УДК 624.151

© Р. А. Мангушев, д-р техн. наук, профессор
© В. М. Кириллов, д-р техн. наук, профессор
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: ramangushev@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-3-84-89

© R. A. Mangushev, Dr. Sci. Tech., Professor
© V. M. Kirillov, Dr. Sci. Tech., Professor
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: ramangushev@yandex.ru

АНАЛИЗ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАЗВИТИЯ ОСАДОК ФУНДАМЕНТОВ СТАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ НА СЛАБЫХ ГРУНТАХ

ANALYSIS OF REGULARITIES OF FOUNDATION SETTLEMENT DEVELOPMENT OF STEEL CYLINDRICAL TANKS ON SOFT SOILS

Приведен анализ результатов измерений осадок оснований большого количества стальных цилиндрических резервуаров, возведенных на слабых грунтах в Российской Федерации и за рубежом. Установлены закономерности развития осадок основания по контуру резервуара. Предложена методика оценки средней и неравномерной осадки основания, возникающей в начальный период эксплуатации резервуара, в зависимости от диаметра и мощности толщи слабых грунтов.

Ключевые слова: неравномерные осадки стальных вертикальных цилиндрических резервуаров, результаты геодезических измерений, профиль эпюры осадки, толщина слабых грунтов, неравномерные осадки, статистический анализ.

The article presents the results of data analysis on measuring the base settlement of a number of steel cylindrical oil tanks erected both in the Russian Federation and abroad. The objective laws of base settlement over the contour of the tank are discovered. The regularities of settlement development along the contour of the tank are determined. A technique of estimating the average and non-uniform settlement of the base arising in the initial period of the tank operation depending on diameter and the thickness power of weak soils is offered.

Keywords: settlements of steel vertical cylindrical tanks, the results of geodetic measurements, settlement profile epure, thickness power of weak soils, irregular settlements, statistic analysis.

Введение

Строительство стальных цилиндрических вертикальных резервуаров на сильносжимаемых грунтах предъявляет высокие требования к расчету и устройству их оснований и фундаментов. Эти требования отражены в многочисленных российских и зарубежных нормах, касающихся деформаций оснований фундаментов, и в первую очередь неравномерных, для стальных вертикальных резервуаров (ГОСТ 52910–2008¹, СА-03-000–08², API 650³ и др.).

Как показали многочисленные исследования, неравномерные осадки наиболее опасны для ре-

зервуаров типа РВС (резервуар вертикальный стальной) — они приводят к концентрациям напряжений в узле сопряжения стенки с днищем с последующим разрушением сварных швов и повреждением соединения технологических трубопроводов с корпусом резервуара [3, 8, 11 и др.]. Для резервуаров с плавающей крышей неравномерность осадки по контуру фундамента чревата заклиниванием и зависанием плавающей крыши, что иногда приводит к авариям конструкции и выводу сооружения из строя [1, 3, 6, 9, 10, 12].

1. Характеристика объектов исследования

Для анализа оценки и установления закономерностей развития осадок фундаментов стальных вертикальных цилиндрических резервуаров, возводимых на слабых грунтах, и повышения надежности деформационных расчетов оснований авторами были рассмотрены результаты геотех-

¹ ГОСТ 52910–2008. Резервуары вертикальные цилиндрические для нефти и нефтепродуктов.

² СА-03-000–08. Правила проектирования, изготовления и монтажа вертикальных стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов.

³ API 650. Сварные стальные резервуары для хранения нефти. США, Вашингтон: Издательская служба API, 2005.

нического мониторинга осадок 164 резервуаров вместимостью от 1 до 20 тыс. куб. м. При этом учитывались инженерно-геологические условия площадок, размеры резервуаров, тип их фундаментов, сроки эксплуатации и другие факторы.

Так, из 102 резервуаров, возведенных на территории Российской Федерации, включенных в рассмотренную совокупность, 65 % размещалось в Западной Сибири, остальные — в трех районах Северо-Запада РФ. 62 резервуара из рассмотренной выборки построены на слабых грунтах прибрежных районов Великобритании, Бельгии, Нидерландов и ряда других стран [13].

В 90 % случаев продолжительность регулярных геодезических наблюдений составила более 1 года, а для 60 % — более 3 лет. Большая часть объектов, включенных в совокупность, характеризовалась данными многократных проведенных периодически наблюдений при точности определения высотного положения знаков на стенках резервуаров $\pm 4...5$ мм.

Геодезические марки на стенках располагались с шагом 6–9 м и в зависимости от размеров резервуара их количество составляло от 4 до 24 штук. Большинство рассмотренных резервуаров (89 %) возведены на фундаментах в виде песчаной подушки толщиной от 0,8 до 4 м на сильносжимаемых грунтах с модулем общей деформации $E < 10$ МПа.

Исследованная совокупность включала только крупные отечественные резервуары вместимостью от 5 до 20 тыс. куб. м, а также зарубеж-

ные вместимостью от 5 до 75 тыс. куб. м (см. таблицу).

2. Инженерно-геологические условия площадок размещения объектов наблюдений [7]

Для проведенного исследования наибольший интерес представляли площадки с мощной толщей слабых грунтов, т. е. такие, на которых возможны большие осадки фундаментов резервуаров.

Резервуары, расположенные на нефтяных месторождениях Западной Сибири в Тюменской области, возводились на площадках, как правило, сложенных аллювиальными отложениями на значительную глубину. Сверху обычно залегал слой торфа толщиной до 4 м.

Для ряда других площадок, расположенных на Северо-Западе РФ, характерно двухслойное основание, в котором верхний слой представлен суглинком с $E = 6-8$ МПа, а подстилающий пылеватый песок или супесь с $E = 8-10$ МПа распространялись на всю глубину активной зоны (16,7 % случаев).

Для 7,8 % случаев основание имело один слой, представленный суглинком или супесью с $E = 8-10$ МПа.

На нефтебазе в районе г. Пярну встречены особенно слабые грунты с модулем деформации (до глубины 20 м) не более 2–4 МПа. Здесь в верхней части напластования грунтов залегали мелкие и пылеватые пески с прослойками торфа или примесью органических веществ, подстилаемые слабыми ленточными глинами.

Параметры резервуаров рассмотренной совокупности

Вместимость резервуаров, тыс. куб. м	Количество	Процент содержания в совокупности	Диаметр, м	Высота стенки, м
Отечественные				
<5	10	9,8	10–20	11,8
5	57	56	22,8	11,8
10	12	11,7	34,2	12
20	23	22,5	45,6	12
Зарубежные				
<5	9	14,5	13,7–25	9,1–20,1
5–10	21	33,9	19,5–29,3	12,8–20,1
10–20	13	21	34–39	12,5–17
20–50	9	14,5	42,6–56,5	14,6–20,1
50–75	10	16,1	67–76,2	14–16,5

Для площадок, расположенных в Санкт-Петербурге, характерно двухслойное основание. Обычно в верхней части разреза залегали ленточные глины или иные четвертичные послеледниковые отложения, которые на глубине 10–20 м подстилались мореной.

Особенностью геологического строения площадок в Мурманске является то, что они на большую глубину сложены морскими илами с модулем деформации не более 3 МПа.

Сведений по инженерно-геологическим данным зарубежных резервуаров в литературных источниках приведено недостаточно, но большинство материалов из них относятся к площадкам строительства, сложенным слабыми грунтами с $E < 10$ МПа.

Таким образом, большинство рассматриваемых отечественных резервуаров было расположено на площадках, сложенных слабыми грунтами на значительную глубину. К особо неблагоприятным условиям размещения резервуаров можно отнести площадки строительства в районах Пярну и Мурманска, а также в некоторых районах Среднего Приобья. Относительно хорошие грунтовые условия характерны для площадок строительства резервуаров в центральных районах РФ, в частности, в Альметьевске.

3. Результаты статистического анализа

Одной из задач статического анализа являлось отыскание зависимостей между средней конечной измеренной осадкой стенки (края днища) S_{cp} и характеристиками ее неравномерности: ΔS_{max} — максимальная разность осадки; ΔS_o — максимальная разность диаметрально противоположных точек; $\Delta S_{c.oc}$ — наибольшая разность осадок соседних точек.

Для детализации исследуемых связей были построены графики частостей величин S_{cp} и ΔS_{max} для всей совокупности в целом и отдельно для групп резервуаров в зависимости от их объемов. Для большей части совокупностей характер распределения указанных величин оказался близок к нормальному [5].

Сопоставление графиков частостей показало в первом приближении, что установление зависимости $\Delta S_{max} = f(S_{cp})$, в отличие от зданий и сооружений конечной жесткости [2] для данной совокупности, оказалось невозможным. Отсутствие корреляционной связи подтверждает

и график, построенный в координатах S_{cp} — ΔS_{max} (корреляционная решетка для полной совокупности) (рис. 1). В этом случае коэффициент корреляции для рассчитанной зависимости не превысил $r = 0,18$ при доверительной вероятности $\alpha = 0,95$.

Анализ многочисленных профилей эпюр вертикальных деформаций (осадок) резервуаров по контуру в процессе окончания строительства и при дальнейшей эксплуатации позволил выявить три характерных случая (рис. 2):

а) конфигурация профиля осадок по мере развития средней осадки не изменяется; осадки, как правило, неравномерны и с первоначальной нерегулярностью профиля связаны незначительно;

б) профиль осадок по характеру не изменяется, а неравномерность оседания совпадает с первоначальной неравномерностью осадки;

в) профиль осадки по контуру изменяется, и со временем при его загрузке происходит его выравнивание.

Отметим, что в первых двух случаях оба вида неравномерности обусловлены осадкой основания, в третьем — причины могут быть различными.

Характеристикой динамики развития профилей осадок резервуаров служат графики зависимости осадки основания от времени. Сопоставление их с эпюрами осадок по контуру позволило установить, что основные черты профиля формируются либо при испытательном наливе в резервуар, либо в течение первого года эксплуатации. В последующем форма профиля контура изменяется незначительно, что подтверждается пологостью графика зависимости $\Delta S_{max} = f(S_{cp})$,

Рис. 1. Общая совокупность экспериментальных точек зависимости $\Delta S_{max} = f(S_{cp})$: 1 — по средним в интервале; 2 — подобранная функция

Рис. 2. Изменение профилей эпюр осадок по контуру резервуара: 1 — профиль эпюры осадки до загрузки резервуара; 2 — то же после его загрузки

а в некоторых случаях и уменьшением величины $\Delta S_{\max}$ во времени.

Это объясняется тем, что верхняя часть основания, как наиболее неоднородная, уплотняется в первую очередь; в последующем уплотняются более однородные подстилающие грунты. Уплотнение верхних слоев завершается при первых наливах в резервуар, и в связи с этим при статистическом анализе могут быть использованы величины осадок в начальный период эксплуатации, включая гидравлическое испытание.

Районы размещения резервуаров были сложены грунтами разных генетических типов. Поскольку основание по краю днища резервуара (под стенкой) загружено равномерно, неодинаковое оседание точек стенок обусловлено преимущественно неоднородностью оснований

и грунтов, которую при изысканиях оценить трудно.

Поэтому данный фактор на основе результатов измерений был условно охарактеризован величиной $i = (\Delta S_{\max} / S_{\text{cp}}) \cdot 100 \%$. Для аллювиальных грунтов Западной Сибири эта величина составила 90–120 %, ледниковых и послеледниковых отложений второго исследуемого района — 64 %, неуплотненных ленточных глин третьего района — 19 %, толщ морских илов, слабых супесей и суглинков четвертого района — 25 %.

Анализ зависимостей $\Delta S_{\max} = f(S_{\text{cp}})$ по средним значениям в интервале для каждого из районов с учетом объема резервуаров позволил сделать вывод, что форма профиля эпюры осадки по периметру и вид графиков $\Delta S_{\max} = f(S_{\text{cp}})$ зависят, главным образом, от мощности и неоднородности толщи сжимаемых грунтов.

В свою очередь, это привело к необходимости более подробного рассмотрения инженерно-геологических условий площадок строительства резервуаров и выбора критерия оценки слагающих их грунтов с учетом размеров резервуаров рассмотренной совокупности, исключив случаи применения свайных фундаментов. Поскольку независимо от объема высота стенки у большинства рассмотренных резервуаров была стандартна и равнялась примерно 12 м, то в качестве такого критерия было выбрано отношение $H_{\text{гр}}/D$, где $H_{\text{гр}}$ — мощность толщи слабых грунтов с модулем общей деформации $E < 10$ МПа [10]; D — диаметр резервуара. Для учета фактора времени по имеющимся и обработанным данным были выбраны величины средней S_{cp} , максимальной $S_{\max}$ и минимальной $S_{\min}$ осадок всех имевшихся в совокупности отечественных резервуаров за первый год эксплуатации, включая гидравлическое испытание.

Это позволило сформировать иной, чем предыдущие, массив исходных данных, по которому была проведена компьютерная статическая обработка, которая позволила подобрать интерполирующие уравнения для функций $S_{\text{cp}} = f(H_{\text{гр}}/D)$, $S_{\max} = f(H_{\text{гр}}/D)$, $S_{\min} = f(H_{\text{гр}}/D)$.

Они имели следующий вид при доверительной вероятности $\alpha = 0,99$:

$$S_{\max} = (27,70H_{\text{гр}}/D + 1,1) \text{ см} \quad (1)$$

при коэффициенте корреляции $0,909 < r < 0,971$;

$$S_{\text{cp}} = f(25,64H_{\text{гр}}/D - 0,82) \text{ см} \quad (2)$$

при $0,959 < r < 0,987$;

$$S_{\min} = f(23,27H_{\text{гр}}/D - 3,54) \text{ см} \quad (3)$$

при $0,862 < r < 0,956$.

Следовательно, с учетом выражений (1) и (3) максимальная неравномерность осадки по контуру резервуара может быть оценена по эмпирической формуле

$$\Delta S_{\max} = (4,43H_{\text{гр}}/D + 4,64) \text{ см}. \quad (4)$$

Высокие значения коэффициентов корреляции показывают, что найденные линейные зависимости хорошо отвечают результатам геодезических наблюдений за осадками резервуаров рассматриваемой выборки.

На рис. 3 приведен сводный график линейных зависимостей (1)–(3).

Таким образом, для интервала значений $0,15 < H_{\text{гр}}/D \leq 1,7$, в котором находились все резервуары рассмотренной выборки, на стадии изысканий и проектирования возможно, пользуясь предложенными графиками, для соответствующих инженерно-геологических условий оценить величины средней и неравномерной осадки по контуру резервуара в начальный период его эксплуатации, обычно представляющий наибольшую опасность для его дальнейшей эксплуатации.

Выводы

1. Сопоставление графиков максимальной неравномерности от частоты средних осадок показало, что зависимость $\Delta S_{\max} = f(S_{\text{ср}})$, в отличие от случая зданий и сооружений конечной жесткости, отсутствует.

Рис. 3. Сводные графики эмпирических зависимостей от отношения $H_{\text{гр}}/D$: 1 — $S_{\max}$; 2 — $S_{\text{ср}}$; 3 — $S_{\min}$

2. Анализ эпюр вертикальных деформаций (осадок) резервуаров по контуру в процессе окончания строительства и дальнейшей эксплуатации позволил выявить три характерных случая:

а) конфигурация профиля осадок по мере развития средней осадки не изменяется; осадки, как правило, неравномерны и с первоначальной нерегулярностью профиля связаны незначительно; б) профиль осадок по характеру не изменяется, а неравномерность оседания совпадает с первоначальной неравномерностью осадки; в) профиль осадки по контуру изменяется, и со временем при его загрузке происходит его выравнивание. В случаях а и б оба вида неравномерности обусловлены осадкой основания, в случае в причины могут быть различными.

3. На стадии изысканий и проектирования для соответствующих инженерно-геологических условий и размеров резервуаров возможно оценить величины средней и неравномерной осадки по контуру резервуара для начального периода его эксплуатации по эмпирическим формулам (1)–(4).

Библиографический список

1. Далматов Б. И. Методы строительства на слабых водонасыщенных грунтах // Основания, фундаменты и механика грунтов. Л.: ЛИСИ, 1978. С. 5–18.
2. Иовчук А. Т. О формах изгиба зданий на сильно сжимаемых грунтах // Основания, фундаменты и механика грунтов. Л.: ЛИСИ, 1962. С. 130–138.
3. Коновалов П. А., Мангушев Р. А., Сотников С. Н., Землянский А. А., Тарасенко А. А. Фундаменты стальных резервуаров и деформации их оснований. М.: АСВ, 2009. 335 с.
4. Мангушев Р. А., Сотников С. Н. Проектирование и строительство оснований и фундаментов стальных вертикальных цилиндрических резервуаров за рубежом. М.: ВНИИОЭНГ, 1979. 87 с.
5. Мангушев Р. А., Сотников С. Н. Проектирование и строительство резервуаров на слабых грунтах. М.: ВНИИОЭНГ, 1981. 64 с.
6. Мангушев Р. А., Городнова Е. В. Исследование влияния линз слабого грунта на неравномерность осадки стенки стального вертикального цилиндрического резервуара // Тр. междунар. науч.-практ. конф. по проблемам механики грунтов, фундаментостроению и транспортному строительству. Пермь, 2004. Т. 1. С. 108–113.

7. Мангушев Р. А. Исследование деформаций оснований стальных вертикальных цилиндрических резервуаров (в условиях слабых грунтов): дис. ... канд. техн. наук. Л.: ЛИСИ, 1980. 240 с.

8. Тарасенко А. А., Чепур П. В., Чирков С. В. Исследование изменения напряженно-деформированного состояния вертикального стального резервуара при развитии неравномерной осадки наружного контура днища // Фундаментальные исследования. 2013. № 10, ч. 15. С. 3409–3413.

9. Чепур П. В., Тарасенко А. А. Влияние параметров неравномерной осадки на возникновение предельных состояний в резервуаре // Фундаментальные исследования. 2014. № 8, ч. 7. С. 1560–1564.

10. Belloni L., Garassino A., Jamiolkowski M. Differential settlements of petroleum steel tanks // Proceedings of the 9th international Conference on soil Mechanics and Foundation Engineering, Cambridge. London: Pentech Press, 1975. Pp. 323–328.

11. Clarke J. S. How to handle tank-bottom and foundation problems // Oil and Gas Journal. 1971. Vol. 69, № 27. Pp. 19–42.

12. Kim Y. S., Shen C. K., Bang S. Oil storage tank foundation on soft clay // Proc. 8-th ECSMFE. Vol. 1. Helsinki, 1983. Pp. 371–374.

13. Penman A. G. Foundation for storage tanks on reclaimed land at Teesmouth // Proc. Inst. Civil Eng. May 1967. Vol. 37. Pp. 19–42.

References

1. Dalmatov B. I. *Metody stroitel'stva na slabykh vodonasyshchennykh gruntakh* [Methods of construction on weak water-saturated soil]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov – Bases, foundations and mechanics of soil*, 1978, pp. 5–18.

2. Iovchuk A. T. *O formakh izgiba zdaniy na sil'no szhimaemykh gruntakh* [About the bending forms of buildings on strongly compressed soil]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov – Bases, foundations and mechanics of soil*, 1962, pp. 130–138.

3. Konovalov P. A., et al. *Fundamenty stal'nykh rezervuarov i deformatsii ikh osnovaniy* [Bases of steel tanks and deformation of their foundations]. Moscow, ASV Publ., 2009, 335 p.

4. Mangushev R. A., Sotnikov S. N. *Proektirovanie i stroitel'stvo osnovaniy i fundamentov stal'nykh vertikal'nykh tsilindricheskikh rezervuarov za rubezhom* [Design and construction of the bases and foundations of steel vertical cylindrical tanks abroad]. Moscow, VNIIOEhNG Publ., 1979, 87 p.

5. Mangushev R. A., Sotnikov S. N. *Proektirovanie i stroitel'stvo rezervuarov na slabykh gruntakh* [Design and construction of tanks on weak soil]. Moscow, VNIIOEhNG Publ., 1981, 64 p.

6. Mangushev R. A., Gorodnova E. V. *Issledovanie vliyaniya linz slabogo grunta na neravnomernost' osadki stenki stal'nogo vertikal'nogo tsilindricheskogo rezervuara* [Research of the influence of weak soil pockets on non-uniformity of settlement of the wall of the steel vertical cylindrical tank]. *Trudy mezhdunar. nauch.-prakt. konf. po problemam mekhaniki gruntov, fundamentostroeniyu i transportnomu stroitel'stvu* [Proc. of the Int. sci.-pract. conf. on problems of mechanics of soil, foundation engineering and transport construction]. Perm, 2004, vol. 1, pp. 108–113.

7. Mangushev R. A. *Issledovanie deformatsiy osnovaniy stal'nykh vertikal'nykh tsilindricheskikh rezervuarov (v usloviyakh slabykh gruntov)*. Diss. kand. tekhn. nauk [Study of deformation of steel vertical cylindrical tank bases. PhD in Sci. Tech. diss.]. Leningrad, LISI Publ., 1980, 240 p.

8. Tarasenko A. A., Chepur P. V., Chirkov S. V. *Issledovanie izmeneniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya vertikal'nogo stal'nogo rezervuara pri razvitii neravnomernoy osadki naruzhnogo kontura dnishcha* [Research of the change of the intense deformed state of the vertical steel tank in case of development of non-uniform settlement of the bottom outside circuit]. *Fundamental'nye issledovaniya – Fundamental research*, 2013, no. 10, pt. 15, pp. 3409–3413.

9. Chepur P. V., Tarasenko A. A. *Vliyanie parametrov neravnomernoy osadki na vozniknovenie predel'nykh sostoyaniy v rezervuare* [Influence of parameters of non-uniform settlement on the origin of limit state in the tank]. *Fundamental'nye issledovaniya – Fundamental research*, 2014, no. 8, pt. 7, pp. 1560–1564.

10. Belloni L., Garassino A., Jamiolkowski M. *Differential settlements of petroleum steel tanks*. Proc. of the 9-th International conference on soil mechanics and foundation engineering. Cambridge, London, Pentech Press, 1975, pp. 323–328.

11. Clarke J. S. How to handle tank-bottom and foundation problems. *Oil and Gas Journal*, 1971, vol. 69, no. 27, pp. 19–42.

12. Kim Y. S., Shen C. K., Bang S. Oil storage tank foundation on soft clay. Proc. 8-th ECSMFE, vol. 1. Helsinki, 1983, pp. 371–374.

13. Penman A. G. Foundation for storage tanks on reclaimed land at Teesmouth. Proc. Inst. Civil Eng. May 1967, vol. 37, pp. 19–42.