine W. Performance of liquid storage tanks during the 1989 Loma Prieta earthquake // Proceedings of lifeline earthquake engineering, 1991. P. 1152–1160.
9. 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, № 2. P. 255–263.
10. Damaging Long-period Ground Motions from the 2003 Mw 8.3 Tokachi-oki, Japan Earthquake/ K. Koketsu, K. Hatayama, T. Furumura, Y. Ikegami, S. Akiyama//Seismol. Res. Lett. 2005.Vol. 76, № 1. P. 67–73.
11. Koketsu K., Miyake H. A seismological overview of long-period ground motion // J. Seismol. 2008. Vol. 12, № 2.P. 133–143.
12. Krausmann E. и др. Industrial accidents triggered by earthquakes, floods and lightning: Lessons learned from a database analysis/ E. Krausmann, E. Renni, M. Campedel, V. Cozzani// Nat. Hazards. 2011. Vol. 59, № 1.P. 285–300.
13. Krausmann E., Cruz A.M. Impact of the 11 March 2011, Great East Japan earthquake and tsunami on the chemical industry // Nat. Hazards.2013. Vol. 67, № 2. P. 811–828.
14. Manos G.C., Clough R.W. Tank damage during the may 1983 coolinga earthquake//Earthq. Eng. Struct. Dyn. 1985 Vol. 13, № 4. P. 449–466.
15. Shimizu N. Advances and Trends in Seismic Design of Cylindrical Liquid Storage Tanks // JSME.1990.Vol. 33, № 2. P. 111–124.
16. Yazici G., Cili F. Evaluation of the Liquid Storage Tank Failures in the 1999 Kocaeli Earthquake //14th World Conferences on Earthquake Engineering. Beijing, China, 2008.
17. On Damage of Oil Storage Tanks due to the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (Mw 9.0), Japan/S. Zama, H. Nishi, K. Hatayama, M. Yamada, H. Yoshihara, Y. Ogawa //15th World Conferences on Earthquake Engineering. LISBON, PORTUGAL, 2012.

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**

REVIEW OF TYPICAL ACCIDENTS WITH VERTICAL CYLINDRICAL STORAGE TANKS DURING EARTHQUAKES

Abstract

A significant quantity of vertical cylindrical storage tanks is being built in earthquake-prone regions. The present paper gives data on tank accidents as a result of seismic events of the 20th and 21st centuries and describes typical incidents and their scenarios during the earthquakes in Coaling (California, USA), Niigata, Tokachi-Oki

and Tohoku (Japan), Emilia (northern Italy). During the research work, risk factors and typical consequences of accidents were analyzed for tanks of different sizes. Some recommendations for increasing seismic resistance of storage tanks are given as a result of the analysis.

Keywords: tank, earthquake, accident, seismic resistance.

References

1. Obespechenie nesushchei sposobnosti uzla sopriazheniia stenki i dnishcha vzryvozashchishchennyh vertikal'nyh tsilindricheskikh stal'nyh rezervuarov/I.S. Holopov, S.A. Elenitskii, A. Ya. Elenitskii, O. A. Kovalchuk//Promyshlennoe I grazhdanskoe stroitelstvo. 2010. № 7. С. 52–54.
2. Shigapov R.R., Kovalchuk O.A. Obzor uproshchennyh metodik rascheta rezervuarov na seismicheskie vozdeistviia // Vestnik MGSU.2017. № 1. С. 53–62.
3. Akatsuka H., Kobayashi H. Fire of petroleum tank, etc. by Niigata earthquake //Failure Knowledge Database, Japan Science and Technology Agency. 2008.
4. Seismic Performance of Storage Steel Tanks during the May 2012 Emilia, Italy, Earthquakes/E.Brunesi, R. Nascimbene, M. Pagani, D. Beilic// J. Perform. Constr. Facil. 2012. Vol. 29, № 6. P. 1–9.
5. Hamdan F.H. Seismic behaviour of cylindrical steel liquid storage tanks // J.Constr. Steel Res. 2000. Vol. 53, № 3. P. 307–333.
6. 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. P. 331–339.
7. 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. P. 763–770.
8. Haroun M.A., Mourad S.A., Izzeddine W. Performance of liquid storage tanks during the 1989 Loma Prieta earthquake // Proceedings of lifeline earthquake engineering, 1991. P. 1152–1160.
9. 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, № 2. P. 255–263.

10. Damaging Long-period Ground Motions from the 2003 Mw 8.3 Tokachi-oki, Japan Earthquake/ K. Koketsu, K. Hatayama, T. Furumura, Y. Ikegami, S. Akiyama // Seismol. Res. Lett. 2005. Vol. 76, № 1. P. 67–73.

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

12. Krausmann E. и др. Industrial accidents triggered by earthquakes, floods and lightning:

Lessons learned from a database analysis/ E. Krausmann, E. Renni, M. Campedel, V. Cozzani // Nat. Hazards. 2011. Vol. 59, № 1. P. 285–300.

13. Krausmann E., Cruz A.M. Impact of the 11 March 2011, Great East Japan earthquake and tsunami on the chemical industry // Nat. Hazards. 2013. Vol. 67, № 2. P. 811–828.

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

15. Shimizu N. Advances and Trends in Seismic

Design of Cylindrical Liquid Storage Tanks // JSME.1990.Vol. 33, № 2. P. 111–124.

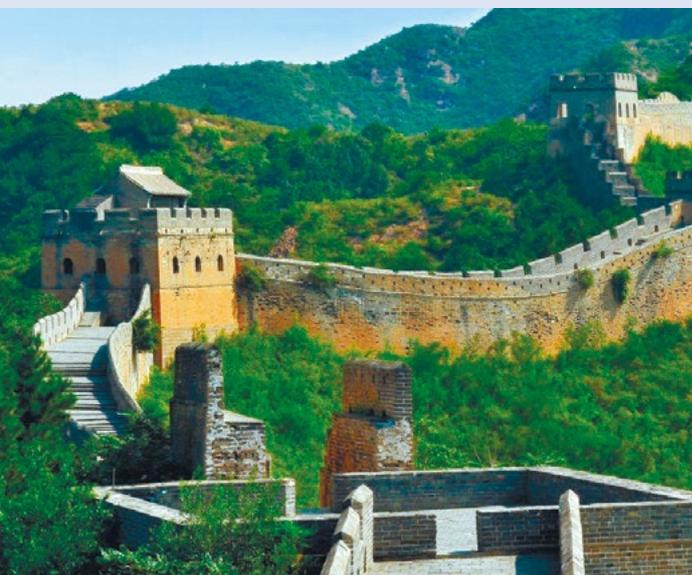
16. Yazici G., Cili F. Evaluation of the Liquid Storage Tank Failures in the 1999 Kocaeli Earthquake //14th World Conferences on Earthquake Engineering. Beijing, China, 2008.

17. On Damage of Oil Storage Tanks due to the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (Mw 9.0), Japan/ S. Zama, H. Nishi, K. Hatayama, M. Yamada, H. Yoshihara, Y. Ogawa //15th World Conferences on Earthquake Engineering. LISBON, PORTUGAL, 2012.

Для цитирования: Шигапов Р. Р., Ковальчук О. А. Обзор характерных аварий вертикальных цилиндрических резервуаров в результате землетрясений // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2018. № 1. С. 14-19.

For citation: Shigapov R. R., Kovalchuk O. A. Review of typical accidents with vertical cylindrical storage tanks during earthquakes// Earthquake engineering. Constructions safety. 2018. № 1. С. 14-19.

ИНТЕРЕСНЫЕ ФАКТЫ



На протяжении всей своей истории территории Китая серьезно страдали от землетрясений. Мудрые китайцы создали первый в мире сейсмограф. Аппарат сотворил имперский астроном Чжан Хэнг в период династии Хань. Мастер сделал сейсмограф невероятно красивым. Прибор представлял собой сосуд с девятью изображёнными на нём драконами. Драконы были расположены на равном расстоянии друг от друга, а под каждым драконом находилась лягушка с открытым ртом. Внутри сосуда находился маятник, который приводился в движение землетрясением. В результате этого в пасть дракона попадал шар, указывая на эпицентр землетрясения. После этого шар падал в рот лягушки, сидящей под драконом. Этот аппарат просуществовал около 1,5 тысячи лет, пока не были изобретены более современные устройства.

<https://www.epochtimes.ru/izobreteniya-drevnego-kitaya-99017323/>