УДК 621.642.39.03

ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ ДЛЯ ПРЕДЕЛЬНЫХ ОСАДОК ОСНОВАНИЙ РЕЗЕРВУАРА РВС-20000

JUSTIFICATION OF CRITERIA FOR THE ULTIMATE GROUNDS OF THE SEDIMENT TANK RVS-20000

А. А. Тарасенко, П. В. Чепур, В. В. Миронов, А. А. Грученкова
A. A. Tarasenko, P. V. Chepur, V. V. Mironov, A. A. Gruchenkova

Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Ключевые слова: ***резервуар; днище; ANSYS; МКЭ; НДС; осадка; неравномерная осадка***
Key words: ***tank; bottom; ANSYS; FEM; stress-strain state; SAG; differential settlement***

Резервуары относятся к сооружениям первого уровня ответственности, и любые аварии, как правило, приводят к угрозе жизни людей, огромным материальным потерям и значительному экологическому ущербу.

Осадка резервуара может развиваться из-за различных факторов: изменений гидрогеологических условий грунтовой площадки, предельных или непроектных режимов эксплуатации, ошибок на этапах проектирования и строительства. Развитие неравномерной осадки основания приводит к возникновению недопустимых напряжений в металлоконструкциях, а иногда становится основной причиной аварии. На основании статистического анализа результатов диагностического обследования [1] установлено, что 46 % всех аварий РВС вызваны неравномерными осадками основания.

В отечественных и зарубежных нормативных документах требования к назначению величины неравномерной осадки имеют существенные отличия, поэтому авторы поставили перед собой цель теоретически обосновать зависимости и получить критерии для величины допустимой осадки наиболее распространенного резервуара РВС-20000.

Неравномерную осадку резервуара можно подразделить на два основных вида: осадка наружного контура [2] и осадка полотнища днища [3–4]. Анализ результатов аварий резервуаров показал, что полотнище ведет себя как гибкая мембрана и известны случаи, когда его осадка на грунтовом основании достигала 1 метра [5]. Однако большая часть аварийных ситуаций была связана с разрушением конструкции фундамента либо с дефектами сварки. Поэтому в данной работе авторы сосредоточились на изучении наиболее опасного вида осадки — наружного контура днища.

Существуют расхождения во мнениях среди специалистов насчет предельных величин осадки. Имеющиеся численные решения и модели в большинстве случаев не учитывают влияния кровли и кольца жесткости, упругого контактного взаимодействия фундаментного кольца с грунтом, нелинейных свойств стали, полного сочетания нагрузок и воздействий на конструкцию резервуара. При появлении зон неоднородности основания деформации РВС зависят от жесткости конструкции и имеют конечное значение [6]. Вопросы влияния технологических трубопроводов, расположенных на отдельных от резервуара фундаментах, также требуют более глубокого изучения.

Требования зарубежных нормативных документов (API, British Standard, Eurocode) не могут быть использованы из-за существенных отличий в конструкциях отечественных и зарубежных типоразмеров РВС.

Определить зависимости между величиной осадки и НДС резервуара, а следовательно, внести изменения в действующую нормативно-техническую документацию, возможно лишь выполнив численный эксперимент на модели резервуара с максимальной детализацией его элементов.

Обращаясь к выполненным ранее исследованиям, отметим, что в большей части публикаций используются аналитические зависимости, полученные С. П. Тимошенко, которые могут быть применены лишь для оценочных приблизительных расчетов. С появлением численных методов и современных вычислительных комплексов появилась возможность более точной и достоверной оценки влияния осадки на величину напряженно-деформированного состояния резервуара.

Сегодня авторы используют преимущественно численные методы, в частности МКЭ — для определения НДС оболочки. Так, И. В. Слепневым была разработана

КЭ-модель РВС-20000 в программном комплексе ЛИРА. Однако в его модели было принято упрощение — конструкция кровли и кольца жесткости не учитывалась, а граничные условия вводили полный запрет на перемещения верхней кромки стенки. Такой подход привел к большим погрешностям — напряжения в металлоконструкциях достигали величин 400 МПа уже при 5 мм неравномерной осадки, что противоречит многолетним наблюдениям и большинству исследований.

Очевидно, что способность деформироваться зависит от жесткости конструкции, поэтому при оценке возможности развития деформаций сооружения необходимо разработать модель, максимально точно описывающую все его элементы.

Определение деформаций цилиндрической оболочки стенки РВС под произвольной нагрузкой сводится в каждом частном случае к решению системы дифференциальных уравнений (1), предложенных еще в трудах С. П. Тимошенко.

$$\begin{gathered}\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{1-\mu}{2}\cdot\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\frac{1+\mu}{2r}\cdot\frac{\partial^2 v}{\partial x\partial y}-\frac{\mu}{r}\cdot\frac{\partial w}{\partial x}=-\frac{q_x(1-\mu^2)}{E\delta};\\ \frac{1+\mu}{2}\cdot\frac{\partial^2 u}{\partial x\partial y}+\frac{1-\mu}{2}\cdot\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}-\frac{1}{r}\cdot\frac{\partial w}{\partial y}=\frac{q_y(1-\mu^2)}{E\delta};\\ \mu\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}-\frac{w}{r}-\frac{r\delta^2}{12}\left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4}+2\cdot\frac{\partial^4 w}{\partial x^2\partial y^2}+\frac{\partial^4 w}{\partial y^4}\right)=-\frac{q_z(1-\mu^2)}{E\delta},\end{gathered}\tag{1}$$

где u, v, w — составляющие смещений оболочки стенки (осевая, кольцевая и радиальная); r, δ — радиус срединной поверхности и толщина оболочки; E, μ — модуль Юнга и коэффициент Пуассона; q_x, q_y, q_z — составляющие внешней нагрузки.

Позже появились выражения, в которых авторы попытались учесть влияние днища и кольца жесткости. Однако принятые в математических моделях авторов допущения и упрощения не позволяют их широко распространить для практического применения.

Во многих исследованиях отмечается, что применение метода конечных элементов, основанного на дискретизации геометрической модели, является наиболее перспективным для решения подобных задач. В работе авторов была поставлена задача разработать модель РВС-20000, которая бы позволила определять распределение напряжений и деформаций в металлоконструкциях при любых величинах неравномерной осадки по данным нивелировки, а также учитывала бы элементы дополнительной жесткости (ПРП, трубопроводы ГУС, СППТ).

Для создания модели резервуара выполнено покоординатное построение всех основных узлов и элементов, а именно: центральной части днища, окрайки, кольца жесткости, балочных и листовых конструкций кровли и элементов дополнительной жесткости.

Уравнение (2) является основным при решении задач деформирования РВС методом конечных элементов.

$$[K]\{U\}=\{F\}+\{F\}^q+\{F\}^g+\{F\}^{\varepsilon 0}+\{F\}^{\sigma 0},\tag{2}$$

где $[K]$ — глобальная матрица жесткости КЭ-модели; $\{U\}$ — глобальный вектор, определяющий набор степеней свободы всей модели; $\{F\}$ — глобальный вектор заданных внешних узловых сил; $\{F\}^q, \{F\}^g, \{F\}^{\varepsilon 0}, \{F\}^{\sigma 0}$— глобальные векторы узловых сил, эквивалентные распределенным поверхностным и массовым силам, начальным деформациям и начальным напряжениям.

Для определения узловых перемещений u составляется глобальная матрица жесткости K, и в соответствии с действующими нагрузками задаются векторы внешних узловых сил, далее с использованием итерационных методов решаются системы линейных алгебраических уравнений. После чего в точках интегрирования элементов вычисляются деформации и напряжения в металлоконструкциях.

В модели учитывается нелинейное деформирование тонкостенных конструкций РВС, изгибная жесткость которых весьма мала по сравнению с жесткостью в продольном направлении.

В работе введено граничное условие, определяющее упругое закрепление фундаментного кольца и центральной части днища в контакте с грунтовым основанием. Ко-

эффициентом постели определяются характеристики упругодеформативных свойств основания резервуара. Для модели-прототипа был принят коэффициент постели для искусственно уплотненного песчано-глинистого грунта, равный 200 МН/м^3.

В модели учитывается наиболее неблагоприятное сочетание нагрузок согласно требованиям действующих Федеральных нормативных документов. Ветровое давление для V ветрового района — 600 Па, снеговая нагрузка с учетом снеговых мешков для V снегового района — 3 200 Па, гидростатическая от столба нефти с плотностью 865 кг/м^3, избыточное давление паров нефти — 250 Па, вес стационарного оборудования — 400 кН.

После построения геометрии проводилось разбиение модели конечно-элементной сеткой. Итоговая сетка состоит из четырехугольных элементов. В местах контакта производится сгущение сетки, размеры элементов варьируются в пределах от 5 до 500 мм. Всего в модели сгенерировано более полумиллиона узлов и трехсот тысяч элементов. На рис. 1 представлена модель резервуара РВС-20000 с разбиением на КЭ-сетку.

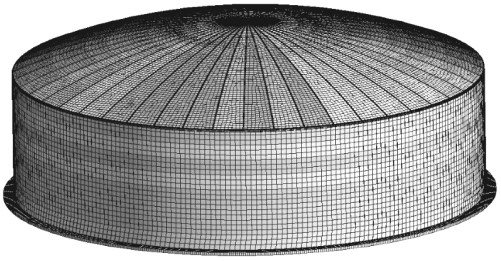


Рис. 1. ***Конечно-элементная модель РВС-20000 с разбиением на сетку***

В работе также учитывалось нелинейное влияние ветровой нагрузки на стенку и кровлю РВС, в работе [7] авторами были выполнены расчеты НДС резервуара с учетом неравномерного распределения аэродинамического коэффициента по поверхности сооружения. Для резервуара, расположенного в V ветровом районе с нормативным ветровым давлением 600 Па, дополнительные напряжения в стенке и опорном кольце могут достигать 50 МПа, что составляет 15 % от предела текучести резервуарной стали. Таким образом, напряжения, вызванные неравномерной осадкой, суммируются с напряжениями, возникающими от воздействия ветра, что необходимо учитывать при оценке технического состояния сооружения в случае развития неравномерной осадки.

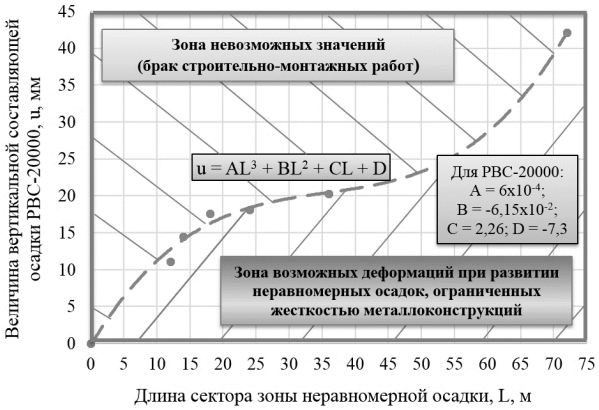
Неравномерную осадку принято раскладывать в гармоники рядов Фурье. Моделирование зоны неравномерной осадки в нашей работе выполняется путем вырезки сегмента фундаментного кольца размером L [5]. Величины зон варьировались от 12 до 72 м. Максимальные вертикальные составляющие осадки принимались в пределах от 10 до 100 мм. Такой подход позволил получить предельные величины деформирования РВС-20000 при максимальных эксплуатационных нагрузках для каждого значения зоны проседания. Так, учет кольца жесткости, кровли и других элементов позволил нам получить совершенно новые зависимости напряжений и деформаций от величины неравномерной осадки. Выяснилось, что при учете кольца жесткости значения радиальных прогибов стенки уменьшаются до 60 раз, а вертикальных — в 40 раз. При учете стационарной крыши и кольца жесткости значения радиальных прогибов уменьшаются в 120 раз, а вертикальных — в 50 раз.

В исследовании выполнено планирование численного эксперимента. Всего проведено 78 вычислений при четырех основных влияющих факторах: типе геометрической модели РВС, величине просадочной зоны, значении вертикальной составляющей осадки и характере нагружения. По результатам численного эксперимента получены эпюры перемещений и напряжений в металлоконструкциях РВС при различных величинах неравномерной осадки и условиях нагружения. Для каждого расчета получена матрица перемещений, деформаций, напряжений в нейтральном, внутреннем и наружном слоях оболочки.

Обработав результаты численного эксперимента по 78 вычислениям, удалось построить обобщенную зависимость (рис. 2), определяющую границы деформирования РВС-20000 при развитии неравномерной осадки. Из графика следует, что деформирование наружного контура днища может происходить лишь до штриховой линии. Если

же данные диагностики — нивелировки наружного контура днища РВС — показали, что осадка находится в зоне над штриховой линией, то она может быть вызвана только изначальным браком строительно-монтажных работ. В процессе эксплуатации развитие осадки в эту зону невозможно, так как она ограничена собственной жесткостью РВС.

Рис. 2. ***График определения возможных зон неравномерной осадки РВС-20000, обусловленных жесткостью его конструкции***

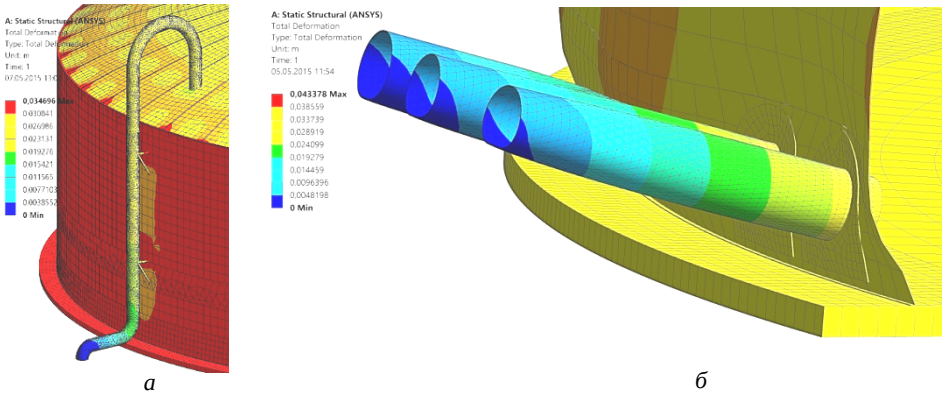


По результатам выполненных расчетов были разработаны основы методики, позволяющей определять необходимость ремонта РВС при осадках основания [5]. Для этого были проанализированы требования действующей нормативной документации к величинам допустимой осадки резервуаров.

Резервуары эксплуатируются с технологической обвязкой, зачастую имеющей абсолютно жесткое соединение со стенкой РВС. При развитии осадки резервуар и подключаемые к нему элементы дополнительной жесткости претерпевают несовместные деформации, поскольку располагаются на отдельно стоящих фундаментах. Это вызывает повышенное напряженное состояние в местах их сопряжения. По нормативной документации предельная осадка ограничена величиной 200 мм. В связи с этим предлагается на основе численного эксперимента установить предельно допустимые величины осадки РВС с элементами условной жесткости.

В работе авторами рассматривалось влияние подводящих трубопроводов, ГУС, СППТ и аварийного сброса [8–10]. По результатам расчетов были получены зависимости действующих напряжений в металлоконструкциях от величины осадки для данных узлов.

Установлено, что при осадке резервуара на величину 30 мм возникают недопустимые напряжения в области присоединения ПРП к стенке. В случае осадки РВС более чем на 80 мм появляются опасные напряжения в усиливающем воротнике трубопровода аварийного сброса (рис. 3).



а *б*

Рис. 3. ***Результаты расчета НДС металлоконструкций РВС-20000 с узлами дополнительной жесткости:*** *а— перемещения металлоконструкций РВС-20000 в зоне присоединения трубопровода ГУС при осадке 30 мм; б— прогибы трубопровода ПРП при осадке 30 мм*

Основным результатом численного эксперимента являются полученные обоснованные критериальные зависимости, определяющие предельно допустимую величину

осадок РВС-20000. В работе предложены критерии допустимых значений неравномерной осадки РВС, уравнение для определения допустимого уровня взлива нефти при наличии узла ПРП без компенсаторов, уравнение для определения предельной возможной деформации НКД при развитии неравномерной осадки. Предложенные критерии представлены на рис. 4.

Предлагаемые критерии допустимых значений неравномерной осадки

$u_{max} \le$ 12 мм, при $L \le 12$ м
$u_{max} \le$ 15 мм, при $L \le 14$ м
$u_{max} \le$ 17 мм, при $L \le 18$ м
$u_{max} \le$ 18 мм, при $L \le 24$ м
$u_{max} \le$ 20 мм, при $L \le 36$ м
$u_{max} \le$ 42 мм, при $L \le 72$ м

u_{max} – максимальное вертикальное отклонение от проектной отметки наружного контура днища, мм;
L – длина зоны неравномерной осадки по данным нивелировки, м.

Уравнение для определения допустимого уровня взлива нефти при осадке РВС-20000 с узлом ПРП без системы компенсации (т.е. при жестком защемлении):

$$h_{взл} \le -4,4 \cdot \ln S_{max} + 15$$

$h_{взл}$ – высота взлива нефти, м;
S_{max} – максимальное значение общей осадки, мм.

Полученное уравнение для определения предельной возможной деформации наружного контура днища РВС-20000 при развитии неравномерной осадки:

$$u_{max} = 6 \cdot 10^{-4} L^3 - 6,2 \cdot 10^{-2} L^2 + 2,26 \cdot L - 7,3$$

При $u > u_{max}$ - деформации оболочки вызваны **браком строительно-монтажных** работ т.е. были заложены при вводе РВС в эксплуатацию изначально.

Предлагаемая предельно допустимая величина осадки РВС-20000 при наличии трубопровода аварийного сброса:

$S_{max} \le 80$ мм ($\sigma_{экв} = [\sigma] = 188$ МПа)

$S_{max} \le 145$ мм ($\sigma_{экв} = \sigma_{т} = 325$ МПа)

Предлагаемая предельно допустимая величина осадки РВС-20000 при наличии трубопровода ГУС:

$S_{max} \le 22$ мм ($\sigma_{экв} = [\sigma] = 188$ МПа)

$S_{max} \le 30$ мм ($\sigma_{экв} = \sigma_{т} = 325$ МПа)

Рис. 4. ***Результаты вычислений. Критериальные зависимости, определяющие предельно допустимую величину осадок РВС-20000***

Выводы

- Создана численная модель РВС-20000 в программном комплексе ANSYS [11], в которой учитывается кольцо жесткости, стропильные балки, листовой настил кровли, выступ окрайки. Модель отражает реальную жесткость применяемых в строительстве металлоконструкций с учетом контактных взаимодействий и эксплуатационных нагрузок. Учитываются особенности геометрии и соединений элементов РВС, влияющих на НДС резервуара при неосесимметричном нагружении, обусловленном неравномерными осадками.
- Получены зависимости действующих эквивалентных напряжений в металлоконструкциях при развитии осадки РВС-20000 от воздействия условных элементов жесткости, имеющих собственный фундамент: ПРУ, ГУС, трубопровод аварийного сброса и СППТ. Выявлены зоны концентрации повышенных напряжений при неравномерных осадках в стенке над линией «излома» и в VIII поясе стенки над сварным швом. Исследовано влияние величины выступа окрайки на НДС резервуара. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости введения дополнительных требований к диагностике приведенных узлов при выявлении неравномерной осадки РВС.
- Разработана расчетная схема, и получена модель для расчета напряженно-деформированного состояния РВС при развитии неравномерных осадок оснований в неосесимметричной постановке. Получены значения деформаций и напряжений, характеризующих собственную жесткость РВС-20000 при различных величинах зоны неравномерной осадки, которая варьируется в пределах от 12 до 72 м по периметру резервуара, интервалы которой укладываются в 92 % всех случаев неравномерных осадок РВС-20000, эксплуатируемых в настоящий момент на территории Западной Сибири.
- Установлены зависимости между задаваемым сектором зоны депланации и максимальной величиной вертикальной составляющей неравномерной осадки РВС-20000, характеризующие конструктивную жесткость конструкции резервуара. Определены области возникновения предельных состояний, в соответствии с которыми принимается решение о необходимости ремонта или возможности продолжения эксплуатации резервуара [12] при условии технического обоснования.

Список литературы

1. Тарасенко А. А., Чепур П. В., Шарков А. Е., Гретченко Д. А. Технология диагностики вертикальных стальных резервуаров без снятия антикоррозионного покрытия // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 9-8. – С. 1703-1708.
2. Тарасенко А. А., Чепур П. В., Тарасенко Д. А. Численное моделирование процесса деформирования резервуара при развитии неравномерных осадок // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 4. – С. 88-91.
3. Тарасенко А. А., Чепур П. В., Грученкова А. А. Использование критериев стандарта API-653 для оценки допустимой величины осадки днища резервуаров // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12-7. – С. 1418-1422.
4. 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.
5. Чепур П. В. Напряженно-деформированное состояние резервуара при развитии неравномерных осадок его основания: дис. канд. техн. наук – М.: Российский государственный университет нефти и газа имени И. М. Губкина, 2015. – 181 с.
6. Чепур П. В., Тарасенко А. А. Создание и верификация численной модели резервуара РВСПК-50000 // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 7-1. – С. 95-100.
7. Чепур П. В., Тарасенко А. А. Особенности деформирования крупногабаритных резервуаров со стационарной крышей при неосесимметричном воздействии ветровой нагрузки // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 12-1. – С. 97-102.
8. Тарасенко А. А., Чепур П. В., Грученкова А. А., Соколов С. С. Оценка влияния трубопроводов системы подслойного пожаротушения на напряженное состояние резервуара при осадке основания // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11-8. – С. 1698-1702.
9. Чепур П. В., Тарасенко А. А. Особенности совместной работы резервуара и устройств размыва донных отложений винтового типа // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2-8. – С. 1671-1675.
10. Чепур П. В., Тарасенко А. А., Грученкова А. А., Антонов И. В. Численный анализ влияния жесткости газоуравнительной системы при развитии осадок резервуара // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11-6. – С. 1292-1296.
11. Васильев Г. Г., Тарасенко А. А., Чепур П. В., Гуань Ю. Анализ сейсмостойкости вертикального стального резервуара РВСПК-50000 с использованием линейно-спектрального метода // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 10. – С. 120-123.
12. 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.

Сведения об авторах

Тарасенко Александр Алексеевич, *д. т. н., профессор кафедры «Транспорт углеводородных ресурсов», Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 89088741396, e-mail: a.a.tarasenko @gmail.com.*

Чепур Петр Владимирович*, ассистент кафедры «Прикладная механика», Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 8(919)9568766, e-mail:chepur@me.com.*

Миронов Виктор Владимирович*, д. т. н., профессор, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 8(3452)434535*

Грученкова Алеся Анатольевна*, аспирант кафедры «Транспорт углеводородных ресурсов», Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 89220018377*

Information about the authors

Tarasenko A. A.*, Doctor of Engineeri, professor of chair «Pipeline transport», Industrial University of Tyumen, phone: 89088741396, e-mail: a.a.tarasenko @gmail.com.*

Chepur P. V.*, assistant of the chair of «Applied mechanics», Industrial University of Tyumen, phone: 8(919)9568766, e-mail: chepur@me.com.*

Mironov V. V.*, Doctor of Engineeri, professor, Industrial University of Tyumen, phone: 8(3452)434535*

Gruchenkova A. A., *postgraduate of the chair «Pipeline transport», Industrial University of Tyumen, phone: 89220018377*