
СЕЙСМИЧЕСКАЯ НАДЕЖНОСТЬ ОСНОВАНИЙ КРУПНЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ

Камбиз Кангарлу

Московский государственный строительный университет (МГСУ)
Ярославское шоссе, 26, Москва, Россия, 129337

Статья содержит требования к расчету и проектированию вертикальных цилиндрических стальных резервуаров, эксплуатация которых предусматривается в сейсмически опасных районах и без установки анкеров. Сейсмостойкость резервуара обеспечивается при одновременном выполнении следующих условий: резервуар не опрокидывается при землетрясении; обеспечена устойчивость нижнего пояса стенки от действия продольно-поперечной нагрузки.

Ключевые слова: подъем днища от основания, опрокидывающий момент, колебания жидкости, вертикальный стальной цилиндрический резервуар, сейсмические воздействия, моделирование, «слоновая ступня», собственные частоты колебаний жидкости, гидродинамические давления.

Нефтегазовая отрасль, являясь одной из важнейших отраслей экономики некоторых нефтедобывающих стран, призвана обеспечить их поступательное развитие в условиях преодоления последствий мирового экономического кризиса и завоевания прочных позиций в новых экономических условиях. Столь ответственная роль требует серьезного анализа существующего положения дел и оценки эффективности работы топливно-энергетического и нефтеперерабатывающего комплексов, неотъемлемой составляющей которых является резервуарный парк, обеспечивающий хранение нефти и нефтепродуктов. Настоящая статья, не претендуя на широту охвата всех проблем проектирования и строительства резервуаров, посвящена вопросам обеспечения надежности оснований и фундаментов стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов в условиях сейсмического воздействия.

Большинство возводимых резервуаров имеют значительный рабочий объем от 20 тыс. м³ до 100 тыс. м³. В связи с этим проблема эксплуатационной надежности оснований и фундаментов резервуаров при сейсмических воздействиях важна и актуальна. Движение вязкой жидкости в баках при землетрясениях создает внецентренные сжимающие и сдвигающие усилия на фундаменты и основания, имеющие импульсный гидродинамический характер, что может привести к нарушению эксплуатационной надежности и разрушению резервуаров. Обобщенные данные о воздействии землетрясений на резервуары позволяют сделать вывод о том, что основными причинами их аварий при сейсмических воздействиях являются следующие: потеря устойчивости основания и разрыв днища резервуара (рост порового давления, «разжижение» грунта, уплотнение из-за девиаторной нагрузки и т.д.); пластические деформации оболочки резервуара в нижней части («слоновая ступня») от действия грунта, уплотнение из-за гидродинамической нагрузки; продольный изгиб и разрушение верха стенки, уплотнительного пазуха и крыши резервуара от гидродинамического удара волны жидкости; отрыв подводных пат-

рубков при сейсмических подвижках основания [1]. На рисунке 1 представлен пример сейсмического уплотнения основания резервуара в результате землетрясения на Аляске [2].



Рис. 1. Землетрясение на Аляске (1964 г.): потеря устойчивости нижней части корпуса, подъем днища от основания и повреждение узлов сопряжения корпуса с днищем и связи трубопровода

В зависимости от условия поддержки вертикальных стальных цилиндрических резервуаров они подразделяются на два класса: а) без установки анкеров; б) с установкой анкеров. Для закрепленного анкерами резервуара стенка резервуара прочно соединена с основанием, которое достаточно массивно, чтобы предотвратить подъем в случае землетрясения. Это означает, что анкерные болты должны иметь возможность передать вертикальные усилия в стенке, вызванные землетрясением, на основание. Практически постановка анкеров требует большого количества анкерных болтов для того, чтобы усилия в анкерных болтах были распределены равномерно по контуру резервуара. Неудачные конструкции соединения анкера с резервуаром или наличие значительных усилий в анкерах могут привести к разрыву стенки резервуара. Кроме того, для большого резервуара может потребоваться довольно массивная основа. Таким образом, установка на резервуарах анкеров весьма дорога, в результате чего на многих резервуарах отсутствуют анкера, даже в сейсмических районах. Это касается в первую очередь широких резервуаров большой емкости [3].

В соответствии с требованиями Eurocode 8, учитывающего современные тенденции развития строительства в сейсмически опасных районах, опрокидывающий момент, действующий на резервуар при сейсмическом воздействии, определяется по формуле [4]

$$M_s = \frac{A_h \gamma_n}{m_k} [K_i \beta_i (W_s X_s + W_r X_r) + WH \sqrt{\left[K_i K_{\phi i} \beta_i \left(0,483 - \frac{0,008r}{H} - \eta_1 \right) \right]^2 + \left(K_c K_{\phi c} \beta_c \eta_1 \right)^2}], \quad (1)$$

где $[\eta]_{\perp 1} = 0,247r/H \{1,84th(1,84H/r) + r/H [1/(ch(1,84H/r) - 1)]\}$.

В формуле (1) коэффициент горизонтального сейсмического ускорения составляет $A_h = 0,1, 0,2, 0,4$ при землетрясении интенсивностью 7, 8, 9 баллов соответственно; β_i, β_c — спектральный параметр (коэффициент динамичности)

Максимальная величина подъема стены может быть получена при использовании измененной версии формулы, полученной Камбера [6]:

$$u_{\max} = \frac{1}{c} \left[\frac{f_y t_s}{6 f_{rs}} + \frac{p_0 L_s}{f_{rs} t_s} \left[\frac{L_s}{2} - \left(\frac{\bar{E} t_s^3}{12 f_{rs} f_s} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right], \quad (4)$$

где $f_{rs} = \frac{1}{t_s} \left[\frac{2 \bar{E} t_s p_0^2 (1 - \lambda)^2}{3} \right]^{\frac{1}{3}}$; $\bar{E} = \frac{E}{(1 - \nu_s^2)}$; p_0 — гидростатическое давление на основание;

f_y — предел упругости материала днища резервуара.

Лау и Клаф [7] изучали статическое поведение днища резервуара, используя функции формы Ритца. Аналитические следствия этих исследований указывают на то, что у вздымаемого днища резервуара есть приблизительно круглый участок контакта, как показано на рис. 3.

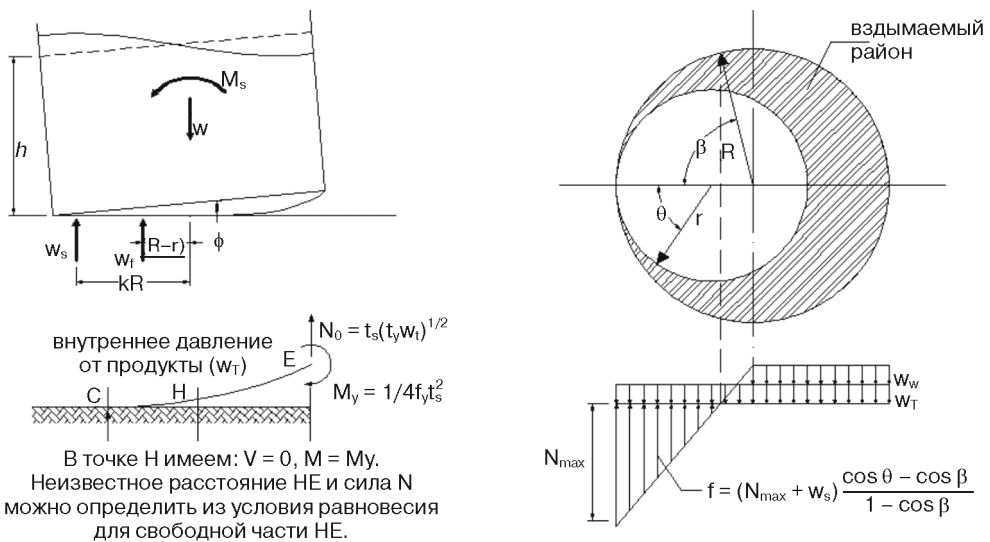


Рис. 3. Балка с пластическим шарниром, используемая в работе Возняк и Митчелл [8] для вычисления максимальных вертикальных усилий сжатия в нижнем поясе стенки резервуара

Резервуар является устойчивым к опрокидыванию, если момент от вертикальных удерживающих сил превышает момент от инерционных горизонтальных сил. Опрокидывающему моменту M_s противодействуют две силы W_s и W_f , формирующие момент M_R :

$$M_R = W_s kR + W_f (R - r), \quad (5)$$

где $W_s = W + W_w - W_f$ — реакция сжатия в основании резервуара; W — общий вес жидкости; W_w — вес стенки, крышки, оборудования и теплоизоляции; W_f — вес жидкости в пределах невздымаемой области (радиуса r); θ — половина угла, который определяет дугу

основания стенки резервуара, контактирующей с основанием; kR — расстояние от центра реакции сжатия на среднюю линию резервуара.

Предполагаем $\mu = r/R$, таким образом,

$$\mu = \frac{r}{R} \rightarrow W_s = W \left(1 + \frac{W_w}{W} - \mu^2 \right), \quad (6)$$

$$\theta = \arctan \left(\frac{\mu}{1-\mu} \right); \quad k = \frac{2}{\theta^2} (1 - \cos \theta), \quad (7)$$

$$M_R = RW \left(k \left(1 + \frac{W_w}{W} \right) + (1-k)\mu^2 - \mu^3 \right). \quad (8)$$

Максимальные вертикальные и радиальное напряжение в стене и основе резервуара следует определять по формуле [9]:

$$f_{\max} = 2,5 \frac{cW_s}{R\theta t}; \quad f_{rs} = \frac{1}{t_s} \left[\frac{\bar{E}t_s p_0^2 2R^2 (1-\mu)^2}{3} \right]^{\frac{1}{3}} \leq \sigma_{cr} = \frac{0,2Et}{R}, \quad (9)$$

где c — коэффициент упругости основания ($c = 1,0$ для твердого основания, $c = 0,5$ для гибкого основания).

Формула (9) представляет собой условие устойчивости равномерно сжатой вдоль образующей, шарнирно опертой по торцам замкнутой цилиндрической оболочки. Это соотношение согласуется с широко известными теоретическими и экспериментальными результатами работ для реально возможного параметра тонкостенности вертикальных цилиндрических стальных резервуаров в диапазоне $1000 < R/t < 2000$.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Haroun M.A.* Behavior of unanchored oil storage tanks: Imperial Valley Earthquake // Journal of Technical Topics in Civil Engineering. Vol 109. No 1. April 1983. ASCE.
- [2] *Choon-Foo and Shih.* Failure of liquid storage tanks due to earthquake excitation. EERL 81/04.
- [3] *Wozniak and Mitchell.* Basis of seismic design provisions for welded steel oil storage tanks. API Refining 43rd Mid-Year Meeting. May 9 1998.
- [4] Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 4: Silos, tanks, and pipelines, 2003.
- [5] *Timoshenko S.P. and Woinowsku-Krieger S.* Theory of plates and shells. McGraw-Hill, 1959.
- [6] *Cambra F.J.* Earthquake response considerations of broad liquid storage tanks. EERC 82/25.
- [7] *Clough D.P.* Experimental evaluation of seismic design methods for broad cylinder tanks. EERC 77/10.
- [8] *Hetenyi M.* Beams on elastic foundations. The University of Michigan Press, 1961.
- [9] *Priestley M.J.N.* Analysis and design of circular prestressed storage tanks // Journal Prestressed Concrete Institute. Vol. 30. No 4. July/August 1985. P. 64—85.

SEISMIC SAFETY GROUNDS FOR LARGE VERTICAL STEEL CYLINDRICAL TANKS

Kambiz Kangarloo

Moscow State University of Civil Engineering
Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow, Russia, 129337

The objectives of this paper are to highlight the principal effects of base uplifting on the seismic response of ground supported cylindrical steel tanks that are unanchored at their Base. Specific areas targeted for improvements are related to: a) Estimation of the loads exerted on anchored tanks, particularly the overturning moment, b) Estimation of the compressive stress and allowable shell buckling stress at the shell bottom.

Key words: Uplift, overturning, sloshing, cylindrical vertical steel tanks, seismic loading, simulation, elephant-foot, natural period, hydrodynamic pressure.