

ДАТЧИК ОБЪЕМА ЖИДКОСТЕЙ В СФЕРИЧЕСКИХ БАКАХ ПРИ ИХ НЕОПРЕДЕЛЕННОЙ ОРИЕНТАЦИИ В ПРОСТРАНСТВЕ

В.Я. Фатеев

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

Ключевые слова: уровень, объем, угловое положение, сферический бак, линейный чувствительный элемент, кольцевой чувствительный элемент, алгоритм, погрешность.

Аннотация: Предложен принцип построения и конструкция датчика объема жидких компонентов топлива, содержащихся, например, в сферических баках разгонных блоков. Этот датчик состоит из одного линейного и нескольких кольцевых чувствительных элементов, которые погружены в жидкость и обеспечивают преобразование глубины погружения в информативный сигнал. Проведена оценка составляющих общей погрешности датчика, обусловленных различными факторами: дискретностью конструкции датчика, разбросом геометрических размеров бака и чувствительных элементов, а также собственными погрешностями чувствительных элементов. Предложенный датчик можно использовать для измерения объема жидкости на объектах, характеризующихся неопределенным положением в пространстве (космические и летательные аппараты, морские суда).

1. Введение

Датчик объема жидкостей в сферических баках разрабатывался для измерения запасов жидких компонентов топлива (КТ) в баках разгонных блоков (РБ) космических аппаратов. РБ служат для выведения полезных грузов с опорной орбиты на целевую орбиту или направления их на отлетные и межпланетные траектории, а также для оптимизации энергозатрат на выведение космического аппарата [1-3]. С этой целью РБ могут выполнять один или несколько маневров, связанных с изменением скорости и направления полета, для чего периодически включается маршевый двигатель. Между такими включениями следуют продолжительные (до нескольких часов) участки пассивного полета по переходным орбитам или траекториям. Поскольку КТ в баках РБ на участках пассивного полета находятся в свободном состоянии, то за 55 с до запуска маршевого двигателя включаются двигатели стабилизации, ориентации и обеспечения запуска, с помощью которых происходит сепарация жидкой и газовой фаз КТ за счет продольной перегрузки и тем самым «поджатие» КТ к заборному устройству, что является необходимым условием включения маршевого двигателя. Другим условием является наличие достаточного количества КТ в зоне заборного устройства.

В настоящее время объем КТ в баках РБ определяется с помощью уровнемеров [4-6]. Однако такой способ определения объема гарантирует заданную точность только когда уровнемер расположен перпендикулярно зеркалу КТ. В процессе полета РБ угловое положение уровнемера по отношению к зеркалу КТ может изменяться и

поэтому для точного определения объема КТ необходимо знать также и это угловое положение.

В настоящей статье представлены результаты разработки датчика объема и углового положения КТ (далее датчик) в баках РБ, обеспечивающего точное измерение этих параметров независимо от положения КТ. Знание этих параметров необходимо для принятия решения о включении маршевого двигателя, а также для оптимизации функционирования системы управления расходом КТ и уменьшения его гарантийных запасов.

2. Датчик объема и углового положения КТ

2.1. Конструкция датчика

Конструктивно рассматриваемый датчик состоит из нескольких чувствительных элементов (ЧЭ) – одного линейного 1 и одного или более кольцевых 2 (рис. 1). Линейный ЧЭ устанавливается в баке 3 вдоль его центральной оси симметрии, проходящей через заборное отверстие 4. Кольцевые ЧЭ располагаются в плоскости, перпендикулярной оси симметрии бака или линейного ЧЭ.

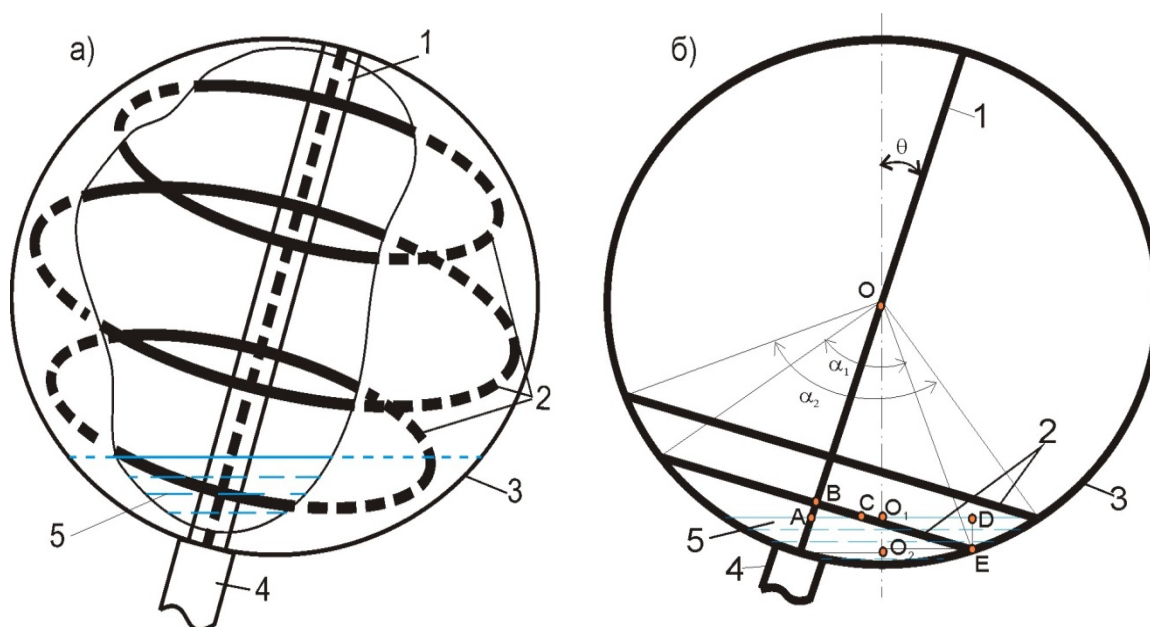


Рис. 1. Конструкция (а) и схематическое изображение (б) датчика объема и углового положения КТ: 1, 2 – соответственно линейный и кольцевые чувствительные элементы; 3 – корпус бака; 4 – заборное устройство; 5 – контролируемая жидкость.

Линейный ЧЭ непрерывно измеряет уровень КТ h_i в точке погружения. Так как один линейный ЧЭ не может обеспечить точное определение объема КТ V_f по величине h_i , то в состав датчика введены кольцевые ЧЭ, с помощью которых измеряется длина l_i ($i = \overline{1, I}$, где I – количество кольцевых чувствительных элементов) погруженной в жидкость части i -го кольцевого ЧЭ. Линейный ЧЭ может быть реализован по емкостному, тепловому или поплавковому принципу, а кольцевой ЧЭ – только по емкостному и тепловому. Весьма перспективной представляется реализация датчика в виде резонансной системы, в которой кольцевые ЧЭ представляют собой конденсаторы, которые образуются металлическими кольцами и корпусом бака. Линейный ЧЭ выполнен в виде коаксиального линейного конденсатора. К каждому

такому конденсатору подключается соответствующая индуктивность. Таким образом, все ЧЭ являются колебательными LC -контурными, каждый из которых имеет собственную резонансную частоту, что позволяет возбуждать все ЧЭ и снимать сигнал, содержащий информацию о резонансных частотах этих ЧЭ всего по одному (при использовании направленного ответвителя) или двум кабелям связи.

Величины h_l , l_i связаны уравнениями с действительным уровнем КТ h_a и угловым положением зеркала КТ θ . Вид этих уравнений зависит также и от формы баков. В разгонных блоках чаще всего используются сферические, цилиндрические со сферическими днищами или тороидальные баки. Ниже рассматриваются только сферические баки, хотя предложенный метод определения количества КТ можно применить и для баков других форм. Решая указанные уравнения можно получить значения h_a и θ и затем объема КТ V_f по формуле для объема шарового сегмента [7]:

$$(1) \quad V_f = \pi h_a^2 (3R_t - h_a) / 3,$$

где R_t – радиус сферического бака.

Достоинством предложенной конструкции датчика является также независимость показаний линейного и кольцевых ЧЭ от азимутального угла ориентации зеркала жидкости.

2.2. Алгоритмы обработки сигналов ЧЭ для различных режимов работы линейного и кольцевых ЧЭ

В зависимости от объема КТ и положения зеркала КТ линейный и кольцевые ЧЭ могут быть погружены в жидкость в различных сочетаниях, что обуславливает выбор соответствующего алгоритма определения параметров h_a и θ . К формальным признакам идентификации этих сочетаний относятся следующие показания ЧЭ:

а) $h_l > 0, 0 < l_i < l_{mi} - (l_{im} = 2\pi R_{ri}, R_{ri} - \text{полная длина и радиус } i\text{-го кольцевого ЧЭ})$ в жидкость погружены линейный и один или несколько кольцевых ЧЭ. Для этого случая, исходя из рассмотрения треугольников ABC и OO_1A (рис. 1, б), можно записать систему уравнений

$$(2) \quad \begin{cases} b_i - h_l = (R_{ri} - h_{si}) \operatorname{tg} \theta \\ (R_t - h_l) \cos \theta = R_t - h_a \end{cases}$$

где $h_{si} = CE = R_{ri}(1 - \cos(l_i/(2R_{ri})))$ – высота сегмента, образованного пересечением зеркала жидкости и плоскости i -го кольцевого ЧЭ; b_i – высота расположения плоскости i -го кольцевого ЧЭ в баке.

Из первого уравнения системы (2) находим θ как

$$(3) \quad \theta = \operatorname{arctg}((b_i - h_l)/(R_{ri} - h_{si})),$$

а из второго находим h_a :

$$(4) \quad h_a = R_t - (R_t - h_l) \cos \theta.$$

Формулы (3), (4) представляют собой выходные характеристики датчика по углу и уровню соответственно. Уровень h_a далее может быть пересчитан в объем V_f в соответствии с (1). Следует заметить, что при $h_l \rightarrow b_i$ и $h_{si} \rightarrow R_{ri}$ в выражении (3) возникает неопределенность $0/0$ и тогда погрешности определения угла θ и уровня h_a существенно увеличиваются. Избежать этой неопределенности можно путем выбора ЧЭ с более высокими индексами.

б) $h_l = 0, l_i > 0$ – погружены только кольцевые ЧЭ. Анализ треугольников CDE и OO_2E (рис. 1б) позволяет составить систему тригонометрических уравнений, справедливых для i -го и $i+1$ -го кольцевых ЧЭ:

$$(5) \quad \begin{cases} h_a = h_{si} \sin \theta + R_t (1 - \cos(\alpha_i/2 - \theta)) \\ h_a = h_{s_{i+1}} \sin \theta + R_t (1 - \cos(\alpha_{i+1}/2 - \theta)) \end{cases}$$

Решением этой системы уравнений относительно θ будет выражение:

$$(6) \quad \theta = \arctg \left(\frac{R_t(\cos(\alpha_i/2) - \cos(\alpha_{i+1}/2))}{h_{si} - h_{si+1} - R_t(\sin(\alpha_i/2) - \sin(\alpha_{i+1}/2))} \right),$$

где $\alpha_i = 2 \arcsin(R_{ri}/R_t)$ – угловой размер i -го кольцевого ЧЭ.

Уровень h_a далее определяется с помощью любого из уравнений системы (5).

с) $h_l > 0, l_i = [0, l_{mi}]$ – в жидкость погружен линейный ЧЭ и не погружены или полностью погружены кольцевые ЧЭ. Поскольку в этом случае нет данных о реальном значении θ , то принимается $h_a = h_l, \theta = 0$ и поэтому возникают методические погрешности измерения объёма жидкости и угла θ . Например, если жидкость находится между i -м и $i+1$ -м ЧЭ, то максимальные приведенные погрешности определения объема КТ δ_{Vm} и угла θ $\delta_{\theta m}$ будут составлять

$$(7) \quad \delta_{Vm} = 1/4 [2 - 3\cos((\alpha_i - \alpha_{i-1})/4) + \cos^3((\alpha_i - \alpha_{i-1})/4)],$$

$$\delta_{\theta m} = (\alpha_i - \alpha_{i-1})/(8\pi).$$

д) $h_l = 0, l_i > 0$ – погружен только один кольцевой ЧЭ. В этом случае можно грубо определить угол θ по номеру кольцевого ЧЭ как

$$\theta \approx \alpha_i/2,$$

а уровень h_a вычислить для $\theta \approx \alpha_i/2$, используя одно из уравнений (5), и тогда

$$h_a \approx h_{si} \sin(\alpha_i/2).$$

Формулы для погрешностей δ_{Vm} и $\delta_{\theta m}$ здесь будут иметь вид

$$\delta_{Vm} = 1/4 [2 - 3\cos((\alpha_{i+1} - \alpha_i)/4) + \cos^3((\alpha_{i+1} - \alpha_i)/4)]$$

$$\delta_{\theta m} = (\alpha_{i+1} - \alpha_i)/(16\pi).$$

е) $h_l = 0, l_i = 0$ – ЧЭ в этом случае не контактируют с жидкостью. Такая ситуация возможна когда КТ находится в зонах нечувствительности, которые находятся между линейным и 1-м кольцевым ЧЭ, 1-м и 2-м кольцевыми ЧЭ и т. д.. Размер этих зон зависит от величин α_i или b_i . Максимальные значения неизмеряемого уровня h_{im} и соответствующего ему максимального объема V_{im} для каждой i -ой зоны будут составлять

$$h_{im} = R_t \left(1 - \cos((\alpha_i - \alpha_{i-1})/4) \right),$$

$$V_{im} = \pi R_t^3 / 3 [2 - 3\cos((\alpha_i - \alpha_{i-1})/4) + \cos^3((\alpha_i - \alpha_{i-1})/4)].$$

и соответствующая им погрешность δ_{Vm} совпадает с погрешностью для пункта д) и определяется по формуле (7). Угол θ здесь вообще не измеряется во всем диапазоне изменения этого угла.

Для датчика, состоящего из одного линейного и четырёх кольцевых ЧЭ, были рассчитаны числовые значения погрешностей $\delta_{Vm}, \delta_{\theta m}$ в зависимости от положения КТ i для пунктов с) и д), а также объема V_{im} для пункта е), которые представлены в таблице. Кольцевые ЧЭ установлены в сферическом баке с радиусом $R_t = 2$ м и имеют следующие линейные и угловые размеры: $R_{ri} = [0,624; 1,054; 1,323; 1,52]$ м; $\alpha_i = [0,635; 1,11; 1,44; 1,73]$ рад; $b_i = [0,1; 0,3; 0,5; 0,7]$ м.

Таблица. Максимальные погрешности измерений объёма V_f и угла θ , а также объёма зон нечувствительности V_{im} для различных положений зеркала КТ.

Положение КТ, i	с) Линейный ЧЭ		д) Кольцевые ЧЭ		е) Зоны нечувствительности
	δ_{Vm}	$\delta_{\theta m}$	δ_{Vm}	$\delta_{\theta m}$	$V_{im}, \text{л}$
1	$1,2 \cdot 10^{-4}$	0,100	$1,2 \cdot 10^{-4}$	0,1	4,0
2	$8,0 \cdot 10^{-4}$	0,075	$3,0 \cdot 10^{-5}$	0,17	1,2
3	$7,2 \cdot 10^{-4}$	0,050	$9,0 \cdot 10^{-6}$	0,13	0,3
4	$6,9 \cdot 10^{-4}$	0,046	$5,0 \cdot 10^{-6}$	0,1	0,2

Из таблицы видно, что наиболее значимой является погрешность измерения угла, которая достигает максимума при работе только одного линейного или кольцевого ЧЭ. Однако значения V_{im} при которых возникает эта погрешность малы по сравнению с полным объемом бака $V_t = 33493$ л и поэтому в этом режиме погрешностями δ_{V_m} и δ_{θ_m} можно пренебречь. Это замечание справедливо также и для зон нечувствительности.

При работе датчика в режимах а) и б) основное влияние на погрешность датчика оказывают собственные погрешности ЧЭ. В этом случае оценку погрешностей датчика можно провести, используя известную формулу для погрешностей косвенных измерений:

$$(8) \quad \Delta_{V,\theta} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial F}{\partial a_i}\right)^2 \Delta_{a_i}^2},$$

где F – одна из функций (3), (4), (5) или (6); a_i – аргументы указанных функций, а именно, h_l и l_i ; Δ_{a_i} – абсолютная погрешность измерения величины a_i .

В частности, для приведенной погрешности ЧЭ равной $\pm 0,1$ % приведенная погрешность датчика по объему в соответствии с (8) не превышает $3,2 \cdot 10^{-3}$, а по углу – $2,2 \cdot 10^{-2}$.

Данные проведенных оценок погрешностей подтверждают перспективность предлагаемого принципа построения датчика объема и углового положения КТ.

Список литературы

1. Воробьев Е.В., Денисов О.Е., Кузнецов В.И. Проектирование транспортных средств специального назначения. М.: МАДИ, 2014. 96 с.
2. Суханов А.С., Евтифьев М.Д. Анализ развития космических разгонных блоков // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2011. № 7. С. 46-47.
3. Асюшкин В.А., Викуленков В.П., Ишин С.В. Итоги создания и начальных этапов эксплуатации межорбитальных космических буксиров типа «Фрегат» // Вестник ФГУП НПО имени С.А. Лавочкина. 2014. № 1. С. 3-9.
4. Мазуренко В.Б. Обзор применяемых методов измерения уровня жидкого топлива в баках нижних ступеней ракет-носителей // Системное проектирование и анализ характеристик аэрокосмической техники. 2013. Т. 16. С. 82-96.
5. Завадский В.К., Иванов В.П., Муранов А.А., Чадаев А.И. Повышение надежности и безопасности эксплуатации ракет-носителей и разгонных блоков на основе совершенствования алгоритмов обработки топливной измерительной информации // Датчики и системы. 2018. № 7. С. 20-26.
6. Гаврелюк О.П., Кирсанов В.Г. Гарантийные запасы топлива для ракет космического назначения // Космическая техника и технологии. № 3. 2015. С. 100-106.
7. Энциклопедия элементарной математики. Книга 5. Геометрия / Под ред. П.С. Александрова, А.И. Маркушевича, А.Я. Хинчина. М.: Наука, 1966. 624 с.