

Проблемы, возникающие при реализации методов измерений, содержащихся в ГОСТ 8.570-2000 «ГСИ. Резервуары стальные вертикальные цилиндрические. Методика поверки», и пути их решения (геометрический метод)

ВВЕДЕНИЕ

Определение значения объема различных сосудов и резервуаров для хранения жидкостей истари является насущной потребностью человека. Потребность эта обусловлена торговыми отношениями, где точность знания объема продаваемой или покупаемой жидкости (к примеру вина) напрямую влияла на выручку от торговли. Также надо было знать объемы пресной воды, запасаемой в крепостях на случай осады, и от точности знания этого объема зачастую зависела обороноспособность крепости и жизнь ее защитников. В военных и исследовательских походах через засушливые районы необходимо точно знать объем питьевой и технической воды, запасаемой для похода. В противном случае успех экспедиции будет крайне сомнительным. С развитием техники появилась необходимость в знании объемов топлива, хранящихся на нефтебазах. И в силу того, что топливо является далеко не дешевой жидкостью, а точность знания хранящихся и реализуемых ее объемов по сей день является одним из основных влияющих факторов во всех секторах, где используются двигатели внутреннего сгорания, точность методов и средств определения объема резервуаров для хранения жидкости должна четко регламентироваться и находиться на высоком уровне.

Объем резервуаров небольших размеров наиболее просто и целесообразно определять весовым или же объемным методом, когда требуемое значение получается напрямую через измерение объема или массы наливаемой в резервуар жидкости. Объем же резервуаров больших размеров таким образом определить возможно, но этот процесс будет связан с определенными и труднопреодолимыми трудностями. Поэтому такие резервуары градуируются методом геометрических измерений. В этом случае значение объема резервуара получается косвенным методом, путем его вычисления по формулам стереометрии с использованием значений измеренных параметров резервуара.

Стандартизация методов измерений, производимых для определения объема резервуаров, привела к созданию ГОСТов, в которых жестко регламентируются требования к условиям проведения измерений, точности используемых средств измерений, методологии измерений и последующей математической обработки результатов измерений. Так для стальных горизонтальных резервуаров был разработан ГОСТ 8.346-2000 «ГСИ. Резервуары стальные горизонтальные цилиндрические. Методика поверки», а для вертикальных резервуаров — ГОСТ 8.570-2000 «ГСИ. Резервуары стальные вертикальные цилиндрические. Методика поверки». Содержание ГОСТов регулярно пересматривается, исправляется и дополняется. Но не смотря на это, рассматриваемые нормативные документы, на мой взгляд, еще очень далеки от совершенства и содержат положения, значительно затрудняющие проведение измерительных работ и снижающие их качество, а зачастую приводящие и к невозможности проведения геометрических измерений с целью определения параметров резервуаров, используемых для вычисления их объема.

Представленная работа содержит в себе описание некоторых подобных положений и намечает пути выхода из создавшейся ситуации, позволяющие провести более качественные измерения даже в ситуациях, когда выполнение требований ГОСТ не представляется возможным в силу тех или иных причин.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

ГОСТ 8.570-2000 для измерения параметров резервуара, таких как высоты поясов и значение отклонений образующих резервуара от вертикали предлагает использование измерительной каретки и штанги с упорным угольником. Для понимания создающейся проблемы, связанной с измерениями, методология которых приведена в рассматриваемом нормативном документе следует привести дословные цитаты и разобрать недостатки предлагаемых методов. Так для определения высот поясов резервуара в ГОСТ предлагается следующее.

9.1.6 Измерения высоты поясов и толщины стенок

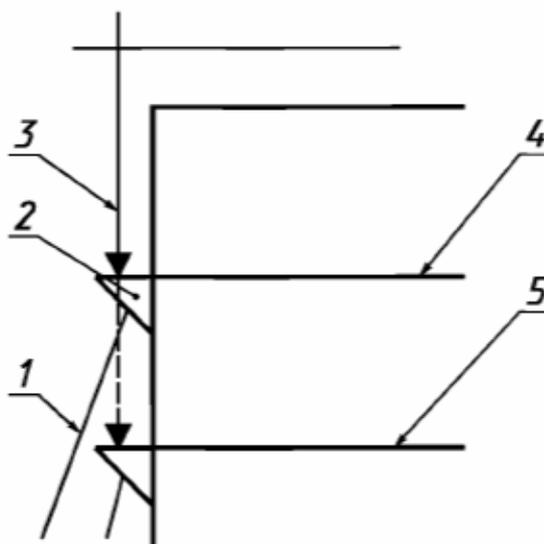
9.1.6.1 Высоту поясов h_n измеряют с наружной стороны резервуара при помощи измерительной рулетки с грузом и упорного угольника.

9.1.6.2 Для резервуаров без лестниц измерения проводят, поднимая рулетку с грузом от упорного угольника 90° (рисунок А. 12) 1, находящегося у нижнего края пояса, до упорного угольника 90° 2, находящегося у верхнего края пояса, считывая разницу в показаниях рулетки относительно неподвижной отметки.

9.1.6.3 Высотой i -го пояса считают расстояние h_i , в пределах которого внутренний радиус пояса r_i имеет постоянное значение (рисунок А. 13). Значение h_i получают вычитанием из значения h_{H_i} значений нахлестов, принятых по технической документации...

При этом в приложении А приведен чертеж, поясняющий методологию измерений:

ГОСТ 8.570—2000



1 — штанга упорного угольника 90° ; 2 — упорный угольник 90° ; 3 — измерительная рулетка с грузом;
4, 5 — сварные швы резервуара

Рисунок А.12 — Схема измерения высоты пояса

Рисунок 1. Схема измерения высоты пояса, приведенная в ГОСТ 8.570-2000

Создается впечатление, что разработчик этого метода измерений никогда практически не реализовывал его. Мало того, что для реализации описанного метода оператор, удерживающий штангу с упорным угольником, должен обладать недюжинной силой для удержания штанги (ведь ее длина может достигать 10 м и более), а оператор, проводящий измерения, должен обладать поистине снайперской меткостью, чтоб попасть грузом рулетки в площадку упорного угольника, так еще весь процесс измерений осложняется ветром, раскачивающим рулетку. Кроме того точность позиционирования упорного угольника точно по границе пояса достаточно сомнительна. Все это кардинально снижает точность измерений. И если для резервуаров, пояса которых сварены «встык», неточность измерений высот поясов не будет оказывать влияния на дальнейшие вычисления, то для резервуаров с изготовлением поясов «внахлест» это влияние будет уже существенным. Наконец, данный метод попросту опасен для находящихся внизу работников. Ведь если оператор со штангой по тем или иным причинам не сумеет удержать штангу и она упадет, то существует вероятность того, что находящиеся внизу люди получат серьезные травмы. Приведенный анализ дает все основания утверждать, что указанный метод измерений трудновыполним, не отличается высокой точностью и опасен, а значит не может применяться на практике и должен быть пересмотрен самым кардинальным образом.

Следующий немаловажный вопрос, который необходимо рассмотреть, это измерение радиальных отклонений образующих резервуара от вертикали. Для этого в ГОСТ предлагается нижеследующий метод измерений.

9.1.2 Измерения радиальных отклонений образующих резервуара от вертикали

9.1.2.1 Радиальные отклонения образующих резервуара (далее — радиальные отклонения) измеряют с применением измерительной каретки с отвесом (рисунок А.2) или измерительной каретки с теодолитом (рисунок А.4).

Примечание — При скорости ветра более 5 м/с для выполнения измерений радиальных отклонений применяют измерительную каретку с теодолитом.

9.1.2.2 Окружность первого пояса резервуара, измеренную по 9.1.1, разбивают на равные части (откладывают дугу постоянной длины и наносят вертикальные отметки на стенке первого пояса), начиная с образующей резервуара, находящейся в плоскости А (рисунок А. 10а), проходящей через точку измерений уровня жидкости и базовой высоты резервуара на направляющей планке измерительного люка и продольную ось резервуара, с соблюдением следующих условий:

- число разбивок должно быть четным;
- число разбивок в зависимости от вместимости резервуара выбирают по таблице 3

Т а б л и ц а 3

Наименование показателя	Значение показателя для вместимости резервуара, м ³ , не менее						
	100	200	300	400	700	1000	2000
Число разбивок	24	26	28	30	32	34	36

Окончание таблицы 3

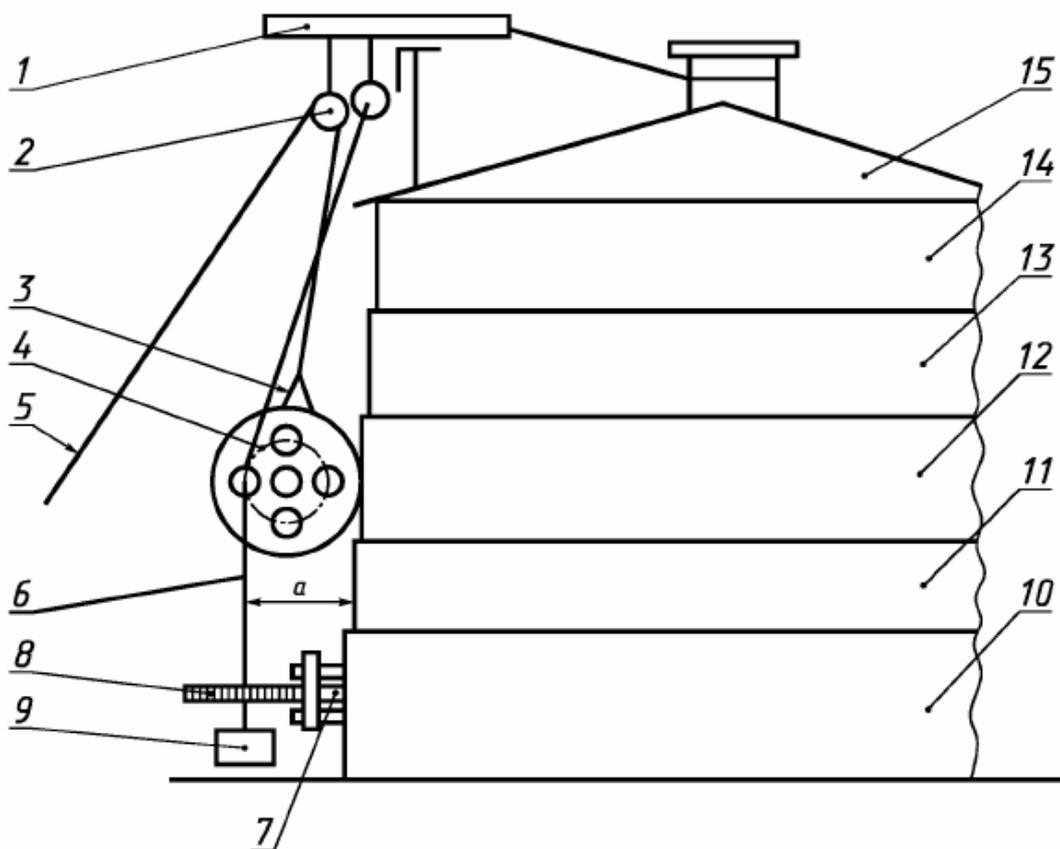
Наименование показателя	Значение показателя для вместимости резервуара, м ³ , не менее						
	3000	5000	10000	20000	30000	50000	100000
Число разбивок	38	40	42	44	46	48	52

Все отметки разбивок пронумеровывают по часовой стрелке в соответствии с рисунком А.10.

9.1.2.3 При определении радиальных отклонений поясов резервуара с применением

измерительной каретки с отвесом измеряют расстояние a от стенки резервуара до нити отвеса 6, проходящей через отметки разбивки (рисунок А. 2).

Для установки измерительной каретки (далее — каретки) на резервуаре у края резервуара на штанге 1 с некоторым возвышением над кровлей крепят блок 2 через который перекидывают тяговый канат 5 для подъема каретки 3. Нить отвеса 6 закрепляют на штанге. Отвес и блок для подъема каретки вместе со штангой должны свободно перемещаться по кровле резервуара. Для перехода от одной отметки разбивки к другой каретку опускают, а штангу со всей оснасткой передвигают по кровле резервуара. Расстояние от стенки резервуара до нити a отвеса отсчитывают по линейке 8. Линейку устанавливают в середине высоты первого пояса при помощи магнитного держателя 7 перпендикулярно к стенке резервуара, поочередно для каждой отметки разбивки. Отсчеты по линейке снимают при передвижении каретки вверх вдоль образующей резервуара, проходящей через отметки разбивки. Измерения вдоль каждой образующей резервуара начинают с отметки разбивки под номером один первого пояса. На каждом следующем поясе измерения проводят в трех сечениях: среднем, находящемся в середине пояса, в нижнем и верхнем, расположенных на расстоянии 50 — 100 мм от горизонтального сварного шва. На верхнем поясе — в двух сечениях: нижнем и среднем. Отсчеты по линейке снимают с погрешностью в пределах ± 1 мм в момент, когда каретка установлена в намеченной точке при неподвижном отвесе.



1 — штанга; 2 — блок; 3 — каретка измерительная; 4 — колеса каретки; 5 — тяговый канат; 6 — нить отвеса; 7 — магнитный держатель; 8 — линейка; 9 — отвес; 10, 11, 12, 13, 14 — пояса резервуара; 15 — кровля резервуара; a — расстояние от стенки резервуара до нити отвеса; штанга 1 и блок 2 — образуют приспособление для подвески каретки

Рисунок А.2 — Схема измерений радиальных отклонений с применением измерительной каретки с отвесом

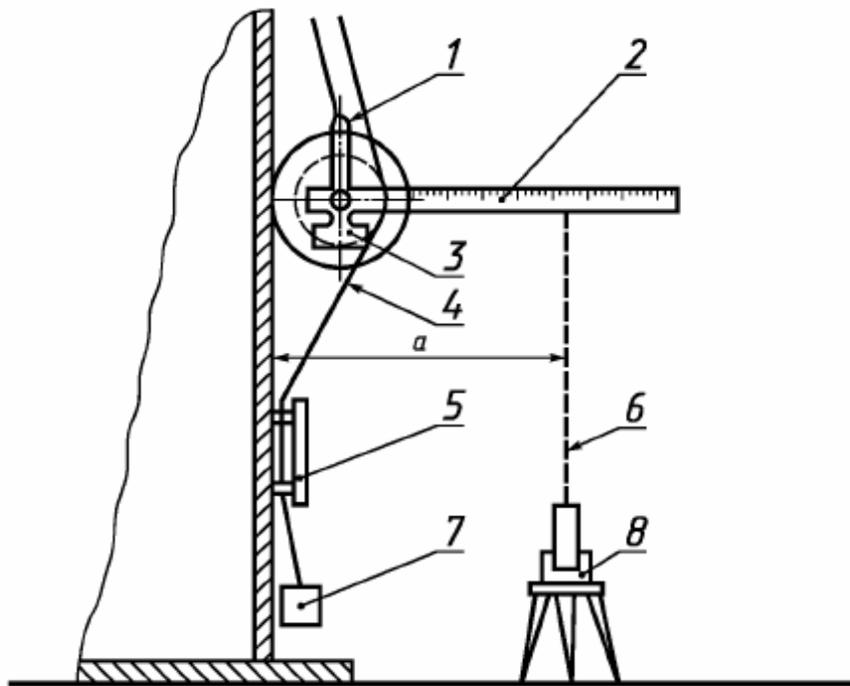
Рисунок 2. Схема измерения радиальных отклонений с применением каретки с отвесом,

Как сказано в примечании к п. 9.1.2, при скорости ветра более 5 м/с для выполнения измерений радиальных отклонений применяют измерительную каретку с теодолитом.

9.1.2.4 При определении радиальных отклонений с применением каретки с теодолитом (рисунок А.4) измеряют расстояние a от стенки резервуара до визирной линии $б$ теодолита 8 , направленной перпендикулярно к линейке 2 , укрепленной на оси каретки 1

При этом теодолит 8 устанавливают над геодезической точкой на расстоянии от стенки резервуара, обеспечивающем удобное наведение зрительной трубы, но не менее 10 м от измеряемой образующей резервуара. Для исключения смещения каретки при ее движении по стенке резервуара струну 4 с грузом 7 закрепляют магнитным держателем 5 .

Измерения начинают с установки каретки на $3/4$ высоты первого пояса, далее перемещают каретку вверх в порядке, указанном в 9.1.2.3. Теодолит устанавливают над геодезической точкой, настраивают и приводят в рабочее положение в соответствии с инструкцией завода-изготовителя и наводят вертикальную нить сетки зрительной трубы на штрих шкалы, кратный 1 см, примерно в середине линейки. Конец шкалы линейки должен находиться у оси каретки. Отсчеты снимают по шкале линейки при последовательной установке каретки в точках измерений и зафиксированном положении горизонтального круга теодолита.



1 — каретка; 2 — линейка; 3 — противовес; 4 — струна; 5 — магнитный держатель; 6 — визирная линия; 7 — груз; 8 — теодолит; a — расстояние от стенки резервуара до нити отвеса

Рисунок А.4 — Схема измерения радиальных отклонений с применением измерительной каретки с теодолитом

Рисунок 3. Схема измерения радиальных отклонений с применением измерительной каретки с теодолитом, приведенная в ГОСТ 8.570-2000

Оба приведенных метода труднореализуемы на практике, а то и совершенно невыполнимы в силу того, что резервуары — это не идеальные цилиндры, а сложные инженерные сооружения, на образующих которых с внешней стороны расположены различные конструктивные элементы: лестницы, трапы, технологические площадки, различные трубы, смотровые люки и пр. Все эти элементы препятствуют правильному расположению измерительной каретки и ее прокатыванию

по стенкам резервуара. И даже если все же удастся правильно расположить измерительную каретку, то даже слабый ветер станет достаточно серьезным препятствием для проведения точных измерений. Натянутая грузом измерительная нить под воздействием даже слабого ветра будет дрожать, как струна, а груз вместе с нитью будет непрерывно раскачиваться, что значительно снизит точность снятия отсчетов по линейке. Более сильный ветер будет смещать и переворачивать измерительную каретку. И даже метод, в котором предлагается применять каретку с линейкой и теодолит не даст нужного эффекта, так как парусность каретки увеличится за счет линейки. Да и саму линейку на каретке проблематично установить таким образом, чтобы ее ось была перпендикулярна вертикальной нити сетки нитей теодолита. Кроме того, необходимо учитывать, что расстояние между колесами измерительной каретки равно 350 мм, а это значит, что влияние на отсчет по линейке различных вмятин и выпучин на стенках резервуара будет в значительной мере сглажено и не будет учитываться. Значительные же отклонения образующих резервуара от вертикали порой приводят к тому, что каретка теряет контакт с образующими и свободно повисает в воздухе или же наоборот, груз каретки прижимается к стенке резервуара. В обоих случаях провести какие-либо измерения по линейке становится невозможным.

Опыт применения измерительной каретки на практике позволяет утверждать, что предлагаемые методы не отличаются высокой точностью, очень трудозатратны и зачастую просто невыполнимы, а значит должны быть кардинально пересмотрены с целью устранения перечисленных недостатков.

Третьим по счету, но не последним по важности является вопрос, связанный с нивелировкой днища резервуара. В первой редакции ГОСТа предлагалось равномерно поделить днище резервуара по восьми радиусам и восьми же концентрическим окружностям (всего 64 точки нивелировки). Последние изменения регламентируют деление днища на 24 радиуса и восемь концентрических окружностей, что дает уже 192 точки для измерения превышений. А это в свою очередь в четыре раза повышает трудоемкость работ и при этом едва ли повышает точность результата. При этом необходимо учитывать, что в летние месяцы, когда в основном и проводятся все работы по поверке или калибровке резервуаров, пустой резервуар, даже при температуре окружающего воздуха +25 °С, порой раскаляется на солнце так, что даже рядом с ним находиться невозможно, не говоря уже о том, чтобы проводить столь объемные работы внутри резервуара. Поэтому снова напрашивается вывод о том, что данная методика разрабатывалась в тиши и прохладе кабинетов и не опробовалась на практике. Если бы методика опробовалась практически, то сразу было бы понятно, что все неровности днища «прячутся» в мертвой полости и надо не учитывать эти неровности путем нивелировки, а определить вместимость мертвой полости объемным методом и тем самым значительно сократить объем работ и повысить точность измерений. Так как путь решения задачи уже определен, в данной работе он рассматриваться дополнительно уже не будет.

И напоследок стоит рассмотреть еще один вопрос. Связан он с измерением базовой высоты резервуара и требованием ГОСТа контролировать базовую высоту ежегодно. Вот что об это сказано в рассматриваемом нормативном документе.

9.1.10.3 Базовую высоту измеряют ежегодно. При изменении базовой высоты по сравнению с ее значением, установленным при поверке резервуара, более чем на 0,1 % проводят измерения вместимости «мертвой» полости и степени наклона резервуара и корректировку градуировочной таблицы за счет изменения вместимости «мертвой» полости и степени наклона резервуара. Уровни наполнения резервуара при измерениях базовой высоты не должны отличаться друг от друга более чем на 500 мм.

Как видно из приведенного фрагмента изменение базовой высоты резервуара объясняется изменением степени наклона резервуара. Предположим, что диаметр резервуара равен 15,0 м, а

измеренная при поверке базовая высота равна 12,0 м. Такие цифры справедливы для резервуаров объемом 2000 м³. Соответственно измененное на 0,1% значение базовой высоты будет равно 12,012 м. Произведя несложные вычисления, можно определить изменение наклона резервуара по отношению к его первоначальному положению. Угол наклона при этом получится равным 2,6°, а это в свою очередь даст нам значение превышения между противоположными точками днища (при диаметре 15 м) в направлении наклона равное 0,67 м. Такое превышение будет видно невооруженным глазом и будет значительно влиять на изменение значений объема налива в градуировочной таблице. А значит утверждение о том, что таким образом следует оценивать степень наклона резервуара, является абсолютно безосновательным и неверным. Максимум, что можно таким образом проконтролировать, это изменение объема мертвой полости, произошедшее в результате накопления в резервуаре донных отложений или же возникновение в днище резервуара так называемого хлопуна, который в силу тех или иных причин не был выявлен в процессе предыдущей поверки.

ПУТИ РЕШЕНИЯ

Для решения поставленной задачи необходимо кардинальным способом пересмотреть методологию измерений геометрических параметров вертикальных резервуаров, отказавшись от использования измерительной каретки и штанги с угольником в пользу теодолита с максимальным значением неравенства подставок 15,0" и увеличением зрительной трубы не менее 25^x. Этим требованиям удовлетворяют теодолиты Т2, 2Т2, 2Т2К и 3Т2КП. Остальные метрологические характеристики теодолита нас не интересуют, так как в процессе измерений они не используются.

Так для измерения высот поясов резервуара теодолит устанавливается на штативе на расстоянии 10-25 метров от резервуара, а с крыши резервуара спускается рулетка с грузом до упора его в утор днища резервуара. В местах пересечения ленты рулетки со сварным швом между поясами с помощью теодолита производится отсчет по шкале рулетки. Разница в отсчетах по верхней и нижней границам пояса будет являться его высотой. У резервуаров с нахлестом поясов друг на друга при вычислении высот поясов следует учитывать значения нахлестов, принятых по технической документации на резервуар. При этом следует учесть, что высота пояса должна получаться по внутренней стороне стенки резервуара.

Для измерения радиальных отклонений образующих резервуара от вертикали мною был разработан и опробован метод, при котором вместо измерительной каретки используется теодолит. Для реализации этого метода измерений необходимы следующие СИ и вспомогательные средства:

- 1 Теодолит с неравенством подставок, не превышающим 15", и увеличением зрительной трубы не менее 25^x;
- 2 Штатив для установки теодолита;
- 3 Нивелирная рейка с шашечной шкалой для измерения расстояний от теодолита до измеряемой образующей резервуара;
- 4 Линейка с магнитным держателем.

Измерение радиальных отклонений образующих резервуара от вертикали с помощью теодолита состоит из следующих операций:

1. Установить штатив с теодолитом на расстоянии 10-25 метров от измеряемой образующей таким образом, чтобы визирная ось теодолита проходила по касательной к этой образующей;
2. Вращением винтов триггера привести ось вращения теодолита в вертикальное положение по цилиндрическому уровню при алидаде;
3. Рядом с измеряемой образующей резервуара установить нивелирную рейку и с помощью нитяного дальномера теодолита измерить расстояние «Р» от теодолита до рейки;
4. Закрепить на образующей резервуара линейку с магнитным держателем таким образом, чтобы она находилась ниже сечения, в котором проводилось измерение длины окружности перво-

го пояса резервуара;

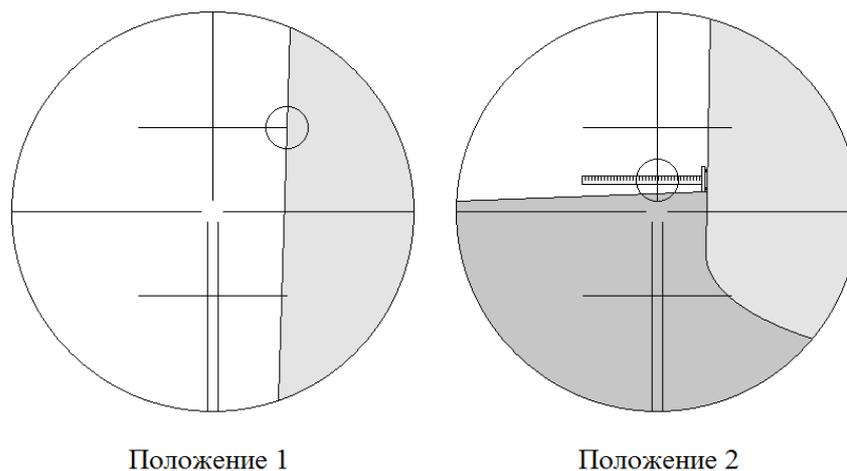


Рисунок 4. Поле зрения теодолита при измерении отклонения образующей резервуара от вертикали

5. Навести теодолит на измеряемую точку образующей так, чтобы конец одного из дальних штрихов соприкасался с видимым изображением образующей резервуара, как это показано на рисунке 4 сначала в сечении на высоте $\frac{3}{4}$ от высоты первого пояса (сечение измерения длины окружности первого пояса);

6. Вращением трубы, навести теодолит на закрепленную на резервуаре линейку с магнитным держателем, как это показано на рисунке 4 и снять отсчет a_1 по линейке в месте ее пересечения одинарным вертикальным штрихом сетки нитей теодолита и записать его в журнал измерений;

7. Повторить действия 5 и 6 для всех остальных точек образующей резервуара по схеме «низ-середина-верх» каждого пояса.

8. Рекомендуется перед началом измерений проверить ровность образующей резервуара. Для этого необходимо совместить одну из нитей биссектора с образующей в верхней части резервуара и, опуская зрительную трубу теодолита, непрерывно наблюдать в поле зрения трубы отклонение образующей от нити биссектора. Если отклонение не превышает половины ширины биссектора или наблюдается равномерное отклонение образующей от вертикали (образующая ровная, но наклонена), то допускается проводить измерения по трем точкам образующей (на высоте $\frac{3}{4}$ от высоты первого пояса, середина образующей и верх образующей). В данном случае для дальнейших расчетов используются вычисленные значения средних радиальных отклонений.

9. В верхней точке резервуара снять отсчет α_1 по вертикальному кругу теодолита с точностью до минут;

10. В точке крепления линейки к резервуару снять отсчет α_2 по вертикальному кругу теодолита с точностью до минут;

11. Вычислить угол измерения α как алгебраическую разность отсчетов α_2 и α_1 ;

12. Вычислить значение Δa влияния неравенства подставок теодолита на отсчет по линейке, используя формулу (9), приведенную в следующем разделе, где будет описан процесс оценки неопределенности измерений.

13. Операции 1-11 выполнить для всех размеченных образующих резервуара, внимательно следя при этом за положением пузырька установочного уровня теодолита и при необходимости подправляя его;

14. Из набора полученных по 11 значений вычислить среднее арифметическое значение влияния неравенства подставок теодолита на отсчет по линейке. Данное значение следует использовать

при оценке точности определения отклонения образующих резервуара от вертикали;

ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

Оценку неопределенности измерений следует проводить, исходя из тех соображений, что на ее значение имеет наибольшее влияние только составляющая, обусловленная точностью определения радиуса резервуара. В свою очередь на этот параметр оказывают влияние точность измерения длины окружности первого пояса резервуара, точность измерения отклонения образующих резервуара от вертикали, и точность измерения толщины стенки резервуара. Практика показывает, что составляющими неопределенности, обусловленными неточностью вычисления изменения радиусов поясов в результате влияния гидростатического давления, а так же влияния на значение объема резервуара степени его наклона пренебрежимо малы и их можно не учитывать при оценке неопределенности. Поэтому формула для расчета точности измерения радиуса резервуара для любого из поясов будет иметь вид:

$$\Delta R = \sqrt{\frac{\delta R_L^2 + (N-1)\delta R_T^2}{N} + \delta R_t^2}, \quad (1)$$

где δR_L – точность измерения радиуса первого пояса по измерениям длины окружности пояса при помощи рулетки;

δR_T – точность определения отклонения образующих резервуара от вертикали при измерении теодолитом;

δR_t — точность измерения толщины стенки резервуара толщиномером ультразвуковым;

N – количество измеренных поясов резервуара.

Точность измерения радиуса первого пояса по измерениям длины окружности пояса при помощи рулетки рассчитывается по формуле:

$$\delta R_L = R_{max} - R_{min}, \quad (2)$$

где R_{max} и R_{min} – максимальное и минимальное значение радиуса первого пояса, которые могут быть получены при измерении рулеткой длины его окружности и вычисляются по формулам:

$$R_{max} = \frac{L_{изм} + \Delta L}{2\pi}, \quad (3)$$

$$R_{min} = \frac{L_{изм} - \Delta L}{2\pi}, \quad (4)$$

где $L_{изм}$ — измеренное значение длины окружности первого пояса в мм;

ΔL — суммарная погрешность измерения длины окружности, рассчитываемое как алгебраическая сумма значения собственно погрешности измерения длины окружности ΔL_0 и значения погрешности рулетки, обусловленной ее классом точности $\Delta L_{КТ}$.

В соответствии с ГОСТ 8.570 погрешность длины окружности ΔL_0 регламентируется как 0,022% от измеренного ее значения. По ГОСТ 7502 значение погрешности рулетки, обусловленной ее классом точности $\Delta L_{КТ}$ рассчитывается по формуле:

$$\Delta L_{КТ} = 0,15 \text{ мм} + 0,15 L_{изм}, \quad (5)$$

С учетом (3) и (4) формула (2) примет следующий вид:

$$\delta R_L = \frac{\Delta L_0 + \Delta L_{KT}}{\pi} , \quad (6)$$

Точность определения отклонения образующих резервуара от вертикали при измерении теодолитом зависит от двух влияющих факторов, а именно от разрешающей способности трубы теодолита и от величины неравенства подставок теодолита.

Точность снятия отсчетов по линейке зависит от разрешающей способности трубы теодолита и расстояния от теодолита до линейки с магнитным держателем, закрепленной на образующей резервуара. Разрешающая способность трубы теодолита τ рассчитывается по формуле:

$$\tau = \frac{\omega}{\Gamma^x} , \quad (7)$$

где ω — разрешающая способность человеческого глаза, которая принимается равной 1' или же 60";

Γ^x — увеличение зрительной трубы теодолита.

Таким образом погрешность единичного отсчета по линейке при работе с теодолитом может быть рассчитана по формуле:

$$\Delta_{отсч} = tg \tau \cdot P , \quad (8)$$

где P — расстояние от теодолита до линейки в миллиметрах.

Влияние неравенства подставок теодолита на отсчет по линейке в соответствии с ГОСТ Р 8.876 описывается формулой:

$$\Delta a = \frac{i}{\rho} \cdot P \cdot tg \alpha , \quad (9)$$

где i — значение неравенства подставок теодолита, которое берется из протокола, прикладываемого к свидетельству (сертификату о калибровке) на теодолит;

ρ — значение угла 1 рад. в угловых секундах, $\rho = 206265''$;

P — расстояние от теодолита до линейки в миллиметрах;

α — вертикальный угол между направлениями на точку образующей и на линейку, закрепленную на резервуаре.

Окончательная формула для оценки точности определения отклонения образующих резервуара от вертикали при измерении теодолитом имеет следующий вид:

$$\delta R_T = \sqrt{\Delta_{отсч}^2 + \Delta a^2} , \quad (10)$$

Максимальное и минимальное значение объема резервуара, которые могут быть получены в результате неточности определения радиуса резервуара, вычисляются по формулам:

$$V_{max} = \pi \cdot (R_{изм} + \Delta R)^2 \cdot H , \quad (11)$$

$$V_{min} = \pi \cdot (R_{изм} - \Delta R)^2 \cdot H , \quad (12)$$

где $R_{изм}$ — значение радиуса резервуара, полученное из измерений;

H — высота резервуара.

Значение разности между максимальным и минимальным значениями объема резервуара с учетом (11) и (12) после упрощения можно записать в виде следующего выражения:

$$\Delta V = 4 \cdot \pi \cdot R_{изм} \cdot \Delta R \cdot H, \quad (13)$$

где H — высота резервуара.

Неопределенность измерений по типу В оценивается с учетом того, что к ней применяется равномерный закон распределения, по формуле:

$$u_V = \frac{\Delta V}{2\sqrt{3}}, \quad (14)$$

Значение расширенной неопределенности измерений оценивается по формуле:

$$U_V = k_0 \cdot u_V, \quad (15)$$

где k_0 — коэффициент охвата, который при $P = 0,95$ можно принять равным 1,65.

Выбор данного значения коэффициента охвата обусловлен тем, что если среди вкладов неопределенности имеется доминирующий (отличающийся не менее, чем в 3 раза от остальных), распределенный по равномерному закону, закон распределения выходной величины уже нельзя считать нормальным. В этом случае коэффициент охвата можно взять из таблицы 1.

Таблица 1 — Значения коэффициентов охвата для двух доминирующих равномерно распределенных вкладов неопределенности типа В при уровне доверия $P=0,95$

$U_{в2}/U_{в1}$	0-0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9-1,0
k_0	1,65	1,70	1,75	1,8	1,83	1,86	1,88	1,89	1,90

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ методов измерений геометрических параметров вертикальных резервуаров, предлагаемый в ГОСТ 8.570-2000 «ГСИ. Резервуары стальные вертикальные цилиндрические. Методика поверки», показывает, что методы эти малопригодны для практического применения, не отличаются высокой точностью, и абсолютно не учитывают возможность их реализации в реальных условиях, когда невозможно исключить влияния окружающей среды, такие как ветер и нагрев пустого резервуара.

Предлагаемый метод измерений радиальных отклонений позволяет устранить все недостатки и неудобства метода измерения радиальных отклонений образующих резервуара от вертикали с применением каретки. Применение теодолита при измерениях дает более точные результаты, а метод измерений менее трудоемок, а значит более производителен. В сравнении с методом, при котором применяется электронный тахеометр, применение оптического теодолита более дешево, а по точности эти два метода равноценны. Кроме того, описанный метод имеет еще одно явное преимущество перед классическим — его независимость от ветра, который имеет большое влияние на качество и возможность измерений при помощи каретки. Так же следует отметить еще одно существенное преимущество описанного метода. А именно возможность проведения наружных измерений отклонения образующих от вертикали у резервуаров с плавающим покрытием.

Априорная оценка неопределенности измерений объема резервуара номинальной вместимостью 2000 м³ с применением данного метода показала, что значение расширенной неопределенности измерений составило 0,08%, что в 2,5 раза лучше, чем регламентируется ГОСТ 8.570-2000 — 0,2% от общего объема.

Замена штанги с упорным угольником на теодолит и рулетку с грузом существенно снижает трудоемкость измерений, увеличивает их точность и исключает опасность травмирования исполнителей работ в случае падения штанги с угольником.

Эти методы измерений реализованы в МК 03-208-17 «Резервуары стальные цилиндрические вертикальные. Методика калибровки», утвержденной ФБУ «Новосибирский ЦСМ в 2017 году.

И наконец, определение объема мертвой полости резервуара проливным методом позволит исключить такой трудозатратный этап измерений, как нивелировка днища резервуара и повысить точность результатов измерений.

В заключение хотелось бы в очередной раз процитировать мудрое выражение, которое приписывают Суворову, Ломоносову, Чебышеву и многим другим великим людям. На самом деле неважно, кто из них произнес эти слова, так как все они могли их произнести. Важно лишь то, что слова эти как нельзя лучше передают цель и смысл любой науки, в том числе и метрологии, и никогда не потеряют своей актуальности:

«Практика без теории слепа. Теория без практики мертва».

ИСПОЛЬЗУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

ГОСТ 8.570-2000 ГСИ. Резервуары стальные вертикальные цилиндрические. Методика поверки

ГОСТ 427-75 Линейки измерительные металлические. Технические условия

ГОСТ 7502-98 Рулетки измерительные металлические. Технические условия

ГОСТ 10529-96 Теодолиты. Общие технические условия

ГОСТ 22268-76 Геодезия. Термины и определения

ГОСТ 34100.1-2017 Руководство ИСО/МЭК 98-1:2009 Неопределённость измерения. Часть 1. Введение в руководства по неопределённости измерения

ГОСТ 34100.3-2017 Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008 Неопределённость измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределённости измерений