

УДК 621.642.39.03

ЭВОЛЮЦИЯ ВЗГЛЯДОВ НА ВОПРОСЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ДОПУСТИМЫХ ОСАДКОВ РЕЗЕРВУАРОВ

Тарасенко А.А., Чепур П.В.

*Тюменский государственный нефтегазовый университет,
Тюмень, e-mail: a.a.tarasenko@gmail.com, chepur@me.com*

В статье проанализированы отечественные и зарубежные источники по вопросу определения допустимых параметров осадки вертикальных стальных резервуаров. Выполнен обзор работ, рассматривающих критерии оценки равномерных осадок, крена и неравномерной деформации. Проанализирована зарубежная нормативная база, в частности, американские стандарты API 650 и API 653, европейские BS 2654, EN 14015, регламентирующие допустимые значения осадки резервуаров. Выполнено сравнение подходов российских нормативных документов к оценке допустимых величин осадок с зарубежными источниками. Установлено, что в отечественных нормативах учитывается только осадка наружного контура днища, при этом рассматривается ограниченное число параметров осадки. Однако в стандарте API 653 предложены численные зависимости к определению допустимых величин неравномерной осадки центральной части днища, окрестной зоны и наружного контура конкретно для индивидуального случая деформирования резервуара, где учитываются особенности контура деформации, история развития осадки, подкрепленная архивными данными нивелировки и результатами диагностики. Предложено рассмотреть возможность гармонизации отечественной нормативной документации по вопросу оценки допустимых осадок оснований РВС.

Ключевые слова: резервуар, РВС, НДС, осадка, основание, МКЭ, прочность

EVOLUTION OF VIEWS ON MATTERS OF A CERTAIN MAGNITUDE ALLOWED DIFFERENTIAL SETTLEMENT OF TANKS

Tarasenko A.A., Chepur P.V.

Tyumen State Oil and Gas University, Tyumen, e-mail: a.a.tarasenko@gmail.com, chepur@me.com

The paper analyzes the domestic and foreign sources on defining acceptable parameters rainfall vertical steel tanks. A review of works dealing with the evaluation criteria of uniform sediment, bank and non-uniform warping. Analyzed foreign regulatory framework, in particular, American Standard API 650 and API 653, European BS 2654, EN 14015 governing admissible draft vessels. A comparison of approaches to the Russian regulatory documents assessing allowable values precipitate from foreign sources. Found that in domestic regulations cover only the outer contour of the bottom sediment, with a limited number of parameters considered rainfall. In the API 653 according to the definition of allowable values differential settlement of the central part of the bottom, weld zone and the outer contour specifically for the individual case of deformation of the tank, which takes into account features of the contour warping, the history of precipitation, supported by archival data leveling and diagnostics. Suggested the possibility of harmonization of documentation on assessing sediment bases tanks.

Keywords: tank, aboveground tank, stress-strain state, settlement, base, FEM, strength

Мировая практика эксплуатации крупногабаритных цилиндрических вертикальных стальных резервуаров показывает, что существует проблема оценки технического состояния сооружений при развитии осадок их оснований и фундаментов. Осадка может быть вызвана действием различных факторов: изменением прочностных свойств основания, а также гидрогеологических условий площадки, имеющими место предельными или непроектными режимами эксплуатации, ошибками на этапах проектирования и строительства. Международный опыт ученых и инженеров, статистические данные и сведения диагностики показали, что с подобными проблемами приходится сталкиваться повсеместно, на различных площадках с резервуарами типа РВС, независимо от свойств грунтов. Расширение международного сотрудничества, привлечение зарубежных подрядчиков для сооружения резервуаров на территории РФ предопределило необходимость гармонизации

отечественной нормативной базы в области резервуаростроения.

Основной проблемой, возникающей при исследовании и обобщении подходов влияния осадок на конструкцию резервуаров, является существенное различие отечественной и зарубежной нормативной документации. Так, резервуары, построенные по стандартам ГОСТ, СА, РД (РФ), API (США), EN (Евросоюз) BS (Великобритания), имеют различные конструкции оснований и фундаментов, геометрические, жесткостные и прочие характеристики.

Авторы статьи постарались ретроспективно обобщить критерии оценки напряженно-деформированного состояния вертикальных стальных резервуаров и требования к техническому состоянию оснований при их осадках. Для этого использованы научные исследования, данные натурных измерений российских и зарубежных ученых, широкая номенклатура нормативной документации различных стран.

Большое число исследователей ошибочно считают, что неравномерная осадка не представляет угрозы для крупногабаритных резервуаров, конструкции которых работают как жесткий штамп. Однако согласно работам [1–2, 22, 46], неравномерная осадка может привести как к значительным повреждениям, так и разрушению РВС. Существуют расхождения во мнениях среди инженеров, строителей и эксплуатирующих организаций насчет назначения предельных значений величины осадки. Вопросами осадок вертикальных стальных резервуаров занимались отечественные и зарубежные ученые: В.Б. Галеев, И.В. Слепнев, Ю.В. Соболев, В.В. Любушкин, А.А. Тарасенко, П.А. Коновалов, В. Кршупка, К. Кавано, С. Ямамото, Р. Бэлл, Е. Карлсон, Д. Кларк, Е. Де Бир, П. Грин, Д. Гринвуд, Ф. Губер, К. Гербер, Т. Ламбэ, Д. Лангвелд, З. Малик, А. Пэнман, Д. Ринн, Р. Саллеван и другие.

На нефтеперерабатывающем заводе TONEN в Кавасаки, Япония, [43], осадки резервуаров диаметром 64 метра достигали величины до 1,8 м. Инженеры компании TONEN при измерении крена получили значение 1/152, а также выявили участки с наличием неравномерных составляющих осадки с максимальными значениями до 0,5 м. Очевидно, что значения измеренных деформаций резервуаров TONEN превысили допустимые величины, однако натурное обследование не принесло никаких результатов об очевидных структурных нарушениях каких-либо конструкций данных резервуаров.

Неравномерная осадка согласно [46] возникает вследствие одной или нескольких причин: неоднородной структуры и различной сжимаемости участков грунтового основания; неравномерной нагрузки, приложенной к основанию; полей напряжений, действующих касательно к определенной зоне грунтового слоя. Такие факторы могут присутствовать в различных сочетаниях у каждого резервуара, подверженного неравномерным осадкам. Важной задачей является оценка их степени влияния при расчетах в период проектирования, строительства, ремонта или реконструкции. Для уменьшения негативного влияния неравномерных осадок на техническое состояние сооружения, принимаются следующие меры: недопущение роста нагрузки на основание, которая при превышении допустимого предела, может привести к потере несущей способности; обеспечение условий, при которых деформации, возникающие от главных и сдвиговых напряжений в основании, будут находиться в пределах до-

пустимых значений. Предлагаются различные критерии оценки осадки РВС. Данные критерии во многих случаях сфокусированы на определенных элементах резервуара и однофакторной оценке частных случаев. Некоторые исследователи обобщили данные критерии очень приблизительно, что привело к ошибочным результатам. Для всех критериев оценки, описанных ниже, были рассмотрены механизмы деформирования металлоконструкций, при этом рассмотрены основные элементы резервуара. Также проанализирована международная нормативная база по рассматриваемому вопросу.

Приведем классификацию осадок, предложенную отечественными исследователями В.Б. Галеевым и А.А. Тарасенко [1, 2], она не противоречит большинству существующих классификаций, опубликованных в работах зарубежных авторов:

- 1) равномерная осадка: по площади, по периметру;
- 2) неравномерная осадка: крен, неравномерная по площади, неравномерная по контуру, «ступенька», осадка в виде развала основания по диаметру РВС, диаметральной;
- 3) локальные просадки днища.

Равномерная осадка по площади основания резервуара характеризуется одинаковым смещением всех точек площади днища и стенки в вертикальной плоскости на некоторую величину u . Обычно такой вид осадки возникает при гидроиспытаниях резервуара после строительства или при изменении гидрогеологических условий района строительства во время эксплуатации. Это характерно для крупногабаритных резервуаров, возведенных на грунтовом основании с железобетонным фундаментным кольцом. Исправить равномерную по площади осадку достаточно сложно т.к. деформируется большой массив грунта, превышающий диаметр резервуара. Неосесимметричных составляющих нагрузки при этом практически не возникает. Равномерная по периметру осадка характерна для всех типов крупногабаритных РВС, имеющих слабое основание, сложенное водонасыщенными грунтами. Обычно такой вид осадки проявляется при гидроиспытаниях и в первый период начала эксплуатации резервуара, что обусловлено процессами уплотнения и консолидации грунтового массива.

Крен представляет собой осадку, при которой весь резервуар по площади и наружному контуру получает уклон в одном направлении. Величина крена характеризуется либо углом поворота плоскости днища резервуара относительно горизонта, либо разностью высотных отметок диаметрально противоположных точек окрайки днища.

Неравномерная по площади осадка встречается у РВС, построенных на некачественных свайных основаниях или в районах с присутствием мерзлых грунтов. Осадка в виде развала, также, как и диаметральной осадка основания, встречаются довольно редко и, как правило, обусловлены низким качеством строительства или ошибками проектно-изыскательских работ. Развал происходит в двух направлениях: в периферии с зоной развала по диаметру либо по линии, близкой к нему [2]. При этом возникают недопустимые напряжения в стенке и соединительных узлах уторного шва и верхнего узла сопряжения кровли, стенки и опорного кольца по линии развала.

Впервые в отечественном резервуаростроении упоминается дефект узла сопряжения стенки и окрайки типа «ступенька» в работе А.А. Тарасенко [2]. «Ступенька» представляет собой резкий перепад отметок наружного контура днища на коротком участке, образующийся вследствие локальной просадки отдельного участка наружного контура днища. Причиной этому обычно служит брак строительно-монтажных работ.

Неравномерная осадка по контуру является наиболее часто встречающейся. При такой осадке основания зона под стенкой РВС по периметру имеет значительно большую величину осадки по сравнению с основной площадью основания. Рассмотрим случай равномерной осадки, являющийся наименее опасным для целостности конструкции РВС.

Равномерная осадка

Равномерная осадка оснований резервуаров, вызываемая деформацией грунтов, является частым явлением

в практике резервуаростроения. Уже на этапе гидроиспытаний в результате сжатия грунта под нагрузкой столба жидкости и массой конструкции резервуара, резервуар приобретает начальную равномерную осадку. Так, из опыта работ [2], приводится случай произошедшей равномерной осадки РВСПК-50000 на 270 мм после проведения гидроиспытаний. Такой вид осадки может привести к повреждению соединений стенки с технологическими трубопроводами в связи с различными значениями осадки стенки и опор трубопроводов. Так, возможно возникновение избыточных напряжений в зонах присоединения узлов дополнительной жесткости к стенке РВС. Многолетний опыт эксплуатации РВС показал, что данная проблема решается путем использования компенсирующих подвижных соединений в узлах соединения, также возможен периодический подъем опор трубопроводов. А также на практике подводящие трубопроводы присоединяются к резервуару только по окончании гидроиспытаний.

Вопросы влияния элементов дополнительной жесткости (приемо-раздаточного узла, трубопроводов газоуравнительной системы и аварийного сброса, аварийного пожаротушения и орошения) на напряженно-деформированное состояние конструкции рассмотрены в трудах [11, 21, 24–25]. В данных работах получены зависимости параметров НДС металлоконструкций от величины равномерной осадки РВС-20000. В отраслевых нормативных документах различных стран допустимая величина равномерной осадки варьируется от 200 до 1500 мм и более (табл. 1).

Таблица 1

Допустимые значения равномерной осадки в нормативных документах

Нормативный документ	Максимальная величина осадки, мм
ГОСТ 52910	200
РБ Серия 03 Выпуск 69	
РД-23.020.00-КТН-283-09	
СА-03-000-08	
API 653 (США)	не регламентируется*
	50**
BS 2654 (Великобритания)	1000–1500***
Eurocode EN 14015	не регламентируется*

Примечания: * – максимальная величина осадка назначается организацией-заказчиком в тех. задании;

** – за один этап гидроиспытания;

*** – при дополнительном техническом обосновании проектной организацией.

Главным отличием отечественных требований от западных при ограничении равномерной осадки является то, что в стан-

дарте API проектирование резервуаров осуществляется «до первого фланца», т.е. не учитываются элементы дополнительной

жесткости при оценке осадки. В российской документации имеет место комплексный подход к проектированию – принимается во внимание всё технологическое оборудование и обвязка РВС. Исходя из этого назначаются предельные допуски по величине равномерной осадки.

Крен

Крен представляет собой осадку, при которой весь резервуар по площади и наружному контуру получает уклон в одном направлении. Величина крена характеризуется либо углом поворота плоскости днища резервуара относительно горизонта, либо разностью высотных отметок диаметрально противоположных точек окрайки днища. В трудах [1, 2] крен раскладывался в ряды Фурье с коэффициентом гармоник, равным 1. Крен оболочечной конструкции стенки может стать причиной нарушения эксплуатационной пригодности сооружения. Вследствие крена стенки уменьшается действительный уровень налива продукта, изменяется форма оболочки, а также увеличиваются напряжения в стенке. Влияние крена на НДС резервуаров рассматривается в работах [38–39, 45]. С использованием аналитических методов в [46] авторами получена зависимость, позволяющая определить максимально допустимое значение крена без превышения допустимых напряжений в стенке:

$$\delta_{\max} \leq \frac{-4\sigma_b(t_{\max} - t_k)}{[n]\gamma_w G_s D} - 2(H - \Delta h_d), \quad (1)$$

где $\delta_{\max}$ – максимальная разница высотных отметок любых двух диаметрально противоположных точек, м;

H – высота резервуара, м;

Δh_d – расстояние от уровня взлива до верхнего края стенки, м;

σ_b – предел прочности стали стенки, МПа;

$t_{\max}$ – толщина стенки, мм;

t_k – припуск на коррозию для толщины стенки, мм;

$[n]$ – коэффициент запаса прочности стенки;

γ_w – плотность жидкости, кг/м³;

G_s – гравитационная постоянная, м/с²;

D – диаметр резервуара, м.

Лангвелд в [44] рекомендует ограничивать максимальное значение осадки между двумя диаметрально противоположными точками в пределах 50 см, а также допускать отклонение стенки от вертикали в любой точке на величину не более 30 см. Как утверждается в работе, данные пределы ограничивают добавочные кольцевые напряжения до значений чуть менее 2%

от максимальных кольцевых напряжений, вызванных гидростатическим давлением столба жидкости, а также препятствуют радиальным деформациям стенки более чем на 2,5 см.

Согласно [46] разрушение резервуара от осадки типа «крен» практически невозможно. С практической точки зрения, максимальная величина параметра крена – $\delta_{\max}$, не должна превышать $2\Delta h_d$, чтобы не допускать заклинивания плавающей крыши и понтона и появления чрезмерных напряжений у резервуаров со стационарной крышей. Значение допустимой величины крена РВС рекомендуется рассчитать по формуле (2):

$$\delta_{\max} \leq 2\sqrt{\Delta R_{\text{т01}} \cdot D}, \quad (2)$$

где $\Delta R_{\text{т01}}$ – допустимое расстояние между плавающей крышей и стенкой, м;

$\delta_{\max}$ – максимальная разница высотных отметок любых двух диаметрально противоположных точек, м.

Авторами проанализирована нормативно-техническая документация РФ и США, в которой определены допустимые параметры крена. В нормативной базе США и РФ имеются принципиальные различия в части назначения допустимой величины. Российские регламентирующие документы [29–31] жестко ограничивают величину крена: 1/250 – для РВС и 1/500 для РВСП (ПК, ПА). В американском стандарте API 653 дана формула (3), позволяющая рассчитать допустимую величину крена в зависимости от высоты, диаметра и свойств стали резервуара. Предложенная зависимость основана на результатах работы [46].

$$S_{\max, ft} = \frac{(L^2 \cdot Y \cdot 11)}{2 \cdot E \cdot H}, \quad (3)$$

где $S_{\max, ft}$ – максимальная разница высотных отметок любых двух диаметрально противоположных точек, футы (ft);

L – длина дуги между точками измерения (не менее 8 точек измерения, длина дуги не должна превышать 32 фута), футы (ft);

Y – предел текучести стали, фунт-сила на квадратный дюйм (lbf/in²);

E – модуль Юнга стали, фунт-сила на квадратный дюйм (lbf/in²);

H – высота резервуара, футы (ft).

Анализируя подходы к оценке допустимой величины крена в отечественных и зарубежных стандартах, можно сделать вывод об их существенных различиях. Так, в нормативах РФ даны довольно жесткие конкретные допустимые значения крена для РВС и РВСП(К) вне зависимости от их размеров. В стандарте API, в свою очередь, представлена формула, позволяющая

определить допустимую величину крена в зависимости от различных параметров – типоразмера резервуара, марки стали. При расчете допустимого крена РВС-20000 по типовому проекту ТП-704-60-1 с использованием формулы (3) согласно API 653, получим предельно допустимое значение крена 0,0019, что примерно соответствует отношению 1/500, принятому в отечественном стандарте [30]. Это говорит о том, что максимально допустимые значения крена, назначенные в российских стандартах, не противоречат требованиям международных документов.

Неравномерная осадка

Подходы к оценке неравномерной осадки имеют существенные различия в отечественных и зарубежных источниках. В американском стандарте API 653 критерии определения допустимых параметров неравномерной осадки резервуаров основаны на исследованиях [46], где разделяются 3 типа осадки металлоконструкций: стенки РВС, центральной части днища и окрестной области в зоне влияния стенки и уторного шва. В отечественной НТД при оценке неравномерной осадки во внимание принимаются только отметки наружного контура днища резервуара. В нормативной документации Евросоюза – Eurocode EN 14015 вообще не регламентируются разрешенные параметры осадки, проектные организации самостоятельно назначают и рассчитывают прогнозную и максимальную неравномерную осадку на весь срок эксплуатации индивидуально для каждого РВС. Также при необходимости и соответствующем обосновании в зависимости от прогнозируемых показателей осадки, назначается периодичность и объем мониторинга резервуаров.

Авторы попытались обобщить подходы к оценке неравномерной осадки, сравнить требования нормативной базы США и РФ по этому вопросу. Далее предлагается рассмотреть работу [46], которая является основой действующих требований нормативного документа API 653 в части назначения предельных значений неравномерных осадок РВС.

Оценка воздействия неравномерной осадки на стенку резервуара

Неравномерная осадка может привести к избыточным деформациям стенки и возникновению в ней опасных напряжений. Деформация стенки, которая приводит к тому, что она приобретает искривленную цилиндрическую форму, может стать причиной заклинивания плавающей крыши резервуара. А чрезмерные напряжения могут

стать причиной повреждения и разрушения стенки и, как следствие, разлива содержимого РВС.

Ламбе, Лангвелд, Малик и Пэнман в [43–44, 47] предлагают схожие подходы при обосновании допустимых значений неравномерной осадки (для конструкции стенки). Ламбе и Пэнман предложили оценивать общую деформацию оболочки стенки в отношении к диаметру резервуара, тогда как Лангвелд и Малик оценивают локальные деформации по контуру стенки.

Чтобы сравнить критерии в эквивалентных условиях, расчеты и критерии авторов Лангвелда и Малика были адаптированы и пересчитаны в [46]. Было принято допущение о том, что внеплоскостная деформация вызывается общей деформацией стенки, S .

$$S = S_{\max} \cdot \cos\left(\frac{4X}{D}\right), \quad (4)$$

где $S_{\max}$ – максимальная разность отметок любых двух точек в пределах просадочной зоны, мм;

X – окружная координата (по контуру стенки), м.

Данная модель была проверена в натуральных условиях на реальных резервуарах [45], была доказана ее адекватность и состоятельность.

Лангвелд и Малик определяют контур депланации нижней кромки стенки по трем смежным точкам, полученным путем нивелировки. Ламбе и Пэнман рассчитывают функцию депланации, используя 4 точки, после оценивают максимальное значение SAG (максимальная разница отметок четырех окружных точек резервуара). Ламбе и Пэнман используют функцию просадки в вертикальной плоскости по всей длине просадочной зоны. По причине большого числа точек измерения n , Лангвелдом стал учитываться максимальный радиус кривизны в рамках данной функции. Малик подтвердил, что использование максимального радиуса кривизны приводит к высокой точности расчета [45].

Значительные значения отклонения кривой наружного контура днища от горизонтали могут возникнуть как по причине локальной осадки, так и по причине осадки всего резервуара. Предположение Лангвелда о том, что при помощи синусоиды можно описать локальную деформацию, оказалось неполноценным, т.к. очень часто имеют место локальные деформации. Критерий, предложенный Маликом, согласуется как с локальными, так и с общими деформациями, при этом используется значительное количество точек измерения.

Большинство проектных организаций США при назначении области допустимых значений неравномерной осадки стенки руководствуются величиной вертикальной составляющей депланации, которая влияет на безотказную работу понтона или плавающей крыши. Такой подход применим к старым резервуарам малого диаметра и в настоящее время не является актуальным. Значительное число современных резервуаров имеют большее соотношение диаметра к высоте, таким образом, они могут иметь гораздо большие деформации конструкции, и имеющиеся значения осадки не влияют на их нормальную эксплуатацию. Более того, новые виды уплотнений для герметизации плавающих покрытий обеспечивают более широкий диапазон радиальных отклонений стенки, что позволяет эксплуатировать резервуар с увеличенной осадкой стенки. Несмотря на это, вполне вероятно возникновение недопустимых напряжений в стенке.

Де Бир в [38] дает обоснование тому, что неравномерная осадка является причиной возникновения недопустимых напряжений в стенке. Он установил связь между приращением вертикальных перемещений за счет неравномерной осадки резервуара по периметру ΔS_i и радиусом кривизны в вертикальной плоскости в этой же точке R_c , предложил соотношение:

$$(R_c)_i = \frac{l^2}{2\Delta S_i}, \quad (5)$$

где l – расстояние между точками измерения осадки, м.

Автор выяснил, что при радиусе кривизны $R_c < 1500$ м появляются перенапряжения в конструкциях резервуаров со стационарной крышей диаметром менее 20 м. Де Бир также определил безопасное соотношение для резервуаров с плавающими покрытиями:

$$\Delta S_i / l \leq 1/450. \quad (6)$$

Анализ данного выражения позволяет получить более точное соотношение между величинами неравномерной осадки и напряжениями в стенке резервуара. В [46] сформулировано соотношение между радиусом кривизны, используемым Де Биром, и изгибными напряжениями в стенке:

$$(R_c)_i \approx \frac{HE}{\sigma}, \quad (7)$$

где H – высота резервуара, футы (ft);
 E – модуль Юнга стали, фунт-сила на квадратный дюйм (lbf/in²).

Подставляя выражение (5) в выражение (7) и заменяя действующее напряжение σ на предел прочности σ_b , получается следующее соотношение:

$$\Delta S_i = \frac{Kl^2}{HE} \sigma_b, \quad (8)$$

где K – коэффициент, учитывающий нелинейное поведение материала стенки, вторичные эффекты геометрии резервуара и другие факторы.

Изучая особенности поведения конструкций стенки резервуара, особенно случаи разрушения, ставилась задача получить эмпирические зависимости коэффициента K для обоснования влияния неравномерной осадки наружного контура днища на разрушение стенки. Для резервуара диаметром 20 м и значением $R_c = 1,5$ м Де Бир определяет коэффициент K со значениями в диапазоне от 2 до 3. Предложенное им соотношение (6), сформулированное для обеспечения безопасной эксплуатации крупногабаритных резервуаров с плавающей крышей, соответствует диапазону значений коэффициента K от 1,5 до 3,3 в зависимости от геометрических и конструктивных характеристик конкретного резервуара. Гринвуд же предъявляет жесткое требование к величине неравномерной осадки и назначает максимальное значение коэффициента $K = 3,3$ для предотвращения появления предельных напряжений в стенке. Рассматривая расчетную схему стенки как балки на упругом основании, ставилась задача выяснить при каких значениях K происходит разрушение. Для деформации простой балки в упругой и пластической зонах справедливо выражение:

$$\Delta S_i = \epsilon \frac{l^2}{H} \quad (9)$$

где ϵ – растягивающие напряжения в наиболее удаленной поверхности от нейтрального слоя, Па;

l – расстояние между крайними точками ΔS_i , м;

H – высота стенки, м.

Для балок марки 36 ksi ($1,6 \times 10^5$ Н) по стандарту ASTM, Сэлмон и Джонсон в [49] определили значения относительных деформаций для различных пределов: на пределе текучести осевая деформация составляет 0,00125; на пределе временного упрочнения – 0,014; на пределе прочности при растяжении – 0,11. Согласно (9) параметр ΔS_i при достижении предела прочности для стенки примет значение:

$$\Delta S_i = 0,11 \frac{l^2}{H}. \quad (10)$$

Умножив выражение (10) на отношение $\frac{\sigma_b E}{\sigma_b E}$ и используя значение $\sigma_b = 408$ МПа для стали 36 ksi, имеем:

$$\Delta S_i = 55 \frac{l^2}{H E} \sigma_b. \quad (11)$$

Согласно полученной формуле, разрушение на пределе прочности простой металла стенки должно возникать при значении коэффициента $K = 55$. Соответствующее значение коэффициента K для предела текучести равно 0,6, а для предела временной прочности – 7.

Рассмотрев результаты расчетов для простой балки и значения коэффициентов K , вычисленных по результатам натурных измерений, авторами [46] было предложено принять значение коэффициента $K = 7$ в качестве допустимого коэффициента запаса. По достижении данного допустимого значения при неравномерной осадке возможно превышение предела текучести во внешнем слое оболочки, однако напряжения не достигают зоны предела прочности. В конструкции одного из тридцати трех резервуаров TONEN [41] был превышен указанный предел без каких-либо негативных последствий. В двух из 59 других резервуаров был превышен данный предел, но разрушения стенки не последовало.

Для удобства использования критерия предел прочности в формуле (8) σ_b был заменен на предел текучести σ_T :

$$\Delta S_i \leq 11 \frac{\sigma_T l^2}{EH}. \quad (12)$$

В данном случае $K = 7$. Коэффициент запаса согласно данному критерию равен 1,6. Критерий, приведенный в (12) не включает в себя условие устойчивости стенки. Авторами предполагается, что при неравномерных осадках снижение устойчивости может возникнуть в верхней части стенки, однако это не влечет за собой разрушение стенки и не может быть результатом разлива хранимой жидкости. Таким образом, вопрос разрушения резервуара по причине потери устойчивости требует более углубленного исследования.

Оценка воздействия неравномерной осадки на центральную часть днища

В [46] утверждается, что при анализе неравномерной осадки днища, необходимо рассматривать два её основных вида: общая деформация по всей плоскости и локальные деформации отдельных участков. В большинстве работ (за исключением исследований Губера [40] и Хаяши [41]) для ло-

кальных осадок, чтобы найти зависимости возникающих в днище напряжений от деформаций, рассматривается тонкая круглая пластина в упругой постановке с граничными условиями, предусматривающими её жесткое защемление по контуру. Отличия в результатах расчетов, полученных различными исследователями, возникают по причине использования различных коэффициентов запаса для конкретных объектов.

Общая деформация центральной части днища

Критерии для оценки осадки центральной части днища по всей плоскости сформулированы несколькими научными сообществами. Глубокий анализ исследований Герберера [42] и Лангвелда [44] показывает, что эти работы являются логическим продолжением трудов Ринна [48]. Для коэффициента запаса, равного 1, принимается значение прочности центральной части днища 280 МПа, а также нулевой начальный прогиб, значение максимальной неравномерной осадки W принимается равным $D/45$. Также авторами получено обоснованное выражение, определяющее допустимые значения максимальной неравномерной осадки центральной части днища:

$$W \leq \left(W_0^2 + \frac{0,37}{[n]} \frac{\sigma_b}{E} D^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (13)$$

где W_0 – максимальное значение начального прогиба центральной части днища, м; σ_b – предел прочности стали наплавленного металла сварного шва, определенный при строительстве резервуара, Па.

Согласно [46] запас прочности $[n]$ равен отношению предела прочности для данной стали к действующим напряжениям в центральной части днища. Запас прочности устанавливается в зависимости от требований к обеспечению надежности объекта.

Локальные деформации центральной части днища

Хаяши [41] и Губер [40] выделяют 2 основных случая локальной осадки днища. В первом случае – локальная осадка днища не оказывает влияния на напряженно-деформированное состояние стенки. Во втором случае – когда локальная осадка днища оказывает влияние на напряженное состояние стенки и уторного узла. В этих работах сформулированы базовые параметры критериев оценки неравномерной осадки, принятых в дальнейшем компанией EHXON.

При рассмотрении днищ с одинаковыми прочностными характеристиками металла, критерий локальной осадки днища

для случая разрушения (при отсутствия взаимного влияния стенки и днища) равен соотношению:

$$S/d = 1/51,$$

где S – максимальная величина вертикального смещения точек осадки, м;
 d – диаметр выпуклого участка локальной просадки, м.

Это незначительно меньше условия для общей осадки центральной части днища, которое соответствует:

$$W/D = 1/44,$$

где W – максимальная величина вертикального смещения точек осадки, м;
 D – диаметр полотна центральной части днища, м.

Таким образом, НДС днища как при общей, так и при локальной осадке имеет похожий характер. В критерий Хаяши и Губера для локальной осадки днища без взаимного влияния со стенкой закладываются свойства металла днища, а определяющим значением является величина допустимой неравномерной осадки S . Авторами [46] сделан вывод о том, что данный критерий является наиболее рациональным для ограничения неравномерной осадки центральной части днища при условии отсутствия взаимного влияния со стенкой:

$$S \leq d \left(\frac{0,28 \sigma_b}{E [n]} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (14)$$

При расчете допустимой осадки днища по формуле (14) следует выбирать соответствующие характеристики стали, а именно, предел прочности для стали днища. Согласно [46], оболочечная конструкция стенки способствует уменьшению напряжений, возникших в днище при локальных деформациях вблизи стенки. В связи с этим возможно смягчить требования к допустимым значениям осадки днища в зоне влияния стенки.

Губер в [40] описал кривые оценки осадок и деформаций центральной части днища в зоне, подверженной влиянию стенки резервуара, даны соотношения:

$$d < D/4 \text{ и } \bar{d} > 2d, \quad (15)$$

где d – наибольший диаметр локальной просадочной зоны, м;

$\bar{d}$ – дуговой размер просадочной зоны, м.

Рассмотренные кривые определяют пределы локальных просадочных зон, которые варьируются в пределах от $d/17$ – $d/33$ для однопроходных сварных швов и $d/13$ – $d/26$ для многопроходных сварных швов. В вы-

ражении (16) дано численное описание зависимостей, полученных Губером [40], определяющих допустимые значения локальных осадок центральной части днища в зоне влияния стенки:

$$S \leq d \left(\frac{2,25 \sigma_b D}{d^{0,75} E [n] H} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (16)$$

Выражение (16) адекватно определяет значения допустимых осадок днища в зонах влияния стенки. Критерий, приведенный выше, применим только в том случае, если локальная неравномерная осадка центральной части днища будет иметь «чашеобразный» профиль. Однако при рассмотрении совместного случая общей и локальной осадки днища, значения напряжений могут быть значительно больше, чем при рассмотрении локальной и общей осадок в отдельности.

Анализируя критерии для узла сопряжения стенки и окрайки рассмотрим два основных случая. В первом случае рассматривается условие, при котором стенка и днище имеют совместную осадку. Этот случай приведен в трудах Губера [40], посвященных локальным деформациям днища в зоне влияния стенки. Второй случай возникает, когда стенка сохраняет свое положение над просадочной зоной, днище деформируется совместно с основанием. Значительные растяжения конструкций в узле сопряжения могут послужить причиной его разрушения. Исследователями в литературе отражена информация о потенциальной опасности при данном типе деформирования конструкций [46]. Очевидно, что данный случай деформирования рассматривается настолько серьезно, что в случае выявления осадки такого рода необходимо сразу же принять меры для предотвращения ее развития. В случае обнаружения зон расстыковки стенки и основания, необходимо за минимально короткое время заполнить образовавшуюся щель специальными уплотняющими составами.

Такой подход является допустимым до того момента, пока методы диагностики позволяют обнаруживать такие области. Однако на определенных участках окрайки, выступающих за пределы стенки наружу, возможны скрытые зоны разъединения стенки и основания. В таком случае определить месторасположение просадочной зоны можно только путем измерения и сопоставления геодезических отметок конструкций фундаментного кольца, окрайки, стенки. При этом опорожнение резервуара до измерения отметок фундамента и стенки может привести к возвращению дни-

ща и узла сопряжения к первоначальному состоянию, что не позволит выявить области просадочных зон.

Обеспечение нормального эксплуатационного состояния узла сопряжения стенки и днища является важнейшим аспектом для рассмотрения, на данный момент не существует достаточно точных критериев, определяющих области допустимых значений деформаций данного узла, большинство существующих методов недостаточны для определения истинных деформаций окраечной зоны. Рассмотрение данного вопроса требует дальнейших исследований. Инженерами не рассматриваются случаи горизонтальных перемещений оснований резервуаров и их влияние на общее состояние РВС. Такие перемещения возникают от сдвигов основания, внешних факторов, землетрясений. В изученной автором литературе не найдено критериев, определяющих области допустимых боковых перемещений оснований резервуаров. Большое число вопросов остается неразрешенными. Какое воздействие горизонтальные перемещения оказывают на напряжения в различных элементах резервуара? Могут ли горизонтальные смещения вызвать разрушения или повреждения стенки и днища? Нужно ли учитывать совместное действие вертикальных и горизонтальных перемещений?

В рассмотренных трудах рассматривается каждый вид деформирования конструкций в отдельности и не учитывается их совместный эффект. Более того, устанавливаются области допустимых значений напряжений в различных элементах резервуара без учета совместного действия различных факторов, включая напряжений, возникших от веса хранимой жидкости. Приближенные вычисления показывают, что такие упрощения имеют незначительное влияние во многих случаях. Однако есть необходимость учитывать комбинации различных факторов, вызывающих избыточные напряжения, если они оказывают значимое влияние. Так, например, считается, что общая осадка центральной части днища типа с большими локальными деформациями намного опаснее, чем отдельные небольшие участки с неравномерными осадками. Также существует проблема, связанная с тем, что значение НДС металлоконструкций резервуара становится неизвестным после исправления осадок наружного контура днища. В табл. 2 представлены предложенные требования к допустимым величинам неравномерной осадки стенки и днища, полученные разными исследователями. Исходя из критериев [46] были сформулированы требования американского стандарта API 653 в части назначения допустимых областей неравномерной осадки.

Таблица 2

Критерии для стенки и днища при неравномерных осадках

Источник	Критерий
1	2
Ламбе (1961), Пэнман (1977)	Стенка, оригинальный критерий: $SAG \leq \left(\frac{D}{4H}\right) \Delta R_{\tau 01}$; Стенка, модифицированный критерий: $S_{\max} \leq 0,125 \left(\frac{D}{H}\right) \Delta R_{\tau 01}$
Ринн (1963)	Днище: $W \leq \frac{D}{45}$
Дэ Бир (1969)	Стенка: $\frac{\Delta S}{L} \leq \frac{1}{450}$
Хаяши (1973), Губер (1974)	Днище (при общей осадке): $S \leq \frac{d}{51}$ Днище (при локальной осадке): $\frac{d}{13} \leq S \leq \frac{d}{8}$

Окончание табл. 2

1	2
Лангвелд (1974, 1978)	Стенка, оригинальный критерий: $S_{\max} \leq \left(\frac{0,2L^2}{HD} \right) \Delta R_{\tau 01}$; Стенка, модифицированный критерий: для 8 точек нивелировки: $S_{\max} \leq 0,125 \left(\frac{D}{H} \right) \Delta R_{\tau 01}$; для 16 точек нивелировки: $S_{\max} \leq 0,107 \left(\frac{D}{H} \right) \Delta R_{\tau 01}$; Днище: $W \leq \frac{D}{44}$
Гринвуд (1974)	Стенка: $S_{\max} \leq 4$ см; $D \leq 50$ м $S_{\max} \leq 6$ см; $D \geq 50$ м
Саливан и Новицкий (1974)	Стенка: $S_{\max} \leq 3,0 - 4,5$ см
Малик и др. (1977)	Стенка, оригинальный критерий: $\Delta S \leq \left(\frac{I^2}{HD} \right) \Delta R_{\tau 01}$; Стенка, модифицированный критерий: для 8 точек нивелировки: $S_{\max} \leq 0,154 \left(\frac{D}{H} \right) \Delta R_{\tau 01}$; для 16 точек нивелировки: $S_{\max} \leq 0,132 \left(\frac{D}{H} \right) \Delta R_{\tau 01}$
Клепиков (1989)	Стенка: дуговая составляющая – 0,01L – малогабаритные РВС; 0,008L крупногабаритные РВС; вертикальная составляющая – 60 мм. Днище: 0,004*D – малогабаритные РВС; 0,008*D – крупногабаритные РВС
Ким Тай Хун, Лим Донг Джун (2010)	$S_{\max} \leq 50$ мм; $D < 30$ м $S_{\max} \leq 60$ мм; $30 \leq D \leq 90$ м $S_{\max} \leq 75$ мм; $D \geq 90$ м

На основе работы [46] были сформированы подходы к оценке неравномерных осадок оснований РВС в американском стандарте API 653, являющемся наряду с API 650 основным техническим документом при проектировании, строительстве и реконструкции крупногабаритных вертикальных стальных резервуаров. С целью обоснования возможности гармонизации отечественных стандартов в части назначения предельных значений неравномерной осадки, далее предлагается рассмотреть критерии, представленные в стандарте API 653.

Для получения геодезических параметров неравномерной осадки назначается проведение нивелировки наружного контура днища (НКД) и центральной части. При проведении нивелировки НКД и полотнища приняты основные требования:

– количество точек нивелирования должно составлять не менее 8 шт., равномерно расположенных по контуру;

– максимальное расстояние между смежными точками нивелирования по контуру не должно превышать 9,75 м;

– геодезические отметки точек центральной части днища получают на основе разбиения полотна на сетку с использованием минимум 4 равноотстоящих диаметров, разбитых на отрезки с частотой не менее 3 м (рис. 1).

На основании полученных геодезических отметок выполняется математическая интерпретация кривой наружного контура днища с целью определения эффективной дуги просадки. Эффективная дуга просадки – это область с массивом точек, имеющая наибольшие отклонения от проектных отметок наружного контура днища РВС. На рис. 2 представлен пример определения параметров эффективной дуги просадочной зоны.



Рис. 1. Требования к геодезическим измерениям дна и окрайки резервуара в API 653

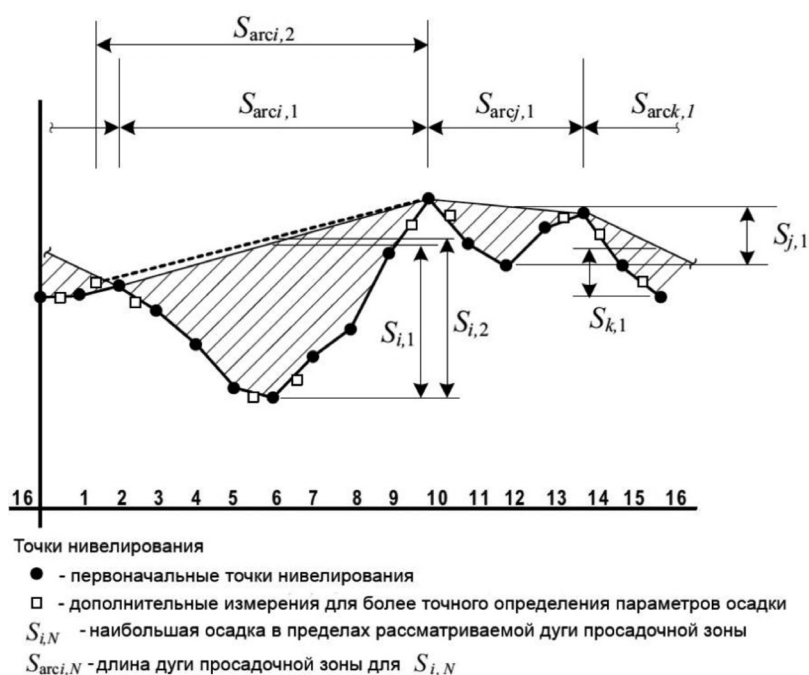


Рис. 2. Построение контура депланации резервуара с неравномерной осадкой

После построения функции-кривой просадочной зоны необходимо выполнить оценку допустимой величины неравномерной осадки для рассматриваемого резервуара. В соответствии с (17) рассчитывается максимально допустимое значение вертикальной составляющей неравномерной осадки:

$$S_{\max} = \min [K \times S_{\text{arc}} \times (D / H) \times (Y / E)], \quad (17)$$

где $S_{\max}$ – предельно допустимая величина вертикальной составляющей неравномерной осадки, дюйм;

S_{arc} – эффективная длина дуги просадочной зоны, футы;

D – диаметр резервуара, футы;

Y – предел текучести металла резервуара, фунт-сила на квадратный дюйм;

E – модуль Юнга, футы;

H – эффективная длина дуги просадочной зоны, фунт-сила на квадратный дюйм;

K – безразмерный параметр, зависящий от типа и диаметра резервуара, выбирается в соответствии с данными табл. 3.

Далее вертикальные составляющие отметок осадки S сравниваются с допускаемыми значениями $S_{\max}$, на основании чего

делаются соответствующие выводы о необходимости проведения ремонта РВС, либо выполнения более глубокого диагностического обследования с дальнейшим проведением проверочных прочностных расчетов,

в том числе с применением метода конечных элементов. Необходимо отметить, что приведенный выше подход справедлив только для крупногабаритных резервуаров с диаметром, не превышающим 300 футов (91,44 м).

Таблица 3

Диаметр РВС, фут	К, для резервуаров со стационарной крышей	К, для резервуаров с плавающей крышей
$D \leq 50$	10,5	28,7
$50 < D \leq 80$	5,8	7,8
$80 < D \leq 120$	3,9	6,5
$120 < D \leq 180$	2,3	4,0
$180 < D \leq 240$	не применимо	3,6
$240 < D \leq 300$	не применимо	2,4
$300 < D$	не применимо	не применимо

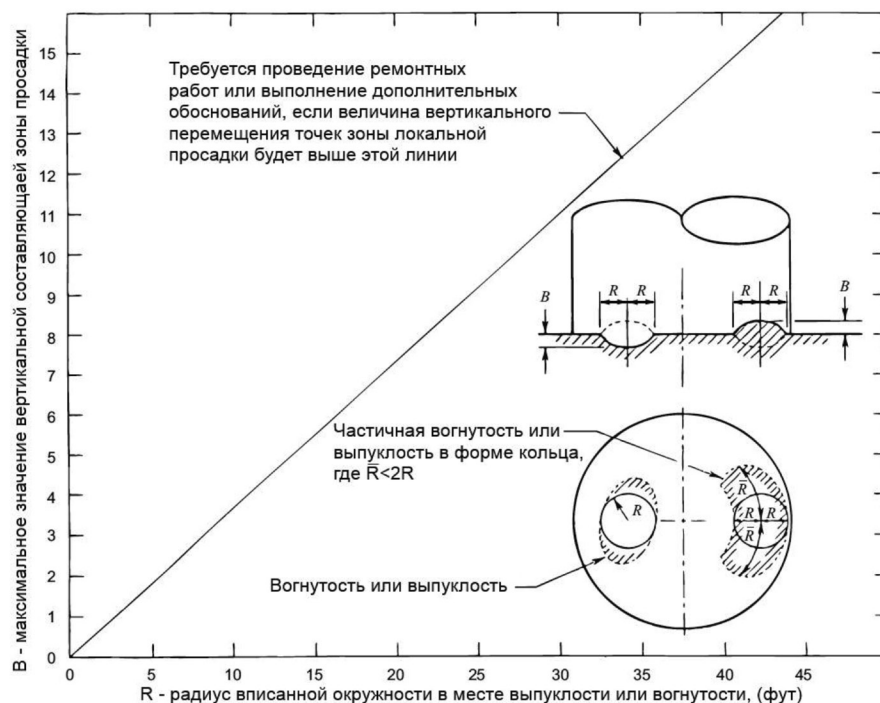


Рис. 3. Предельные значения осадки местной просадочной зоны

Следующим этапом оценки технического состояния РВС с имеющимися неравномерными осадками является анализ локальных просадочных зон центральной части днища резервуара. Для участков с местными осадками полотнища днища, находящихся за пределами краевой зоны, в стандарте API 653 предлагается зависимость, позволяющая оценить допустимую величину вертикальной составляющей осадки.

$$B = 0,37 R, \quad (18)$$

где B – максимально допустимая высота выпуклости или вогнутости зоны локальной просадки, дюйм;

R – минимальный радиус вписанной окружности, построенной для зоны локальной осадки, футы.

Также в стандарте приведена зависимость (рис. 3), позволяющая инженерам обосновать необходимость ремонта участка с локальной просадкой днища.

Далее предлагается рассмотреть подход стандарта API 653 к оценке локальных осадок в краевой зоне вблизи уторного шва и нахлесточного сварного соединения крайки с полотном центральной части днища. Ввиду особенностей конструкции днища, крайки и их соединения к стенке РВС, в рассматриваемом стандарте анализируется

величина осадки с учетом направления нахлесточного сварного соединения (рис. 4). Нахлесточный шов листов днища, выходящий за пределы стенки в направлении наружного контура, является недопустимым согласно отечественной нормативной документации, однако общие подходы к оценке осадки в области наружного контура днища вызывают несомненный интерес.

Изначально рассчитывается угол альфа между осевой линией резервуара и рассматриваемым нахлесточным сварным швом. Согласно номограммам на рис. 5 и 6 определяются допустимые значения осадки для зон с перпендикулярно и параллельно направленными сварными швами относи-

тельно стенки. На основании полученных результатов, с помощью формулы (19) рассчитывается общее значение допустимой осадки. Далее это значение сравнивается с реальной величиной осадки, полученной на основе диагностических измерений (рис. 4), исходя из чего принимается решение о необходимости проведения ремонтных работ.

$$B_{\alpha} = B_e - (B_e - B_{ew}) \cdot \sin \alpha, \quad (19)$$

где B_{α} – максимально допустимая осадка в околошовной зоне окрайки, дюйм;
 α – угол между осевой линией резервуара и направлением сварного шва, градусы.

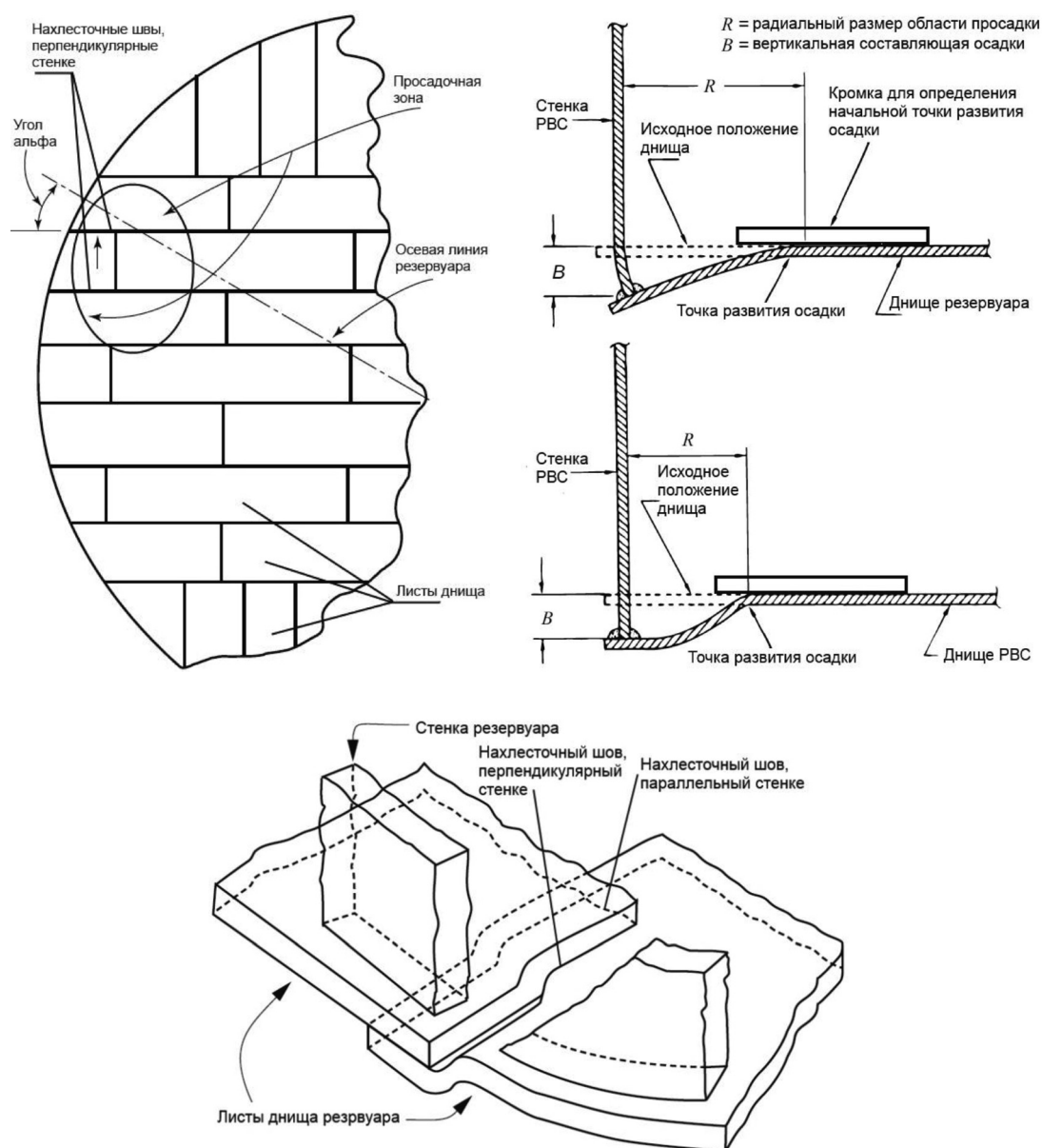


Рис. 4. Схема развития осадки наружного контура днища согласно API 653

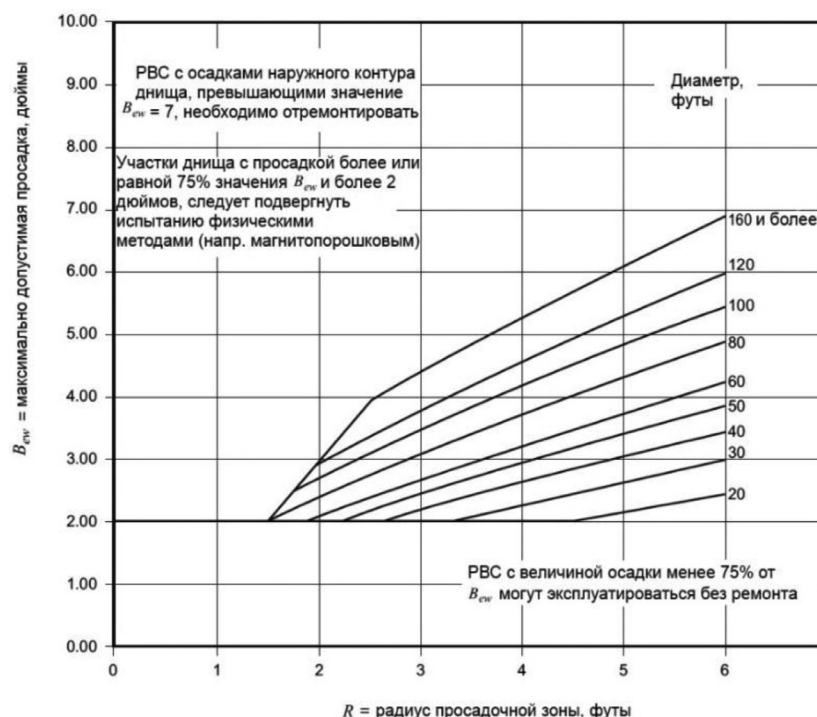


Рис. 5. Номограмма определения допустимых значений осадки участков наружного контура днища с нахлесточными сварными швами, параллельными стенке (согласно API 653)

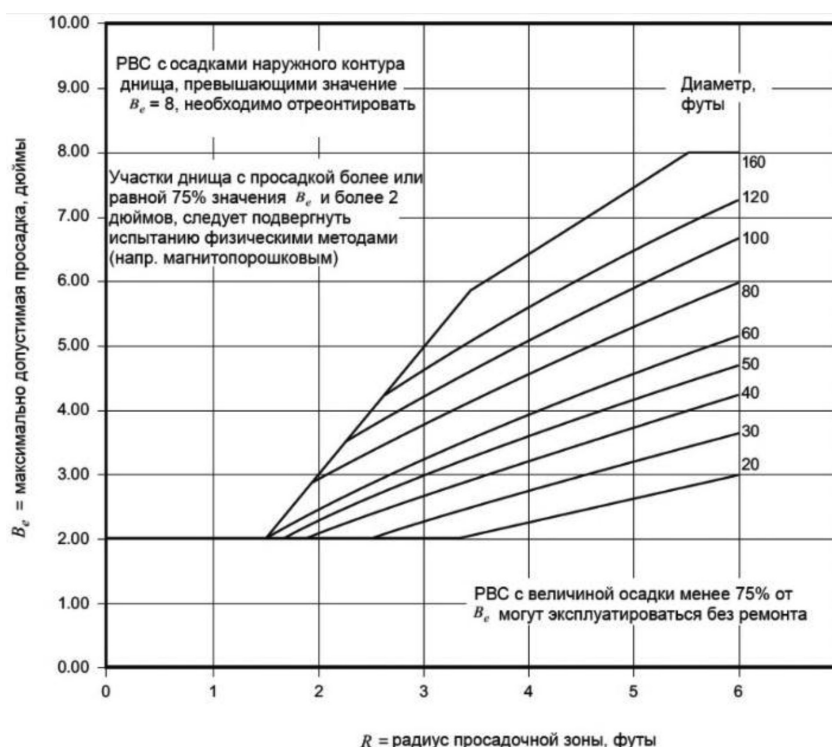


Рис. 6. Номограмма определения допустимых значений осадки участков наружного контура днища с нахлесточными сварными швами, перпендикулярными стенке (согласно API 653)

Подобный подход можно применить при оценке неравномерной осадки наружного контура днища резервуаров отечественного образца с разработкой соответствующих

номограмм, которые бы отражали особенности работы конструкции. Анализируя требования российской НТД [29–31] к вопросу определения допустимых параме-

тров неравномерной осадки, необходимо отметить, что деформации окрайки и центральной части днища не ограничены какими-либо критериями. Однако даны довольно жесткие ограничения по отклонениям наружного контура днища. Основными параметрами, исходя из которых определяются допустимые значения неравномерной осадки являются (табл. 4): конструкция резервуара (полистовая/рулонная сборка, РВС/РВСП/РВСПК), срок эксплуатации

(при сроке эксплуатации резервуара > 5 лет предельные отклонения увеличиваются в 1,3 раза, > 20 лет – в 2 раза), характер нагружения (опорожненный/заполненный), а также главные параметры – разность отметок любых двух точек и соседних точек на расстоянии 6 м по периметру. Также выполняется оценка величины зазора между окрайкой днища и фундаментом с учетом протяженности и высоты раскрытия для резервуаров высотой свыше и менее 12 м.

Таблица 4.1

Разность отметок наружного контура днища для РВС (П, ПК) полистовой сборки не более

Наименование параметров	Предельное отклонение при диаметре резервуара, мм		
	до 12 м	св. 12 м до 25 м	св. 25 м
При пустом резервуаре:			
– разность отметок соседних точек на расстоянии 6 м по периметру	10	15	15
– разность отметок любых других точек	20	25	30
При залитом резервуаре:			
– разность отметок соседних точек на расстоянии 6 м по периметру	20	25	30
– разность отметок любых других точек	30	35	40

П р и м е ч а н и я . Предельные отклонения от горизонтали наружного контура днища эксплуатируемых РВС (П, ПК) должны быть увеличены по сравнению с указанными в таблице:

- при сроке эксплуатации более 5 лет – в 1,3 раза;
- при сроке эксплуатации более 20 лет – в 2 раза.

Таблица 4.2

Разность отметок наружного контура днища для рулонированных РВС (П, ПК) не более

Объем резервуара, м ³	Разность отметок наружного контура днища, мм			
	при незаполненном резервуаре		при заполненном резервуаре	
	смежных точек на расстоянии 6 м по периметру	любых других точек	смежных точек на расстоянии 6 м по периметру	любых других точек
Менее 700	10	25	20	40
700–1000	15	40	30	60
2000–5000	20	50	40	80
10 000–20 000	15	45	35	75
30 000–50 000	30	60	50	100

П р и м е ч а н и я . Предельные отклонения от горизонтали наружного контура днища эксплуатируемых РВС (П, ПК) должны быть увеличены по сравнению с указанными в таблицах:

- при сроке эксплуатации более 5 лет – в 1,3 раза;
- при сроке эксплуатации более 20 лет – в 2 раза.

Таблица 4.3

Предельно допустимые значения зазора между окрайкой днища и фундаментом

Высота резервуара, м	Раскрытие зазора, мм	Предельная протяженность зазора, м	Примечания
Не более 12	25–70	1,5	Зазор раскрытием более 70 мм недопустим независимо от протяженности
Свыше 12	25–50	2,0	Зазор раскрытием более 50 мм недопустим независимо от протяженности

Анализируя подходы отечественной и зарубежной нормативной базы к назначению величин допускаемой осадки, необходимо отметить, что требования российской НТД являются обязательными для выполнения всеми проектными и строительными организациями и имеющими конкретные значения, в отличие от западных, где предельные параметры допустимо обосновывать дополнительными расчетами специалистов с соответствующей квалификацией, при этом в стандартах даны только рекомендации. Выполненный анализ позволяет сделать вывод о том, что необходимо рассмотреть возможность гармонизации отечественных стандартов в части оценки уровня неравномерных осадок оснований вертикальных стальных резервуаров. Для этого требуется выполнить адаптацию имеющихся зависимостей для резервуаров российского размерного ряда, отличающихся геометрической конструкцией и по жесткостно-прочностным характеристикам от зарубежных образцов. Предлагается рассматривать не только отклонения наружного контура днища от горизонтальной плоскости в качестве критерия оценки неравномерной осадки (в существующей НТД), но и особенности деформирования полотна днища, листов окраечной зоны. Также необходимо выполнить обоснование возможности учитывать параметры контура депланации наподобие разложения в ряды Фурье [2] (длину и высоту дуги просадки), исходя из чего назначать допустимую величину неравномерной осадки наружного контура по аналогии со стандартом API 653. Также для получения более точных данных в части назначения допустимых величин осадки, предлагается использовать метод конечных элементов, позволяющий учитывать нелинейные свойства материала и геометрии, неосесимметричный характер нагружения и особенности конструкции. Перспективы данного подхода отражены в [16], где обоснованно утверждается, что существующие формулы и аналитические зависимости не всегда позволяют в полной мере оценить действительный характер работы сооружения, в особенности с учетом неосесимметричных составляющих нагружения. Следует отметить, что большая часть зависимостей, положенных в основу ограничений развития осадок получена на основе аналитических решений для фрагментов металлоконструкций резервуаров. В настоящее время появилась возможность при помощи расчетных пакетов на основе МКЭ получить более точные зависимости изменения напряженно-деформированно-

го состояния металлоконструкций резервуара с учетом полного учета проектных конструктивных элементов, их геометрии и физических свойств. Предварительные расчеты, выполненные авторами [12–14] показали, что учет таких элементов, как верхнее опорное кольцо, листы и балки крыши вносят существенное влияние в напряженно-деформированное состояние сооружения при развитии неравномерной осадки основания.

Список литературы

1. Тарасенко А.А. Напряженно-деформированное состояние крупногабаритных резервуаров при ремонтных работах: дис. канд. техн. наук. – Тюмень, 1991. – 254 с.
2. Тарасенко А.А. Разработка научных основ методов ремонта вертикальных стальных резервуаров: дис. докт. техн. наук. – Тюмень, 1999. – 299 с.
3. Тарасенко А.А., Саяпин М.В. Результаты статистической обработки измерений неравномерных осадок наружного контура днища вертикальных стальных резервуаров // Известия вузов «Нефть и газ». Тюмень, 1999. – №1. – С. 52–56.
4. Тарасенко А.А., Николаев Н.В., Хоперский Г.Г., Овчар З.Н., Саяпин М.В. Исследование влияния приемораздаточных патрубков на напряженно-деформированное состояние стенки вертикальных цилиндрических резервуаров // Известия вузов «Нефть и газ». Тюмень, 1998. – №1. – С. 59–68.
5. Тарасенко А.А., Николаев Н.В., Хоперский Г.Г., Саяпин М.В. Напряженно-деформированное состояние стенки резервуара при неравномерных осадках основания // Известия вузов «Нефть и газ». Тюмень, 1997. – №3. – С. 75–79.
6. Тарасенко А.А., Попова Е.В. Напряженно-деформированное состояние резервуара при неравномерных осадках основания // Известия вузов «Нефть и газ». Тюмень, 2005. – №1. – С. 59–63.
7. Тарасенко А.А., Сильницкий П.Ф., Тарасенко Д.А. Противоречия в современной нормативно-технической базе при ремонте резервуаров // Фундаментальные исследования. – 2013. – №10–15. – С. 3400–3403.
8. Тарасенко А.А., Чепур П.В. Деформирование стационарной крыши крупногабаритного резервуара при неравномерных осадках основания // Фундаментальные исследования. – 2014. – №11–2. – С. 296–300.
9. Тарасенко А.А., Чепур П.В. Напряженно-деформированное состояние верхнего опорного кольца резервуара при неосесимметричных деформациях корпуса // Фундаментальные исследования. – 2014. – №11–3. – С. 525–529.
10. Тарасенко А.А., Чепур П.В. Определение действующих напряжений от подъемных устройств при ремонте фундамента резервуара // Фундаментальные исследования. – 2014. – №9–11. – С. 2421–2425.
11. Тарасенко А.А., Чепур П.В., Грученкова А.А., Соколов С.С. Оценка влияния трубопроводов системы подслонного пожаротушения на напряженное состояние резервуара при осадке основания // Фундаментальные исследования. – 2014. – №11–8. – С. 1471–1476.
12. Тарасенко А.А., Чепур П.В., Тарасенко Д.А. Деформирование верхнего края оболочки при развитии неравномерных осадок резервуара // Фундаментальные исследования. – 2014. – №6–3. – С. 485–489.
13. 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. – №10–15. – С. 3409–3413.
14. Тарасенко А.А., Чепур П.В., Чирков С.В. Исследование собственной жесткости вертикального стального ци-

- линдрического резервуара // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 10. – С. 121–123.
15. Тарасенко А.А., Чепур П.В., Чирков С.В. Обоснование необходимости учета истории нагружения конструкции при ремонте фундамента с подъемом резервуара // Безопасность труда в промышленности. – 2014. – № 5. – С. 60–63.
16. Тарасенко А.А., Чепур П.В., Чирков С.В., Тарасенко Д.А. Модель резервуара в среде ANSYS Workbench 14.5 // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10–15. – С. 3404–3408.
17. Тиханов Е.А., Тарасенко А.А., Чепур П.В. Оценка экономической эффективности капитального ремонта основания вертикального стального резервуара методом перемещения // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 6–2. – С. 330–334.
18. Хоперский Г.Г., Овчар З.Н., Тарасенко А.А., Николаев Н.В. Определение неравномерной составляющей осадки резервуаров, вызывающей неосесимметричную деформацию // Известия вузов «Нефть и газ». Тюмень, 1997. – № 5. – С. 80–85.
19. Хоперский Г.Г., Саяпин М.В., Тарасенко А.А., Николаев Н.В. Принцип независимости действия сил при расчете напряженно-деформированного состояния стенки резервуаров // Известия вузов «Нефть и газ». Тюмень, 1998. – № 4. – С. 73–77.
20. Хоперский Г.Г., Тарасенко А.А. Экспериментальное исследование деформаций стенки резервуара при неравномерных осадках оснований // Известия вузов «Нефть и газ». Тюмень, 1997. – № 6. – С. 128.
21. Чепур П.В., Тарасенко А.А. Оценка воздействия приемо-раздаточного патрубка при развитии осадки резервуара // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11–3. – С. 540–544.
22. Чепур П.В., Тарасенко А.А. Влияние параметров неравномерной осадки на возникновение предельных состояний в резервуаре // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 8–7. – С. 1560–1564.
23. Чепур П.В., Тарасенко А.А. Методика определения необходимости ремонта резервуара при осадках основания // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 8–6. – С. 1336–1340.
24. Чепур П.В., Тарасенко А.А., Грученкова А.А., Антонов И.В. Численный анализ влияния жесткости газоравнительной системы при развитии осадок резервуара // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11–6. – С. 1292–1296.
25. Чепур П.В., Тарасенко А.А., Соколов С.С. Оценка влияния трубопроводов системы аварийного сброса на напряженное состояние конструкции резервуара при развитии осадок основания // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11–4. – С. 804–808.
26. Чепур П.В., Тарасенко А.А., Тарасенко Д.А. Исследование влияния величины выступа окрайки на напряженно-деформированное состояние вертикального стального цилиндрического резервуара при развитии неравномерной осадки наружного контура днища // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10–15. – С. 3441–3445.
27. Чирков С.В., Тарасенко А.А., Чепур П.В. Конечно-элементная модель вертикального стального резервуара с усиливающими элементами при его подъеме гидродомкратами // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 9–5. – С. 1003–1007.
28. Чирков С.В., Тарасенко А.А., Чепур П.В. Определение оптимального количества тросов поддержки днища при подъеме резервуара // Известия вузов. «Нефть и газ». – 2014. – № 5. – С. 72–78.
29. ГОСТ 52910-2008. Резервуары вертикальные цилиндрические для нефти и нефтепродуктов.
30. РД-23.020.00-КТН-283-09. Правила ремонта и реконструкции резервуаров для хранения нефти объемом 1000–50000 куб. м.
31. СА-03-000-08. Правила проектирования, изготовления и монтажа вертикальных стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов.
32. API 650. Сварные стальные резервуары для хранения нефти. – США, Вашингтон: Издательская служба API, 2005.
33. API 653. Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction, Fourth Edition. – USA, Washington, 2009.
34. BS 2654. Manufacture of vertical steel welded non-refrigerated storage tanks with butt-welded shells for the petroleum industry. 1989.
35. Bell R.A., Iwakiri J. «Settlement Comparison Used in Tank-Failure Study». Journal of the Geotechnical Division. ASCE, Vol. 106, No. GT2, Feb., 1980, P. 153–169.
36. Carlson E.D., Frisan S.P. «Tank Foundation in Eastern Venezuela». Journal of the Soil Mechanics and Foundations Engineering Division. ASCE, Vol. 87, No. Oct. 1961, pp. 69–89.
37. Clarke J.S. «Survey of Oil Storage Tanks». Annales de L'Institut Belge du Petrole. No 6, 1969, p. 15.
38. DeBeer E.E. «Foundation Problems, of Petroleum, Tanks». Annales de L'Institut Belge du Petrole. No 6, 1969, P. 25–40.
39. Greenwood D.A. «Differential Settlement Tolerance of Cylindrical Steel Tanks for Bulk Liquid Storage». Proceedings of the Conference on Settlement of Structures. Cambridge: University, British Geotechnical Society, A Halsted Press Book, John. Wiley and Sons, Inc., New York, N.Y., Apr. 1974, P. 35–97.
40. Guber F.H. Design Engineering Contributions to Quality Tankage. International Institute of Welding Annual Assembly, Budapest, Hungary, 1974, P. 99–129.
41. Hayashi K. «Evaluation of Localized Differential Tank Bottom Settlement» Internal Report, EXXON Research and Engineering Co., Report No. EE.12TTR.73, 1973.
42. Herber K.H. «Eckverbindungen von Tanken und Behaltern». Del Stahlbau, Vols. 10 and 11, pp. 225–228 and 252–257, 1955.
43. Lambe T.W. «Reclaimed. Land in Kawasaki City». Proceedings of the Soil Mechanics and Foundation Division. ASCE Vol. 95, No SM5, 1969.
44. Langeveld J.M. «The Design of Large Steel Storage Tanks for Crude Oil and Natural Gas». Proceedings of the Annual Meeting of The International Institute of Welding. 1974, P. 35–95.
45. Malik Z., Morton J., Ruiz C. «Ovalization of Cylindrical Tanks as a Result of Foundation Settlement». Journal of Strain Analysis, Vol. 12, No. 4, 1977, P. 339–348.
46. Marr W.A., ASCE, Ramos J.A., Lambe T.W. Journal of Geotechnical Engineering Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 108, August 1982.
47. Penman A.D. «Soil-Structure Interaction and Deformation Problems with Large Oil Tanks». Proceedings of the International Symposium on Soil-Structure Interaction, University of Roorkee, Roorkee, India, Vol. 1, Jan., 1977, P. 521–526.
48. Rinne J.E. «Tanks on Soft Soils are Economic Challenge» Petro/Chem Engineer, Vol. 35, No. 10, Sept., 1963, P. 56–58.
49. Salmon C. J., Johnson J. E. Steel Structures: Design and Behavior, Intext Educational Publishers, 1971, P. 2.
50. Sullivan R.A., Nowicki J.F. «Differential Settlement of Cylindrical Oil Tanks». Proceedings of Conference on Settlement of Structures, Cambridge University, John Wiley and Sons, Inc., New York, N.Y., Apr., 1974, P. 420–424.

References

1. Tarasenko A.A. Stress-strained state of large-sized tanks during repairs. Candidate technical sciences dissertation. Tyumen, 1991. 254 p.
2. Tarasenko A.A. Razrabotka nauchnyh osnov metodov remonta vertikal'nyh stal'nyh rezervuarov: dis. doct. tehn. nauk. Tyumen, 1999. 299 p.
3. Tarasenko A.A., Sajapin M.V. Izvestija vysshihuchebnyh zavedenij. Neft'igaz – Academic news «Oil and gas», 1999, no.1, pp. 52–56.
4. Tarasenko A.A., Nikolaev N.V., Hoperskij G.G., Ovchar Z.N., Sajapin M.V. Izvestijavysshihuchebnyhzavedenij. Neft'igaz. 1998, no.1, pp. 59–68.

5. Tarasenko A.A., Nikolaev N.V., Hoperskij G.G., Sajapin M.V. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Neft'igaz*. 1997, no.3, pp. 75–79.
6. Tarasenko A.A., Popova E.V. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Neft'igaz – Academic news «Oil and gas»*, 2005, no.1, pp. 59–63.
7. Tarasenko A.A., Sil'nickij P.F., Tarasenko D.A. *Fundamental research*, 2013, no.10–15, pp. 3400–3403.
8. Tarasenko A.A., Chepur P.V. *Fundamental research*, 2014, no.11 part 2, pp. 296–300.
9. Tarasenko A.A., Chepur P.V. *Fundamental research*, 2014, no.11 part 3, pp. 525–529.
10. Tarasenko A.A., Chepur P.V. *Fundamental research*, 2014, no.9 part 11, pp. 2421–2425.
11. Tarasenko A.A., Chepur P.V., Gruchenkova A.A., Sokolov S.S. *Fundamental research*, 2014, no.11 part 8, pp. 1471–1476.
12. Tarasenko A.A., Chepur P.V., Tarasenko D.A. *Fundamental research*, 2014, no.6 part 3, pp. 485–489.
13. Tarasenko A.A., Chepur P.V., Chirkov S.V. *Fundamental research*, 2013, no.10 part 15, pp. 3409–3413.
14. Tarasenko A.A., Chepur P.V., Chirkov S.V. *Neftjanoe hozjajstvo*, 2014, no.10 pp. 121–123.
15. Tarasenko A.A., Chepur P.V., Chirkov S.V. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*, 2014, no.5, pp. 60–63.
16. Tarasenko A.A., Chepur P.V., Chirkov S.V., Tarasenko D.A. *Fundamental research*, 2013, no.10 part 15, pp. 3404–3408.
17. Tihanov E.A., Tarasenko A.A., Chepur P.V. *Fundamental research*, 2014, no.6 part 2, pp. 330–334.
18. Hoperskij G.G., Ovchar Z.N., Tarasenko A.A., Nikolaev N.V. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Neft'igaz – Academic news «Oil and gas»*, 1997, no.5, pp. 80–85.
19. Hoperskij G.G., Sajapin M.V., Tarasenko A.A., Nikolaev N.V. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Neft'igaz*. 1998, no.4, pp. 73–77.
20. Hoperskij G.G., Tarasenko A.A. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Neft'igaz – Academic news «Oil and gas»*, 1997, no.6, pp. 128.
21. Chepur P.V., Tarasenko A.A. *Fundamental research*, 2014, no.11 part 3, pp. 540–544.
22. Chepur P.V., Tarasenko A.A. *Fundamental research*, 2014, no.8 part 7, pp. 1560–1564.
23. Chepur P.V., Tarasenko A.A. *Fundamental research*, 2014, no.8 part 6, pp. 1336–1340.
24. Chepur P.V., Tarasenko A.A., Gruchenkova A.A., Antonov I.V. *Fundamental research*, 2014, no.11 part 6, pp. 1292–1296.
25. Chepur P.V., Tarasenko A.A., Sokolov S.S. *Fundamental research*, 2014, no.11 part 4, pp. 804–808.
26. Chepur P.V., Tarasenko A.A., Tarasenko D.A. *Fundamental research*, 2013, no.10 part 15, pp. 3441–3445.
27. Chirkov S.V., Tarasenko A.A., Chepur P.V. *Fundamental research*, 2014, no.9 part 5, pp. 1003–1007.
28. Chirkov S.V., Tarasenko A.A., Chepur P.V. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Neft'igaz – Academic news «Oil and gas»*, 2014, no.5, pp. 72–78.
29. GOST 52910-2008. *Rezervuary vertikal'nye cilindricheskie dlja nefti i nefteproduktov*.
30. RD-23.020.00-KTN-283-09. *Pravila remonta i rekonstrukcii rezervuarov dlja hranenija nefti ob'emom 1000-50000 kub. m*.
31. SA-03-000-08. *Pravila proektirovanija, izgotovlenija i montazha vertikal'nyh stal'nyh rezervuarov dlja nefti i nefteproduktov*.
32. API 650. *Svarnye stal'nye rezervuary dlja hranenija nefti*. – SSHA, Vashington: Izdatel'skaja sluzhba API, 2005.
33. API 653. *Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction, Fourth Edition*. – USA, Washington, 2009.
34. BS 2654. *Manufacture of vertical steel welded non-refrigerated storage tanks with butt-welded shells for the petroleum industry*. 1989.
35. Bell R.A., Iwakiri J. «Settlement Comparison Used in Tank-Failure Study». *Journal of the Geotechnical Division. ASCE*, Vol. 106, No. GT2, Feb., 1980, pp. 153–169.
36. Carlson E.D., Frick S.P. «Tank Foundation in Eastern Venezuela». *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Engineering Division. ASCE*, Vol. 87, No. SM10, Oct. 1961, pp. 69–89.
37. Clarke J.S. «Survey of Oil Storage Tanks». *Annales de L'Institut Belge du Petrole*. No 6, 1969, p. 15.
38. DeBeer E.E. «Foundation Problems, of Petroleum Tanks». *Annales de L'Institut Belge du Petrole*. No. 6, 1969, pp. 25–40.
39. Greenwood D.A. «Differential Settlement Tolerance of Cylindrical Steel Tanks for Bulk Liquid Storage». *Proceedings of the Conference on Settlement of Structures*. Cambridge: University, British Geotechnical Society, A Halsted Press Book, John Wiley and Sons, Inc., New York, N.Y., Apr. 1974, pp. 35–97.
40. Guber F.H. *Design Engineering Contributions to Quality Tankage*. International Institute of Welding Annual Assembly, Budapest, Hungary, 1974, pp. 99–129.
41. Hayashi K. «Evaluation of Localized Differential Tank Bottom Settlement» Internal Report, EXXON Research and Engineering Co., Report No. EE.12TTR.73, 1973.
42. Herber K.H. «Eckverbindungen von Tanken und Behaltern». *Del Stahlbau*, Vols. 10 and 11, pp. 225–228 and 252–257, 1955.
43. Lambe T.W. «Reclaimed Land in Kawasaki City». *Proceedings of the Soil Mechanics and Foundation Division. ASCE* Vol. 95, No SM5, 1969.
44. Langeveld J.M. «The Design of Large Steel Storage Tanks for Crude Oil and Natural Gas». *Proceedings of the Annual Meeting of The International Institute of Welding*. 1974, pp. 35–95.
45. Malik Z., Morton J., Ruiz C. «Ovalization of Cylindrical Tanks as a Result of Foundation Settlement». *Journal of Strain Analysis*, Vol. 12, No. 4, 1977, pp. 339–348.
46. Marr W.A., ASCE, Ramos J.A., Lambe T.W. *Journal of Geotechnical Engineering Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 108, August 1982.
47. Penman A.D. «Soil-Structure Interaction and Deformation Problems with Large Oil Tanks». *Proceedings of the International Symposium on Soil-Structure Interaction, University of Roorkee, Roorkee, India*, Vol. 1, Jan., 1977, pp. 521–526.
48. Rinne J.E. «Tanks on Soft Soils are Economic Challenge» *Petro/Chem Engineer*, Vol. 35, No. 10, Sept., 1963, pp. 56–58.
49. Salmon C.J., Johnson J.E. *Steel Structures: Design and Behavior*, Intext Educational Publishers, 1971, p. 2.
50. Sullivan R.A., Nowicki J.F. «Differential Settlement of Cylindrical Oil Tanks». *Proceedings of Conference on Settlement of Structures*, Cambridge University, John Wiley and Sons, Inc., New York, N.Y., Apr., 1974, pp. 420–424.

Рецензенты:

Захаров Н.С., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «САТМ», ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», г. Тюмень.

Мерданов Ш.М., д.т.н., профессор, Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, заведующий кафедрой «Транспортные и технологические системы», ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», г. Тюмень.

Работа поступила в редакцию 05.12.2014.