

**ФОРМИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ДАТЧИКОВ УРОВНЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
РАСХОДОВАНИЕМ ТОПЛИВА РН**

Система управления расходом топлива (СУРТ) является одной из подсистем управления ракетой – носителем (РН), обеспечивающая требуемые режимы работы двигательной установки (ДУ) с целью реализации задачи запуска ракеты – носителя. Основной функцией СУРТ является создание оптимального соотношения объемных расходов компонентов топлива на основе информации о рассогласованиях уровня компонентов топлива в баках, определяемых дискретно по времени полета [1]. Датчики уровня представляют собой трубу небольшого диаметра, сообщающуюся в нижней части с баковым объемом. Внутри трубы, дискретно по длине, устанавливаются чувствительные элементы, вырабатывающие электрический сигнал при прохождении уровня жидкости через датчик. Датчики уровня должны устанавливаться по продольной оси бака или, если это не возможно по условиям компоновки, то на минимально возможном расстоянии от продольной оси бака.

Чувствительные элементы располагаются так, что при одновременной регистрации факта прохождения уровня жидкости через соответствующие уровни в баках окислителя и горючего обеспечивается оптимальное соотношение массовых расходов компонентов. Однако существует целый ряд факторов (температура, погрешность заправки, колебания давления наддува, колебания тяги двигателя, точность изготовления бака, точность изготовления и установки датчика уровня), которые приводят к тому, что реальные процессы опорожнения баков практически всегда отличаются от номинальных. Это приводит к появлению рассогласования между срабатыванием соответствующих чувствительных элементов в баке окислителя и в баке горючего, которое должно устраняться работой СУРТ путем формирования управляющих сигналов на привод регулирования числа оборотов вала турбонасосного агрегата (ТНА) и на привод дросселя, регулирующего расход одного из компонентов топлива (рисунок 1).

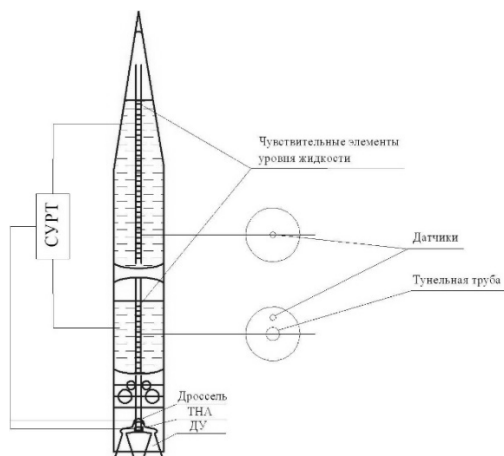


Рисунок 1 – Типичная схема СУРТ РН

Кроме данных возмущающих воздействий на работу СУРТ оказывают существенное влияние процессы, обусловленные колебательными движениями масс жидкости в баке и датчике уровня, недостаточное внимание к которым при проектировании и формировании конструкции как датчиков, так и устройств внутри бака приводит к многочисленным замечаниям на этапах лётно-конструкторских испытаний и штатной эксплуатации РН.

Здесь в первую очередь следует отметить вполне закономерное появление разгонных колебаний уровня жидкости в датчике в момент запуска двигателя, обусловленное разностью моментов времени начала движения жидкости в баке и в трубке датчика. Без учета или без устранения этих колебаний на верхних чувствительных точках возможно появление значительных возмущений, которые отрицательно повлияют на качество регулирования расхода топлива. Более подробно об условиях появления разгонных колебаний, параметрах этих колебаний, а также методике формирования конструктивных параметров гасителей этих колебаний рассмотрено в работе [2]. Внедрение такого типа гасителей колебаний в конструкцию датчиков уровня на последних модификациях РН типа «Союз» практически исключило замечания по отказам или двойным срабатываниям чувствительных элементов.

Кроме этого достаточно сложной является задача исключения или уменьшения до приемлемого уровня резонансных взаимодействий колебаний массы жидкости внутри датчика с колебаниями свободной поверхности жидкости в баке, обусловленными линейными и угловыми движениями корпуса РН во время полёта. Проблема состоит в том, что в случае появления больших амплитуд колебаний с нелинейными, и не плоскими формами свободной поверхности жидкости в баке, уровень жидкости внутри датчика может существенно отличаться от среднего уровня в баке. С целью уменьшения влияния

колебаний свободной поверхности жидкости в баке на колебания массы жидкости внутри трубы датчика, в нижней части датчика устанавливается специальный успокоитель состоящий из двух дополнительных труб меньшего диаметра, свободные концы которых располагаются на диаметрально противоположных местах у боковой поверхности бака, усредняющие отклонения свободной поверхности жидкости в баке от невозмущенного положения (рисунок 2). Однако это не исключает полностью возмущений на уровень в трубе датчика в случае появления нелинейных или осесимметричных форм колебаний свободной поверхности жидкости в баке. В этом случае наиболее радикальным способом уменьшения влияния возмущений от колебаний свободной поверхности жидкости в баке является разнесение областей собственных частот колебаний жидкости в баке и в тракте трубы датчика, включая трубы успокоителя. При реализации этого подхода необходима первоначальная оценка частот этих колебаний.

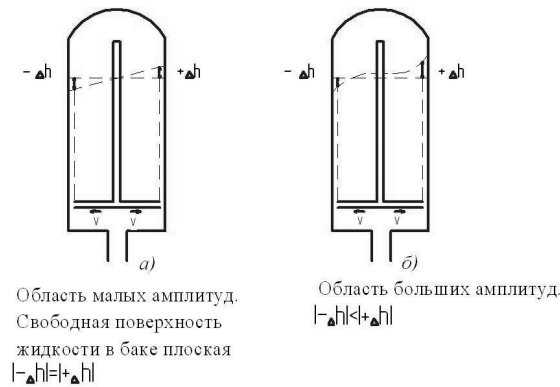


Рисунок 2 – Влияние формы колебаний свободной поверхности жидкости на точность измерения уровня жидкости в баке

В частности, нижняя граница собственной частоты колебаний свободной поверхности жидкости в баке определяется по формуле [3]

$$\omega^2 = \lambda g n_x, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения; n_x – перегрузка по продольной оси РН;

$$\lambda = \frac{\xi}{r(h)} \operatorname{th} \frac{\xi h}{r(h)}, \quad (2)$$

где $\xi = 1,8412$ – первый корень уравнения Бесселя первого рода, r – радиус свободной поверхности жидкости в баке, h – расстояние от свободной поверхности жидкости в баке до нижнего днища бака.

Собственная частота колебаний массы жидкости в датчике, которая также зависит от перегрузки в продольном направлении и определяется по следующей формуле [4]

$$\omega_d^2 = \frac{g n_x}{L_{\text{пр}}}, \quad (3)$$

где $L_{пр}$ – приведённая длина тракта датчика от уровня жидкости в трубе до выхода из успокоителя, которая определяется следующим образом:

$$L_{пр} = L_0 + S_0 \sum \frac{L_i}{S_i}, \quad (4)$$

где L_0 – длина смоченного участка трубы датчика, L_i – длина трубы успокоителя, i – количество труб успокоителя, S_0 – площадь поперечного сечения трубы датчика, S_i – площадь поперечного сечения трубы успокоителя.

В случае, когда по времени полёта и расхода жидкости из бака значения собственной частоты колебаний жидкости в баке и частота колебаний жидкости в датчике совпадают, то с целью исключения резонансных режимов следует скорректировать площадь поперечного сечения труб успокоителя и их длину таким образом, чтобы собственная частота колебаний массы жидкости в датчике не попадала в область частот колебаний жидкости в баке (рисунок 3).

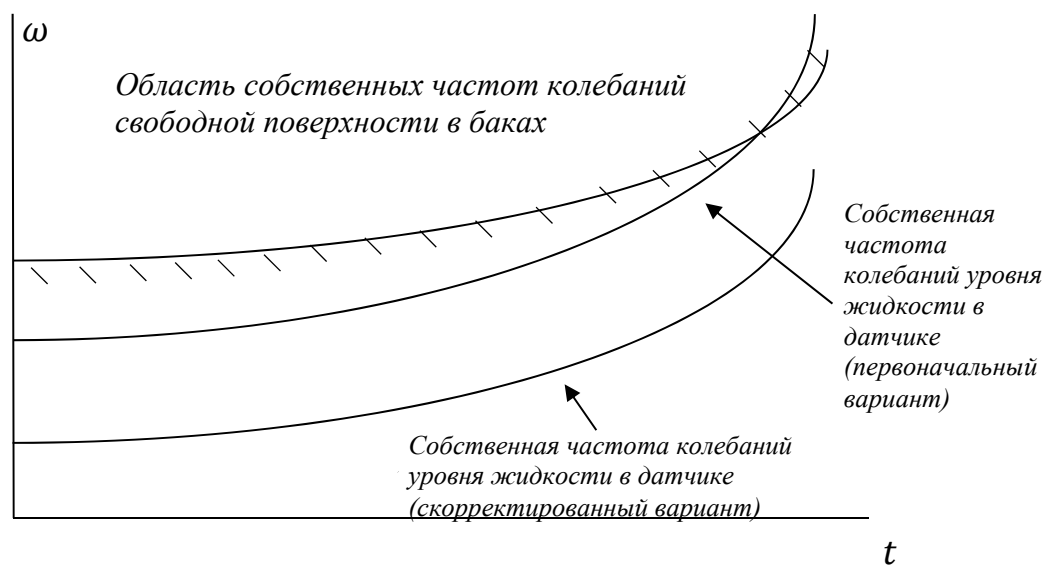


Рисунок 3 – Частоты колебаний жидкости в баке и в датчике уровня

При этом необходимо учитывать, что при уменьшении диаметра труб успокоителя и увеличении длины этих труб возрастает статическое отставание уровня в датчике по отношению к уровню в баке и допустимое отставание может быть принято на основе приемлемых характеристик точности работы СУРТ.

Здесь необходимо отметить, что, как правило, такая отстройка частот приводит к увеличению длины труб успокоителя больше, чем радиус бака и в этом случае необходимо путём соответствующей прокладки с изгибом труб успокоителя обеспечить компенсацию влияния массовых сил от поперечных ускорений, действующих в сечениях корпуса РН, где расположены успокоители. Возможные формы изгиба труб успокоителей

и их расположение относительно трубы датчика представлены на рисунке 4а и 4б. Общим требованием при выборе формы изгиба и направления прокладки труб успокоителя является требование равенства нулю интеграла

$$\int \cos(\varphi - \alpha) dl , \quad (5)$$

где φ – угол между плоскостью симметрии успокоителя и направлением вектора скорости течения жидкости в трубе на некотором элементарном отрезке трубы успокоителя (рисунок 4), α – угол между плоскостью симметрии успокоителя и направлением вектора бокового ускорения, l – длина трубы успокоителя.

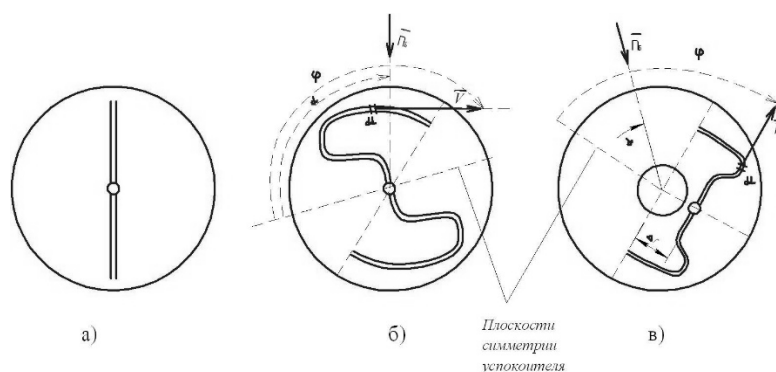


Рисунок 4 – Варианты расположения датчика уровня и труб успокоительного устройства

Данное требование фактически означает, что изменение давления от действия массовых сил на увеличение или уменьшение скорости течения жидкости вдоль трубы успокоителя должно быть уравновешено. В случае, если не удастся выбрать форму изгиба каждой отдельной трубы успокоителя, удовлетворяющей этому требованию, то следует выбирать форму изгиба и расположение труб успокоителя таким образом, чтобы это условие выполнялось на общей длине труб успокоителя. Однако когда в силу конструктивных особенностей внутрибаковой компоновки, установка трубы датчика по продольной оси бака не возможна, (см. рисунок 4в), то при действии бокового ускорения под углом близким к нулю или 180 градусов к плоскости симметрии успокоителя в датчике неизбежно возникают возмущения положения уровня пропорциональные расстоянию от места установки датчика до продольной оси бака. В этом случае датчик с успокоителем необходимо располагать так, чтобы наиболее вероятное направление действия боковой перегрузки было перпендикулярно плоскости симметрии успокоителя.

Таким образом, разработан подход к формированию основных геометрических характеристик уровнемера компонентов топлива для ракет-носителей. Он может быть использован для усовершенствования существующих и разработки новых уровнемеров для перспективных ракет-носителей.

Библиографический список

1. Петров, Б.Н. Бортовые терминальные системы управления / Б.Н. Петров, Ю.П. Портнов-Соколов, А.Я. Андриенко, В.П. Иванов. - М.: Машиностроение, 1983.
2. Давыдов, Е.И. Исследование продольных колебаний жидкости в датчиках уровня и выбор параметров гасителей колебаний / Е.И. Давыдов, Дмитриев В.В.
3. Микишев, Г.Н. Динамика твёрдого тела с полостями, частично заполненными жидкостью / Г.Н. Микишев, Б.И. Рабинович. – М.: Машиностроение, 1968.
4. Гимадиев, А.Г. Исследование погрешности уровнемера терминальной системы синхронного опорожнения баков ракеты-носителя / А.Г. Гимадиев, Д.А. Одинок, Д.М. Стадник // Известия самарского научного центра Российской академии наук, том 17, №2(4), 2015.