

ИЗМЕРЕНИЕ ОБЪЕМА ЖИДКОСТИ В РЕЗЕРВУАРАХ ПРИ НАЛИЧИИ КРЕНА И ДИФФЕРЕНТА

В.Я. Фатеев

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: fateev@ipu.ru

Ключевые слова: объем жидкости, уровень, углы крена и дифферента, измерение, погрешность.

Аннотация: Предложен метод измерения объема жидкости (нефти, нефтепродуктов, сжиженного газа и т. д.) в различных резервуарах по значениям уровня жидкости в трех точках на поверхности жидкости. По априорным координатам этих точек и измеренным уровням с помощью соотношений аналитической геометрии определяются реальный уровень жидкости, соответствующий центру базовой поверхности днища резервуара. Затем по реальному уровню вычисляется объем жидкости для резервуаров правильных геометрических форм или по тарифовочным таблицам для резервуаров неправильных форм или имеющих внутри какие-либо конструктивные включения. Указанный метод может найти применение в нефтехранилищах, транспортных средствах (танкерах, бензовозах и т. п.), перевозящих жидкие продукты, а также при контроле объема топлива в баках летательных аппаратов.

1. Введение

Проблема точности, эффективности и надежности систем коммерческого и технологического объемно-массового учета нефтепродуктов и сжиженных газов в резервуарах (баках, цистернах, танках и т. п.) остро стоит перед разными предприятиями нефтегазовой отрасли. При этом об объеме жидкого продукта преимущественно судят по уровню этой жидкости, используя для определения объема математические формулы для резервуаров правильных геометрических форм. Для резервуаров других форм или имеющих конструктивные включения используют специальные тарифовочные таблицы, которые ставят в соответствие каждому текущему значению уровня значение объема жидкости в резервуаре [1, 2].

Для измерения уровня используют датчики, основанные на различных физических принципах (радиоволновые, радарные, емкостные, поплавковые, гидростатические, ультразвуковые и т. д.). Довольно часто применяется также непосредственное измерение уровня с помощью линеек (мерштоков) и рулеток [3]. Однако даже точное измерение уровня еще не гарантирует столь же точное определение количества жидкости, вследствие наличия методических погрешностей, к которым относятся погрешность ориентации датчика уровня в резервуаре и температурная погрешность.

Погрешность ориентации датчика возникает вследствие неточностей установки резервуара, монтажа датчика в нем, деформации несущих элементов транспортируемых резервуаров при их заполнении и опорожнении, неравномерной осадки фундаментов

стационарных резервуаров, наличии крена и дифферента танкеров и т. д.. Все это, в конечном счете, приводит к неравномерному распределению уровня вдоль продольной и поперечных осей резервуара, изменению трассы измерения уровня и появлению вследствие этого погрешности ориентации.

Цель настоящей работы – поиск и исследование нового метода определения объема жидкостей в резервуарах, свободного от погрешности ориентации.

2. Определение объема жидкости по уровню

2.1. Погрешность определения объема при использовании только одного уровнемера

Возникновение этой погрешности можно проиллюстрировать на примере горизонтальной цистерны с радиусом R и длиной L (рис. 1). Полагаем, что к этой цистерне жестко привязана прямоугольная система координат $OXYZ$. В исходном положении цистерна и базовая координатная плоскость OXY сориентированы горизонтально, а координатные плоскости OXZ и OYZ – вертикально. Уровнемер устанавливается параллельно оси OZ в плоскости OYZ и тогда измеряемый уровень равен реальному уровню h_0 и не зависит от координаты y , а реальный объем жидкости, заполняющей указанную цистерну до уровня h_0 рассчитывается по формуле

$$(1) \quad V = S_s L,$$

где S_s – площадь сегмента, образуемого сечением цистерны в плоскости OXZ в части, заполненной жидкостью.

Эта площадь рассчитывается как [4]:

$$(2) \quad S_s = R^2 \arccos((R - h_0)/R) - (R - h_0) \sqrt{2Rh_0 - h_0^2},$$

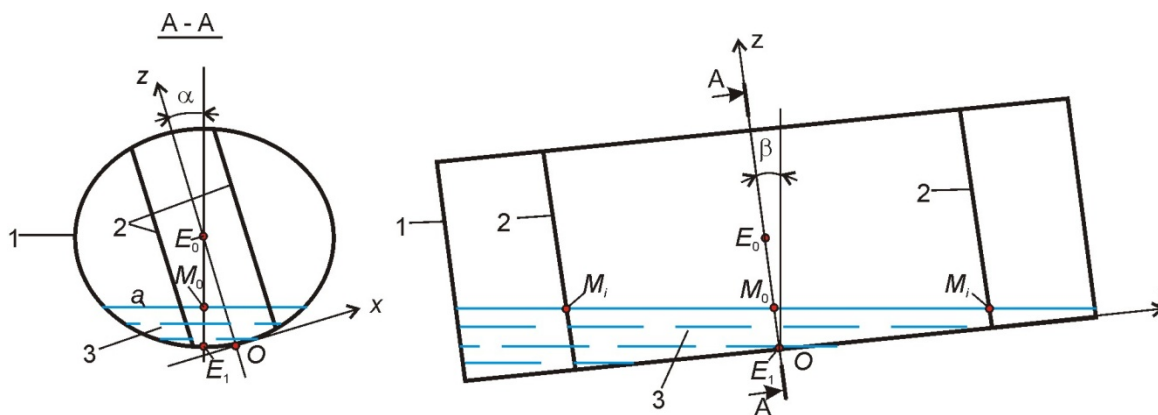


Рис. 1. Горизонтальная цистерна с установленными в ней датчиками уровня (1 – корпус цистерны; 2 – датчики уровня; 3 – контролируемая жидкость).

При наличии крена на угол α (цистерна наклонена в поперечной плоскости XOZ) и дифферента на угол β (цистерна наклонена в продольной плоскости YOZ) при постоянном объеме жидкости показания уровнемера изменятся и составят величину h_1 , которая определяется как

$$(3) \quad h_1 = R + (h_0 - R - y \tan \beta) / \cos \alpha,$$

где y – координата точки установки уровнемера по оси OY .

Методическую абсолютную Δ_V или приведенную относительную δ_V погрешность измерения объема жидкости, обусловленную наличием крена и дифферента в общем случае можно определить как

$$(4) \quad \Delta_V = V - V_0 \text{ или } \delta_V = (V - V_0)/V_{max},$$

где V_0 – реальный объем жидкости, соответствующий уровню h_0 при исходном положении цистерны; $V_{max} = \pi R^2 L$ – полный объем цистерны.

Объем V в (4) рассчитывается по формуле (1) для измеренного значения уровня h_1 .

Как видно из (3) значение h_1 , а также погрешностей Δ_V и δ_V кроме углов α и β зависит также и от места установки уровнемера. В частности, при установке уровнемера в центре цистерны при $y = 0$ показания уровнемера не зависят от дифферента.

В общем случае, чтобы исключить погрешность определения объема жидкости в горизонтальном цилиндрическом баке, обусловленную наличием крена и дифферента, необходимо измерять не только уровень, но и также углы крена и дифферента, которые можно измерить с помощью соответствующих датчиков инклинометров (кренометров). При наличии всех указанных данных вначале вычисляется уровень h_0 по формуле (3) и затем реальный объем жидкости V_0 с использованием (1) и (2).

2.2. Метод трех уровнемеров

Однако существует возможность получения действительных значений указанного объема в условиях крена и дифферента с помощью метода, основанного на использовании соотношений аналитической геометрии. Этот метод заключается в определении координат как минимум трех различных точек $M_i(x_i, y_i, z_i)$ ($i = \overline{1,3}$), находящихся на поверхности жидкости и не лежащих на одной прямой. При этом x_i и y_i это координаты установки уровнемеров на плоскости OXY (известны априори), а z_i измеряются с помощью уровнемеров. Далее для резервуаров с плоским, цилиндрическим или круглым дном, чтобы получить действительные значения объема жидкости необходимо вычислить реальный уровень h_0 , который определяется как расстояние от точки E_1 на дне резервуара до точки $M_0(x_0, y_0, z_0)$ (где $x_0 = y_0 = 0$ и $z_0 = h_0$), находящейся на поверхности жидкости, по линии, соединяющей точку E_1 с центром резервуара (точка E_0) и перпендикулярной к образующей дна резервуара. Для этого запишем уравнение плоскости [4], которая совпадает с зеркалом жидкости и в которой находятся точки M_i и M_0 :

$$(5) \quad Ax_0 + By_0 + Cz_0 + D = 0,$$

где $A = y_2(z_3 - z_1) + y_1(z_2 - z_3) + y_3(z_1 - z_2)$; $B = x_2(z_1 - z_3) + x_1(z_3 - z_2) + x_3(z_2 - z_1)$; $C = y_2(x_1 - x_3) + y_1(x_3 - x_2) + y_3(x_2 - x_1)$; $D = x_1y_3z_2 + x_3y_2z_1 + x_2y_1z_3 - x_1y_2z_3 - x_3y_1z_2 - x_2y_3z_1$.

Чтобы определить объем жидкости в резервуарах с плоским дном достаточно с помощью (5) вычислить координату z_0 , которая находится в месте пересечения оси OZ и зеркала жидкости. Тогда получим

$$(6) \quad z_0 = \frac{x_1y_2z_3 + x_2y_3z_1 + x_3y_2z_1 - x_1y_3z_2 - x_2y_1z_3 - x_3y_1z_2}{x_1y_2 + x_2y_3 + x_3y_1 - x_1y_3 - x_2y_1 - x_3y_2}.$$

Далее вычисляем объем V_0 по формуле (1).

Определение объема в резервуарах с цилиндрическим или круглым дном осуществляется в следующей последовательности. Вначале запишем уравнение прямой a , образованной в результате пересечения плоскости OYZ и зеркала жидкости, в виде

$$Ax + Cz + D = 0.$$

Затем определяем расстояние $d = E_0M_0$ от центра резервуара $E_0(0,0,R)$ до прямой a (рис. 1) по известной формуле [5]:

$$d = (Ax_e + Cz_e + D)/\sqrt{A^2 + C^2} = (CR + D)/\sqrt{A^2 + C^2},$$

где $x_e = 0$, $z_e = R$ – координаты точки E_0 , и тогда

$$(7) \quad h_0 = R - d,$$

С помощью предлагаемого метода при необходимости также можно рассчитать углы крена α и дифферента β по формулам:

$$\alpha = \arccos(C/\sqrt{A^2 + C^2}), \beta = \arccos(C/\sqrt{B^2 + C^2}).$$

Если в (7) подставить выражения для d , A , C и D , то для h_0 можно получить развернутое соотношение, которое получается наиболее простым если все датчики установлены по схеме равнобедренного треугольника в плоскости OXY симметрично относительно осей OX и OY . Тогда координаты этих датчиков можно записать как $M_1(0, -y, z_1)$, $M_2(-x, y, z_2)$ и $M_3(x, y, z_3)$. Подставляя эти координаты в (7) получим:

$$(8) \quad h_0 = R - x(4R - 2z_1 - z_2 - z_3)/(2\sqrt{(z_2 - z_3)^2 + 4x^2}).$$

2.3. Погрешности метода трех уровнемеров

Указанные погрешности возникают вследствие влияния следующих факторов:

- отклонение действительных размеров резервуаров от номинальных. В частности, при определении объема жидкости в цистернах использование формул, в которые входят параметры R и L приводит к систематической погрешности;
- датчики уровня, устанавливаемые в этих резервуарах, имеют собственную погрешность.

Точность измерения объема методом трех уровнемеров, возникающую вследствие влияния указанных факторов, можно определить по стандартной методике оценивания погрешностей косвенных измерений, в соответствии с которой среднее квадратическое отклонение результата косвенного измерения объема Δ_V вычисляется по известной формуле [5]

$$(9) \quad \Delta_V = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial F}{\partial a_i}\right)^2 \Delta_{a_i}^2},$$

где F – функция объема V от a_i ; $a_i = R, L, x_i, y_i, z_i$ – аргументы функции F ; m – количество этих аргументов; Δ_{a_i} – абсолютная погрешность измерения величины a_i .

Можно показать, что при симметричном расположении уровнемеров погрешность Δ_V имеет минимальное значение. Для этого случая с использованием (9) для цилиндрической цистерны была проведена оценка составляющих приведенной относительной погрешности δ_V определения объема, обусловленной влиянием отклонений как действительных размеров цистерны от номинальных, так и влиянием собственных погрешностей уровнемеров.

Результаты численного исследования предлагаемого и традиционного методов определения объема представлены в таблице 1, в которой приведены рассчитанные максимальные значения приведенных погрешностей измерения объема. В этой таблице для сравнения также представлены максимальные погрешности измерения объема традиционным методом при использовании только одного уровнемера, а также одного уровнемера совместно с инклинометром, измеряющим угол крена.

Таблица 1. Максимальные значения составляющих приведенной погрешности определения объема различными методами

Погрешность метода	Метод 3-х уровнемеров		Традиционный метод	
	Влияние погрешности уровнемеров	Влияние допусков	Один датчик уровня	Датчик уровня совместно с инклинометром
δ_V	$2,5 \cdot 10^{-4}$	0,02	0,023	$2,3 \cdot 10^{-3}$

Все значения погрешностей получены для $x = 0,5$ М, $y = 8$ М и размеров цистерны: $R = 1,5$ М и $L = 10$ М. Угол крена принимается $\alpha = 23^\circ$ (максимально

допустимое значение для танкеров). При этом отклонение по длине цистерны составляет $\delta_L \leq \pm 0,3\%$ от номинальной длины и отклонение внутреннего радиуса $\delta_R \leq \pm 1\%$ от номинального радиуса. Собственная абсолютная погрешность датчиков уровня была принята $\Delta_z = \pm 1$ мм, а инклинометра – $\Delta_\alpha = \pm 1^\circ$.

3. Заключение

Предложенный метод измерения объема позволяет реализовать совмещенные измерения, как количества жидкости в резервуарах, так и углов крена и дифферента этих резервуаров. Такие измерения особенно актуальны для транспортных средств, перевозящих жидкие продукты (танкеры, бензовозы и т. п.), а также при контроле объема топлива в баках летательных аппаратов. Проведенная оценка точности метода показала, что он существенно превосходит по точности традиционные методы измерения количества с помощью только одного уровнемера либо одного уровнемера, показания которого корректируются данными, полученными от инклинометров. Измерение углов крена и дифферента предлагаемым методом также осуществляется с более высокой точностью, чем у применяемых в настоящее время инклинометров.

Список литературы

1. Покровский А.Э. Эффективность и надежность передовых методов измерения уровня и массы нефти и нефтепродуктов в резервуарных парках // Нефтяное хозяйство. 2004. № 12. С. 116-117.
2. Тарасов В.В. Сравнение методов измерения массы нефти и нефтепродуктов в резервуарах // Е-SIO. 2019. № 12 (39). С. 157-164.
3. Государственная система обеспечения единства измерений. Масса нефти. Методика выполнения измерений в вертикальных резервуарах в системе магистрального нефтепроводного транспорта. Основные положения. М.: Стандартиформ, 2009.
4. Ильин В.А., Позняк Э.Г. Аналитическая геометрия: Учеб. Для вузов. 7-е изд., стер. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 224 с.
5. Рекомендация. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей. МИ 2083-90. М.: Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1991.