

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ СТАЛЬНЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ ПРИ ТЕХНИЧЕСКОМ ДИАГНОСТИРОВАНИИ

Ю. В. РАДЫШ, А. С. КИРЕЕВ

Программа инструментального обследования резервуаров после монтажа и в процессе эксплуатации, изложенная в нормативных документах [1–5], включает контроль геометрической формы корпуса (стенки) резервуара по требованиям [6]. В соответствии с ними предусматриваются следующие измерения:

диаметра стенки на уровне днища (в контрольных осевых сечениях);

радиальных отклонений стенки от цилиндрической поверхности V_1 , образованной вертикалями, восстановленными из нижнего контура стенки (в контрольных точках осевых сечений);

вертикальных отклонений нижнего контура стенки от проектной горизонтальной плоскости Γ_0 , с известной отметкой уровня (в контрольных точках контура);

наибольших местных отклонений стенки от прямолинейных отрезков, соединяющих верхний и нижний края деформированного участка стенки в осевом сечении.

Одновременно производится [6] последующая оценка соответствия (несоответствия) геометрической формы стенки требованиям нормативной документации по результатам этих измерений.

Объемы и методы контроля геометрической формы стенки резервуара, предусматриваемые действующей нормативной документацией, имеют существенные недостатки. Во-первых, очевидно, что по результатам измерений невозможно построить геометрическую форму стенки из-за отсутствия результатов измерения радиальных отклонений нижнего контура стенки от проектной поверхности вертикального кругового цилиндра V_0 заданного радиуса. Эти отклонения вполне определяются прямыми измерениями радиуса стенки на уровне днища (в контрольных осевых сечениях), которые предусматривались устаревшими требованиями [7]. Однако в условиях отсутствия маркировки либо недоступного при наличии центральной стойки центра днища указанные измерения радиуса стенки неосуществимы. Поэтому в новой редакции [6] контроль радиуса стенки заменен контролем ее диаметра с соответствующим увеличением в 2 раза допустимых отклонений от проекта диаметра сравнительно с допустимыми отклонениями радиуса. Не подлежащие согласно [6] контролю радиальные отклонения нижнего контура стенки от проектной поверхности V_0 вместе с контролируемыми радиальными отклонениями стенки от поверхности V_1 оказывают существенное влияние на напряженно-деформируемое состояние резервуара при действии гидростатической нагрузки [8–10]. Следует отметить, что

попытка нормативного учета влияния не подлежащих контролю радиальных отклонений нижнего контура стенки при оценке эксплуатационной надежности резервуара предпринята в работе [2]. Однако методика контроля радиальных отклонений отсутствует.

Во-вторых, очевидно, что результаты измерений содержат методические (случайные и систематические) погрешности, для уменьшения либо полного исключения которых не предусмотрены в действующей нормативной документации эффективные процедуры первичной математической обработки. Присутствие методических погрешностей не только снижает достоверность, но и приводит к неоднозначности в результатах инструментального контроля, а следовательно, и к неопределенности в оценке технического состояния резервуара.

Цель работы. Разработка усовершенствованных методов инструментального контроля и процедур первичной математической обработки результатов контроля геометрической формы стальных вертикальных резервуаров, которые должны обеспечить возможность построения фактической геометрической формы стенки резервуара для анализа его напряженно-деформируемого состояния под действием гидростатической нагрузки, а также однозначность результатов инструментального контроля совместно с минимизацией вплоть до полного устранения методических погрешностей измерения.

Решение задач. 1. *Определение центра днища и радиальных отклонений нижнего контура стенки от проектной поверхности вертикального кругового цилиндра заданного радиуса.* Целью расчета при отсутствии маркировки центра днища резервуара является определение следующих характеристик: местоположения этого центра, фактического внутреннего радиуса резервуара, радиальных отклонений нижнего контура стенки от проектной вертикальной поверхности кругового цилиндра V_0 заданного радиуса $R_{ном}$, отклонений диаметра резервуара.

Исходными данными для расчета являются полученные при обследовании результаты прямых измерений радиуса стенки R'_i на уровне днища, определяемые как расстояние от условного центра O' до каждой i -й контрольной вертикали, восстановленной из нижнего контура стенки.

Методика расчета основана на отыскании наилучшего по [11] решения системы линейных алгебраических уравнений вида

$$R'_i = R + A_x \cos \varphi_i + A_y \sin \varphi_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

относительно фактического внутреннего радиуса резервуара R и компонентов A_x, A_y вектора малого

смещения $O'O$ фактического центра днища резервуара O от условного центра O' . Здесь использованы следующие обозначения: R'_i — результаты измерения расстояний от условного центра O' до i -й контрольной вертикали; φ_i — полярный угол направления на i -ю контрольную вертикаль из фактического центра O ; n — число контрольных вертикалей, восстановленных из соответствующих контрольных точек нижнего внутреннего контура стенки. Для равномерно расположенных контрольных вертикалей

$$\varphi_i = 360(i - 1) / n. \quad (2)$$

Используя найденные значения R , A_x , A_y , вычисляют расстояния R_i от фактического центра O до каждой i -й контрольной вертикали по формуле:

$$R_i = - (A_x \cos \varphi_i + A_y \sin \varphi_i) + [(R'_i)^2 - (A_x \sin \varphi_i - A_y \cos \varphi_i)^2]^{0,5}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (3)$$

Радиальные отклонения нижнего контура стенки от вертикальной поверхности кругового цилиндра радиуса $R_{ном}$ измеряются разностью

$$U_{0i} = R_i - R_{ном}. \quad (4)$$

Более детальная картина геометрической формы нижнего контура стенки определяется сплайн-аппроксимацией кубическими полиномами [12] радиальных отклонений (уравнение (4)) точек этого контура. Предусмотренные действующей нормативной документацией отклонения внутреннего диаметра на уровне днища определяются суммой радиальных отклонений для любой пары диаметрально противоположных точек контура.

2. *Определение геометрической формы и радиальных отклонений стенки от проектной поверхности вертикального кругового цилиндра заданного радиуса.*

Исходными данными для расчета являются:

1) результаты прямых измерений радиальных отклонений U_{ij} поверхности стенки от цилиндрической поверхности B_1 , образованной вертикалями, восстановленными из нижнего контура стенки;

2) расчетные значения радиальных отклонений U_{0j} нижнего контура стенки от проектной поверхности вертикального кругового цилиндра B_0 заданного радиуса $R_{ном}$ (см. п. 1).

Указанные радиальные отклонения определены в контрольных точках с целочисленными координатами $i = 0, 1, \dots, m$ и $j = 1, \dots, n$. Значения этих координат соответствуют номерам горизонтальных и вертикальных координатных плоскостей проектной цилиндрической системы координат, на пересечении которых с поверхностью стенки расположены контрольные точки. Фактическое число $m + 1$ горизонтальных и n вертикальных секущих плоскостей, определяющих контрольные точки при инструментальном обследовании, может превышать число секущих плоскостей, указанных в действующей нормативной документации. При этом обеспечивается необходимое сгущение контрольных точек по месту обнаруженных выпуклостей и вогнутостей стенки резервуара.

Методика расчета геометрической формы поверхности стенки резервуара основана на определении

совокупности радиальных координат R_{ij} контрольных точек этой поверхности согласно равенству

$$R_{ij} = R_{ном} + U_{0j} + U_{ij}. \quad (5)$$

Для получения более детальной картины геометрической формы внутренней поверхности стенки применяется кубическая сплайн-аппроксимация [12] радиальных координат точек этой поверхности и ее радиальных отклонений от цилиндрической поверхности B_1 , представляемая в виде соответствующих преобразований

$$R_{ab} = f(R_{ij}), \quad U_{ab} = f(U_{ij}), \quad a = 0, 1, \dots, m_1, \quad b = 1, \dots, n_1. \quad (6)$$

При этом число точек сплайн-аппроксимации поверхности стенки с целочисленными координатами a и b , равное $(m_1 + 1) \times n_1$, значительно превышает число контрольных точек, равное $(m + 1) \times n$, использованных при инструментальном обследовании. Указанная аппроксимация обеспечивает также равномерность разбивки и требуемую гладкость описания поверхности стенки резервуара для последующего анализа.

Выражение (6) определяет фактическую геометрическую форму поверхности стенки, установленную во время проведения инструментальных обследований. При этом изменения гидростатической нагрузки и температуры резервуара вызывают перемещение поверхности стенки и изменение ее напряженно-деформированного состояния.

В соответствии с действующей нормативно-технической документацией предусматриваются следующие ограничения на геометрические характеристики стенки:

1) радиальные отклонения стенки от цилиндрической поверхности B_1 , образованной восстановленными из нижнего контура стенки вертикалями, не должны превышать допустимых отклонений для каждого k -го пояса, т. е.

$$\max_{\{ab\}} |U_{ab}| \leq \Delta_k, \quad (7)$$

где максимум вычисляется по результатам измерения отклонений в контрольных точках k -пояса;

2) местные отклонения (выпучины и вмятины) стенки от отрезка прямой, лежащего в осевом сечении (вертикальной координатной плоскости) и соединяющего верхний и нижний края деформированного участка не должны превышать допустимых отклонений, зависящих от длины отрезка,

$$\max_{\{k\}} |U_{a+kb} - U_{ab} \frac{p-k}{p} - U_{a+pb} \frac{k}{p}| \leq \Delta_p, \quad (8)$$

где p — число равномерных разбиений по высоте деформированного участка стенки с постоянным шагом; $k = 0, 1, \dots, p$; a, b — координаты нижнего конца отрезка прямой (на нижнем краю деформированного участка стенки); $a + p, b$ — координаты верхнего конца отрезка прямой (на верхнем краю деформированного участка стенки).

3. *Определение вертикальных отклонений нижнего контура стенки от проектной горизонтальной плоскости заданного уровня.* Контурная часть (окрайки) днища является установочной базой стенки резервуара. Исходными данными для

расчета являются результаты нивелирования контурной части (окрайков) днища в контрольных точках нижнего контура стенки, представленные в виде неплотно заполненной таблицы прямых измерений (отсчетов) C_{ia} по нивелирной рейке в i -й контрольной точке при a -й установке нивелира.

Определение. Смена установки a на установку b в точке i называется в этом случае ненаправленным (неориентированным) переходом, который обозначается выражением

$$a \xrightarrow{i} b. \quad (9)$$

При сменах установок в процессе нивелирования возможно образование из переходов нетривиальных циклов вида

$$a \xrightarrow{j} b; a \xrightarrow{k} b \xrightarrow{c} j \text{ и т. п.} \quad (10)$$

При этом каждому циклу вида (10) при его обходе в определенном направлении соответствует уравнение связи между отсчетами по рейке вида

$$(C_{ia} - C_{ib}) + (C_{jb} - C_{ja}) = 0; \\ (C_{ia} - C_{ib}) + (C_{jb} - C_{jc}) + (C_{kc} - C_{ka}) = 0 \text{ и т. п.} \quad (11)$$

При обходе цикла в противоположном направлении левая часть этих уравнений меняет знак на противоположный.

В процессе нивелирования крайков днища по замкнутому нижнему контуру стенки образуется по меньшей мере один цикл, включающий все установки нивелира. Уравнение связей, соответствующее этому и другим циклам, обычно не выполняется при инструментальном обследовании вследствие наличия методических ошибок нивелирования. Это обуславливает неоднозначность определения высотных отметок контрольных точек, а, следовательно, и неопределенность в оценке технического состояния резервуара. Для обеспечения однозначности определения высотных отметок контрольных точек при одновременной минимизации ошибок нивелирования вплоть до полного их исключения рассматривается система линейных алгебраических уравнений вида

$$C_{ia} = H_a - Z_i, \quad a = 1, \dots, p, \quad i = 0, 1, \dots, n \quad (12)$$

относительно неизвестных Z_i и H_a , определяющих соответственно высотные отметки i -й контрольной точки и нивелира при a -й установке. Здесь n — общее число контрольных точек; p — общее число установок при нивелировании. В уравнениях (12) выделяется реперная точка, имеющая индекс $i = 0$, с известной высотной отметкой Z_0 .

При заданных H_a и Z_i невязки этих уравнений вида

$$\delta_{ia} = C_{ia} - (H_a - Z_i), \quad a = 1, \dots, p, \quad i = 0, 1, \dots, n, \quad (13)$$

определяют погрешности нивелирования i -й точки в a -й установке. Поскольку возникновение погрешности нивелирования равновероятно в любой установке для любой точки, возможен подбор наилучших значений H_a и Z_i при заданном Z_0 , которые обеспечивают наименьшую среднеквадратичную погрешность нивелирования или минимизируют

сумму квадратов ошибок нивелирования во всех точках при всех установках.

Методика расчета основана на выборе указанных значений H_a и Z_i как наилучшего по [8] решения уравнений (12) при заданном значении Z_0 . Предусмотренные действующей нормативной документацией вертикальные отклонения нижнего контура стенки от проектной горизонтальной плоскости Γ_0 с заданной высотной отметкой $Z_{ном}$ определяются разностью

$$V_i = Z_i - Z_{ном}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (14)$$

Сравнительный анализ результатов определения вертикальных отклонений нижнего контура стенки обследованных резервуаров свидетельствует об уменьшении на порядок (в среднем в 10 раз) степени влияния погрешностей нивелирования при однозначном определении этих отклонений по предложенной методике сравнительно с методикой, изложенной в действующей нормативной документации. Предлагаемая методика естественно распространяется на случаи смены установок в нескольких (общих для установок) контрольных точках, привязки к нескольким различным реперным точкам в одной установке или к одной в различных установках, а также при их произвольных комбинациях. При этом избыточность информации используется наилучшим образом в целях уменьшения методической погрешности нивелирования.

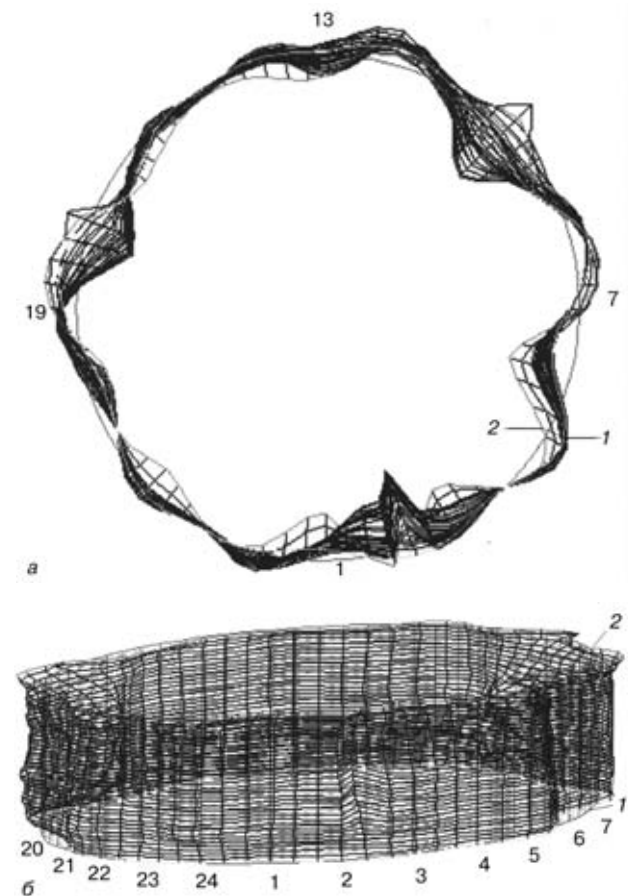
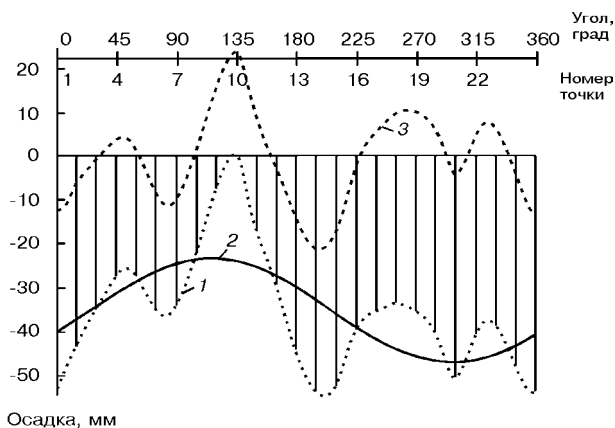


Рис. 1. Геометрическая форма стенки резервуара: а — вид сверху; б — изометрия; 1 — нижний, 2 — верхний контур; максимальное смещение 117 мм.



Осадка, мм

Рис. 2. Вертикальные отклонения нижнего контура стенки (осадки) от горизонтальной плоскости, проходящей через базовую контрольную точку 10: 1 — фактическая осадка; 2 — твердотельная, 3 — деформационная составляющие осадки; смещение по вертикали равно $-34,8$ мм; уровень крена — $1,8'$; направление крена — 96° ; число измеренных точек — 24.

4. *Определение составляющих неравномерной осадки резервуара: поступательной осадки, крена и деформационной составляющей.* Исходными данными для расчета являются результаты нивелирования Z_i или V_i контурной части (окрайков) днища по нижнему контуру стенки в контрольных точках (см. п. 3). Методика разложения неравномерной осадки резервуара на твердотельную составляющую, представленную поступательной осадкой и креном резервуара, и деформационную составляющую представлена в [8–10]. Изменения деформационной составляющей осадки при гидростатической нагрузке являются причиной возникновения дополнительных напряжений стенки резервуара вблизи уторного узла.

Заключение. Изложенные методы инструментального контроля геометрической формы стенки и первичной математической обработки результатов этого контроля прошли апробацию при проведении обследований резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов. Методы первичной математической обработки результатов инструментального обследования реализованы в виде специализирован-

ного программного обеспечения, обеспечивающего возможность оперативной обработки и анализа этих результатов в табличной и графической формах. Примеры графических изображений геометрической формы стенки резервуара в скелетном виде и осадки нижнего контура стенки, построенных по описанной выше методике, приведены на рис. 1, 2 и в работах [8–10].

1. *Правила технической эксплуатации резервуаров и инструкции по их ремонту* / Гос. комитет СССР по обеспечению нефтепродуктами. — М.: Недра, 1988. — 269 с.
2. *Правила технічної експлуатації резервуарів та інструкції по їх ремонту. Додатки та зміни* / Укр. об'єднання «Нафтопродукт». — Київ: 1997. — 121 с.
3. *Руководство по обследованию и дефектоскопии стальных вертикальных резервуаров* / Гос. ком. РСФСР по обеспечению нефтепродуктами. — Астрахань, 1989. — 145 с.
4. *Инструкция по техническому надзору, методам ревизии и отбраковке трубчатых печей, резервуаров, сосудов и аппаратов нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств.* ИТН-93 / ВНИКТИнефтехимоборудование. — Волгоград, 1995. — 192 с.
5. *ВСН 311-89.* Монтаж стальных вертикальных цилиндрических резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов объемом от 100 до 50000 м³ / Минмонтажспецстрой СССР. — М., 1989. — 99 с.
6. *СНиП 3.03.01-87.* Несущие и ограждающие конструкции. / Госстрой СССР. — М.: 1986. — 190 с.
7. *СНиП 111-18-75.* Правила производства и приемки работ. Металлические конструкции. — М., Госстрой СССР, 1976. — 160 с.
8. *Радыш Ю. В., Киреев А. С.* Совершенствование базы диагностики технического состояния и прогнозирования надежности резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов // *Технич. диагностика и неразруш. контроль.* — 2000. — № 4. — С. 38–47.
9. *Барзилович Д. В., Радыш Ю. В., Киреев А. С.* Совершенствование диагностики и прогнозирования надежности нефтерезервуаров. — Монтажные и спец. работы в строит-ве. — 2001. — № 1. — С. 23–26.
10. *Тенденции в развитии комплексных требований к резервуарам для хранения нефти (зарубежный опыт)* / А. М. Боровский, Б. М. Медник, Ю. В. Радыш, А. А. Цвигун — Киев: Основа, 2000. — 208 с.
11. *Гантмахер Р.* Теория матриц. — М.: Наука, 1966. — 576 с.
12. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике для научных работников и инженеров. — М.: Наука, 1984. — 832 с.

Корпорация «Укрмонтажспецстрой»,
Технический комитет «Спецмонтаж»,
Киев

Поступила в редакцию
29.03.2001