РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО СТАЛЬНОГО РЕЗЕРВУАРА ОБЪЕМОМ 5000 м³ ПРИ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS

CALCULATION OF VERTICAL STEEL TANK (VOLUME 5000 m³) STRESS-STRAIN STATE UNDER HORIZONTAL SEISMIC ACTION IN THE SOFTWARE PACKAGE ANSYS

Л. А. Латыпова
Laysan A. Latypova

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

И. Э. Лукьянова
Irina E. Lukyanova

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Россия является одним из крупнейших поставщиков нефти на мировом рынке, в связи с чем проблема хранения нефти является одной из основных для нефтедобывающих предприятий. Развитие инфраструктуры объектов магистрального транспорта нефти, появление новых маршрутов поставок вызывает необходимость строительства складов товарной нефти, нефтепродуктов в районах с повышенной сейсмической активностью. В сейсмически активных районах эксплуатируются крупнотоннажные склады с нефтью в районе Северного Кавказа, в составе которых имеются резервуары вертикальные стальные объемом до 100 тыс. м³. Для обеспечения безопасной работы резервуаров необходимо разрабатывать и совершенствовать подходы к расчету сейсмостойкости таких сооружений.

Объекты нефтегазодобычи относят к опасным производственным объектам, которые в случае аварий представляют серьезную угрозу для человека и окружающей среды. Стихийные бедствия (грозы, землетрясения и др.) являются одними из основных причин возникновения аварий резервуаров. Анализ последствий землетрясений показывает, что резервуары могут получать значительные повреждения. Несмотря на определенный прогресс, достигнутый в последние годы в данном сегменте производства, резервуары нефти и нефтепродуктов остаются одними из наиболее уязвимых при сейсмическом воздействии. Поэтому проблема обеспечения прочности вертикальных стальных резервуаров для хранения нефтепродуктов имеет важное значение и является весьма актуальной. Также актуальность данного вопроса обусловлена повышающейся, по последним данным, сейсмической активностью планеты. В очаге землетрясения происходят разрывы и интенсивные неупругие деформации среды. Деформации в самом очаге носят необратимый характер, а в области, внешней к очагу, являются сплошными, упругими и преимущественно обратимыми. Именно в этой области распространяются сейсмические волны.

Russia is one of the largest suppliers of oil in the world market, and therefore the problem of oil storage is one of the main for oil companies. The development of the infrastructure of oil trunk transportation facilities, the emergence of new supply routes necessitates the construction of warehouses of commercial oil, petroleum products in areas with high

Ключевые слова

сейсмостойкость, резервуар
вертикальный стальной,
землетрясение,
напряженно-деформированное
состояние, ANSYS

Key words

seismic resistance,
vertical steel tank, earthquake,
stress-strain state, ANSYS

seismic activity. In seismically active areas, large-capacity oil warehouses are operated in the North Caucasus region, which include vertical steel tanks with volume up to 100 thousand m³. To ensure tanks safe operation, it is necessary to develop and improve approaches to the calculation of seismic resistance of such facilities.

Oil and gas production facilities are classified as hazardous production facilities, which in case of accidents pose a serious threat to humans and the environment. Natural disasters (thunderstorms, earthquakes, etc.) are one of the main causes of tank accidents. An analysis of the effects of earthquakes shows that reservoirs can suffer significant damage. Despite some progress made in recent years in this segment of production, oil and petroleum products tanks remain among the most vulnerable to seismic effects. Therefore, the problem of ensuring the strength of cylindrical tanks for storage of petroleum products is important and very relevant. Also, the relevance of this issue is due to the increasing, according to recent data, the seismic activity of the planet. In the center of the earthquake breaks occur and intense inelastic deformation of the medium. Deformations in the hearth are irreversible, and in the area external to the hearth, are continuous, elastic and mostly reversible. It is in this area that seismic waves propagate.

Вертикальные стальные цилиндрические резервуары благодаря своей простоте и ряду преимуществ по сравнению с другими конструктивными формами являются в настоящее время прогрессивной конструкцией хранилищ для жидкостей, которые наиболее часто применяются в сейсмически опасных районах. Вместе с тем стальные вертикальные цилиндрические резервуары, как показывает анализ последствий сильных землетрясений, оказываются весьма чувствительными к сейсмическим воздействиям, повреждаются и разрушаются, приводя к весьма значительному ущербу, причиняемому народному хозяйству. Если жидкость, хранящаяся в резервуаре, является горючей или высокотоксичной, то сочетание этих факторов неминуемо приводит к катастрофическим последствиям или экологическим бедствиям [1].

Информация об авариях, произошедших за последние 25 лет на емкостях с нефтепродуктами на территории России и за рубежом, показывает, что основными формами разрушения вертикальных цилиндрических резервуаров в результате сейсмического толчка являются:

- отрыв от основания;
- деформация стенок с образованием «слоновой ноги»;
- пролив нефтепродуктов при деформации крыши;
- разрыв части обшивки у основания с истечением продукта.

Основной причиной этого является тот факт, что при сейсмическом воздействии силой около 9 баллов величина горизонтального

давления на стенку резервуара почти на порядок больше, чем в обычных условиях эксплуатации [2].

На основе [3] можно сделать вывод, что подход для расчета резервуаров на сейсмические воздействия в различных документах различается, поэтому существенное значение приобретает численное моделирование для определения нагрузок, заключающееся в анализе фактических данных о поведении резервуаров и аналогичных им математических моделей [4]. Для зданий и сооружений простой геометрической формы расчетные сейсмические нагрузки следует принимать действующими горизонтально в направлениях их продольной и поперечной осей. Действие сейсмических нагрузок в указанных направлениях следует учитывать отдельно [5]. В связи с этим принято решение произвести расчет резервуара с различным уровнем налива нефти для определения поведения жидкости и конструкции при горизонтальном сейсмическом воздействии.

Для анализа сейсмостойкости резервуара РВС-5000 (диаметр $D = 22,8$ м, $H = 12$ м) с различным уровнем налива нефти выполнен модальный анализ для определения собственных частот и форм колебаний конструкции. Геометрическая модель резервуара создана в программном комплексе «Компас 3D». Расчет собственных частот и форм колебаний конструкции, напряженно-деформированного состояния (НДС) выполнен в программном комплексе «ANSYS» посредством модулей «Modal» и «Response Spectrum» [6], данный этап расчета отличается от подхода к расчету,

описанному в [7]. Модальный анализ РВС-5000 содержит следующие этапы:

1. задаются свойства материалов стали и нефти. Плотность Ст3 $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$, модуль упругости $E = 210 \text{ ГПа}$, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$. Плотность нефти $\rho = 950 \text{ кг/м}^3$. Для моделирования жидкости используются объемные восьмиузловые конечные элементы FLUID80. Этот тип конечного элемента является модификацией элемента SOLID45 с нулевой сдвиговой жесткостью и имеет три степени свободы в каждом узле (перемещения UX, UY, UZ). Через командную строку вводятся скорость звука ($c_0 = 1290 \text{ м/с}$) и динамическая вязкость нефти ($\eta = 0,11 \text{ Па}\cdot\text{с}$);

2. при разбиении модели на конечные элементы посредством применения команды «Mesh» необходимо в настройках сетки ука-

зать, что элементы будут без срединного узла (для жидкости): «Element Midside Nodes Dropped» [8];

3. расчет проводится для нескольких вариантов наполнения резервуара: опорожненного, заполненного на 3, 6, 9 и 10,5 м;

4. граничные условия учитывают жесткое закрепление днища резервуара.

Расчет резервуара осуществляется методом прямого динамического анализа при горизонтальном сейсмическом воздействии. Сейсмическое воздействие для района площадки строительства резервуара задано синтетизированной 8-балльной акселерограммой (рисунок 1) [9].

В таблице 1 приведены результаты расчета собственных частот колебаний РВС-5000 (пустого, заполненного на 3, 6, 9 и 10,5 м) при 10 рассматриваемых формах колебаний.

Рисунок 1. Спектр отклика для акселерограммы (8 баллов)

Таблица 1. Результаты расчета собственных частот колебаний РВС-5000

Заполнение РВС	Частота собственных колебаний, Гц, при моде колебаний									
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Пустой	12	12,19	12,77	12,90	15,35	15,87	16,90	17,08	21,38	22,26
Заполнен на 3 м	34,18	34,36	36,47	37,08	46,30	—	—	—	—	—
Заполнен на 6 м	16,34	16,44	19,05	19,58	20,90	34,56	35,13	39,07	48,75	49,99
Заполнен на 9 м	9,09	9,11	11,26	12,25	12,30	25,00	25,18	26,44	35,10	35,84
Заполнен на 10,5 м	7,24	7,27	8,67	10,51	10,63	22,80	22,86	23,54	31,51	32,14

В результате численного расчета, выполненного в модуле «ANSYS Response Spectrum», выявлено, что наибольшие напряжения и деформации возникают в резервуаре с высотой налива 10,5 м (максимальные деформации составляют 6 мм, максимальные

эквивалентные напряжения составляют 40 МПа). При меньшей высоте налива напряжения и деформации снижаются. На рисунках 2 и 3 представлены графики зависимости максимальных напряжений и деформаций от уровня налива нефти.

Рисунок 2. График зависимости максимальных эквивалентных напряжений в резервуаре от уровня налива нефти

Рисунок 3. График зависимости максимальных деформаций резервуара от уровня налива нефти

Анализируя графики зависимости, можно сделать вывод, что полученные максимальные деформации очень маленькие.

На основе [10] принято решение рассчитать резервуар с уровнем налива нефти 6 м при учете эффекта недостающей массы и отклика тела как жесткого целого. Учет данных эффектов применяется, когда частота собственных колебаний находится в среднечастотной и высокочастотной частях спектра (при данном

расчете при частоте выше $\nu = 3,5$ Гц). Для этого в «RS Acceleration» задаются значения: «Missing Mass Effect ZPA», равное ускорению в финальной точке спектра, «Rigid Response Effect Freq Begin», равное пиковой частоте, и «Rigid Response Effect Freq End», равное сумме пиковой частоты и двум крайним частотам спектра, все деленные на три.

Результаты полученных деформаций и напряжений представлены на рисунках 4, 5.

Рисунок 4. Распределение напряжений

Рисунок 5. Распределение деформаций

В ходе расчетов получили максимальные эквивалентные напряжения 9,55 МПа, максимальные деформации — 72 м, т.е. при уровне налива нефти 6 м резервуар претерпевает недопустимые деформации, происходит его разрушение. Без учета эффекта недостающей

массы и отклика тела как жесткого целого, для резервуара с аналогичным уровнем налива нефти (6 м) максимальные эквивалентные напряжения составили 6,39 МПа, максимальные деформации — 0,46 мм. На основе сравнения данных значений можно сделать вывод, что

расчет с учетом эффекта недостающей массы и отклика тела как жесткого целого наиболее приближен к реальности.

Небольшие значения напряжений в обоих случаях можно обосновать тем, что собственные частоты находятся в низком диапазоне и несут большую массу, т.к. у них больше коэффициенты участия, но при этом они попадают на спектр воздействия в область малых амплитуд [11].

Выводы

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что при увеличении уровня налива нефти, напряжения и деформации возрастают, также возрастает количество собственных форм колебаний.

Для расчета резервуара с жидкостью в программном комплексе «ANSYS» необходимо:

1. осуществить учет жидкости в резервуаре с помощью конечного элемента FLUID80,

при этом скорость звука и динамическую вязкость нефти ввести через командную строку. Конечные элементы FLUID80 — объемные восьмиузловые элементы для моделирования жидкости. Этот тип конечных элементов является модификацией элемента SOLID45 с нулевой сдвиговой жесткостью и имеет три степени свободы в каждом узле (перемещения UX, UY, UZ);

2. при разбиении модели на конечные элементы посредством применения команды «Mesh» в настройках сетки указать, что элементы будут без срединного узла (для жидкости): «Element Midside Nodes Dropped»;

3. учесть эффект недостающей массы и отклик тела как жесткого целого, когда частота собственных колебаний находится в среднечастотной и высокочастотной частях спектра.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кангарлу Камбиз. Расчет на сейсмические воздействия наземных стальных вертикальных цилиндрических резервуаров для хранения нефти в условиях Ирана: дис. ... канд. техн. наук. М., 2012. 178 с.

2. Испытания на сейсмостойкость оборудования для нефтегазовой отрасли. Актуальность и современное состояние вопроса // Сфера. Нефть и газ. 2016. № 5. С. 90–93.

3. Шигапов Р.Р., Ковальчук О.А. Обзор упрощенных методик расчета резервуаров на сейсмические воздействия // Вестник МГСУ. 2016. Т. 12. Вып. 1 (100). С. 53–62.

4. Лукьянова И.Э. Влияние дополнительных нагрузок на напряженно-деформированное состояние вертикальных резервуаров // Мировое сообщество: проблемы и пути решения: сб. ст. Уфа, 2004. Вып. 15. С. 74–78.

5. Лукьянова И.Э. Моделирование воздействия землетрясений на стальные вертикальные резервуары с использованием программного комплекса FLOWVISION // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2010. № 2. URL: http://ogbus.ru/authors/Lukyanova/Lukyanova_4.pdf (дата обращения: 24.11.18).

6. Васильев Г.Г., Тарасенко А.А., Чепур П.В., Юхай Гуань. Анализ сейсмостойкости вертикального стального резервуара РВСПК-50000 с использованием линейно-спектрального метода // Нефтяное хозяйство. 2015. № 10. С. 120–123.

7. Гарифуллин Э.А., Лукьянова И.Э. Определение деформаций и напряжений в вертикальных стальных резервуарах при моделировании воздействия землетрясений с использованием ПК ANSYS // Нефтегазовое дело. 2017. № 3. С. 78–84.

8. Определение собственных частот резервуара с жидкостью в ANSYS Mechanical [Электронный ресурс]. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=sEUwEs8GQGI> (дата обращения: 25.11.18).

9. РД-23.020.00-КТН-136-16. Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Расчет конструкций резервуаров вертикальных стальных для хранения нефти и нефтепродуктов на сейсмические воздействия. Введ. 2016-07-20. М.: ООО «НИИ Транснефть», 2016. 61 с.

10. Связанный расчет спектрального отклика бака с жидкостью в ANSYS Workbench Mechanical [Электронный ресурс]. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=D92JIAev6ds> (дата обращения: 25.11.18).

11. ANSYS ACT, Acoustic, Fluid80. Подходы к моделированию недозаполненных цистерн [Электронный ресурс]. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=b2CoUKZMtpE> (дата обращения: 25.11.18).

REFERENCES

1. Kangarlu Kambiz. Raschet na seysmicheskie vozdeystviya nazemnykh stal'nykh vertikal'nykh tsilindricheskikh rezervuarov dlya khraneniya nefi v usloviyakh Irana [The Calculation of the Seismic Effects of Land-Based Steel Vertical Cylindrical Tanks for Oil Storage in Terms of Iran]. Moscow, MGSU Publ, 2012. 178 p. [in Russian].

2. Ispytaniya na seysmostoykost' oborudovaniya dlya neftegazovoy otrasli. Aktual'nost' i sovremennoe sostoyanie voprosa [Seismic Testing of Equipment for the Oil and Gas Industry. Relevance and Current State of the Issue] Sfera. Neft' i gaz — Sphere. Oil and Gas, 2016, Issue 5, pp. 90-93 [in Russian].

3. Shigapov R.R., Koval'chuk O.A. Obzor uproshchennykh metodik rascheta rezervuarov na seysmicheskie vozdeystviya [Review of Simplified Methods of Calculation of Reservoirs on Seismic Effects.] Vestnik MGSU – Vestnik MGSU, 2016, Vol. 12, Issue 1 (100), pp. 53-62 [in Russian].

4. Luk'janova I.E. Vliyanie dopolnitel'nykh nagruzok na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie vertikal'nykh rezervuarov [Influence of Additional Loads on the Stress-Strain State of Vertical Tanks] Sbornik: Mirovoe

soobshhestvo: problemy i puti resheniya — Collection: *World Community: Problems and Solutions*, 2004, Vol. 15, pp. 74–78 [in Russian].

5. Luk'janova I.E. Modelirovanie vozdeystviya zemletryaseniy na stal'nye vertikal'nye rezervuary s ispol'zovaniem programmnogo kompleksa FLOWVISION [Modelling of the Impact of Earthquakes on Steel Vertical Tanks Using the Software Complex FLOWVISION] *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Neftegazovoe delo»* — *Electronic Scientific Journal «Oil and Gas Business»*, 2010, No 2. URL: http://ogbus.ru/authors/Lukyanova/Lukyanova_4.pdf (accessed 24.11.18). [in Russian].

6. Vasil'ev G.G., Tarasenko A.A., Chepur P.V., Juhaj Guan' Analiz seysmostoykosti vertikal'nogo stal'nogo rezervuara RVSPK-50000 s ispol'zovaniem lineynosppektral'nogo metoda [Analysis of the Vertical Steel Tank of RVS-50000 with the Use of the Linear-Spectral Method]. *Neftyanoe khozyaystvo* — *Oil Industry*, 2015, No 10, pp. 120–123 [in Russian].

7. Garifullin E.A., Luk'janova I.E. Opredelenie deformatsiy i napryazheniy v vertikal'nykh stal'nykh rezervuarakh pri modelirovanii vozdeystviya zemletryaseniy s ispol'zovaniem PK ANSYS [Definition of Deformations and Stresses in Vertical Steel Tanks in Modeling Earthquake Effects with Using ANSYS PC]. *Neftegazovoe delo* — *Petroleum Engineering*, 2017, No 3, pp. 78–84 [in Russian].

8. *Opredelenie sobstvennykh chastot rezervuara s zhidkost'yu v ANSYS Mechanical* [Determination of Eigen Frequencies of the Liquid Tank in ANSYS Mechanical] [Electronic Resource]. Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=sEUwEs8GQGI> (accessed 25.11.18). [in Russian].

9. RD-23.020.00-KTN-136-16. *Magistral'nyj truboprovodnyj transport nefti i nefteproduktov. Raschet konstrukcij rezervuarov vertikal'nyh stal'nyh dlja hranenija nefti i nefteproduktov na sejsmicheskie vozdejstviya* [RD 23.020.00-KTN-136-16. Trunk Pipeline Transportation of Oil and Oil Products. Calculation of Structures of Vertical Steel Tanks for Storage of Oil and Oil Products on Seismic Effects]. Moscow, LLC «NII Transneft'», 2016. 61 p. [in Russian].

10. *Svyazannyj raschet spektral'nogo otklika baka s zhidkost'yu v ANSYS Workbench Mechanical* [Related Calculation of the Spectral Response of the Liquid Tank in ANSYS Workbench Mechanical]. [Electronic Resource]. Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=D92JIAev6ds> (accessed 25.11.18). [in Russian].

11. *ANSYS ACT, Acoustic, Fluid80. Podkhody k modelirovaniyu nedozapolnennykh tsistern* [ANSYS ACT, Acoustic, Fluid80. Approaches to Modeling of Under-Filled Tanks] [Electronic Resource]. Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=b2CoUKZMtpE> (accessed 25.11.18). [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ ABOUT THE AUTHORS

Латыпова Ляйсан Айратовна, магистрант кафедры «Сооружение и ремонт газонефтепроводов и газонефтехранилищ», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Laysan A. Latypova, Undergraduate Student of Oil and Gas Pipelines and Storages Construction and Repair Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: liysiyann@list.ru

Лукьянова Ирина Эдуардовна, д-р техн. наук, профессор кафедры «Сооружение и ремонт газонефтепроводов и газонефтехранилищ», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Irina E. Lukyanova, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Oil and Gas Pipelines and Storages Construction and Repair Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: iri-lou@mail.ru