

УДК 621.45.046.8

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТИ УРОВНЕМЕРА ТЕРМИНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ СИНХРОННОГО ОПОРОЖНЕНИЯ БАКОВ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ

© 2015 А.Г. Гимадиев¹, Д.А. Одиноков², Д.М. Стадник¹

¹ Самарский государственный аэрокосмический университет им.акад. С.П. Королева
(национальный исследовательский университет)

² АО «РКЦ Прогресс»

Поступила в редакцию 17.04.2015

Разработана математическая модель движения жидкости в уровнемере с ёмкостными чувствительными элементами системы управления расходом топлива ракеты-носителя. На основе разработанной математической модели в программном пакете Delphi исследована погрешность показаний уровнемера при возмущающих воздействиях, возникающих в процессе полёта ракеты-носителя. Предложены рекомендации по снижению погрешности уровнемера, выполнение которых позволит увеличить точность показаний уровнемера и повысить надёжность функционирования системы управления расходом топлива.

Ключевые слова: *ракета-носитель, топливный бак, уровнемер, математическая модель, погрешность*

Управление режимами работы двигательной установки ракеты-носителя (РН) (по тяге и соотношению компонентов топлива) осуществляется системой управления расходом топлива (СУРТ), от точности которой зависит предельно допустимая масса полезного груза, выводимого на целевую орбиту. В общем случае в СУРТ можно выделить следующие взаимосвязанные подсистемы: регулирования соотношения компонентов топлива; внутриблочного регулирования опорожнения баков; межблочной синхронизации расходом топлива; регулирования опорожнения баков и синхронизации расхода окислителя; прогнозирования момента выработки топлива; прогнозирования кажущейся скорости в момент выработки топлива. От качества и точности функционирования СУРТ зависят энергетические свойства РН, её устойчивость и управляемость, параметры, характеризующие траекторию полёта и, следовательно, точность выведения полезного груза и фактические районы падения отделяемых частей. Столь существенный вклад СУРТ в полётные процессы РН предполагает наличие жёстких требований по точности и надёжности функционирования данной системы. Большое внимание в

части разработки алгоритмов СУРТ уделено в публикациях Института проблем управления РАН [1]-[3].

Работа СУРТ базируется на показаниях уровнемеров компонентов топлива, установленных в топливных баках. По данным [4] уровнемеры СУРТ могут быть ёмкостного, гидростатического и поплавкового типа в зависимости от метода измерения. Датчики на основе ёмкостного и поплавкового методов измерений являются дискретными. Показания уровнемера в полёте неизбежно сопровождаются погрешностью, обусловленной внешними воздействиями на топливный бак и конструкцией самого уровнемера. Очевидно, что чем меньше погрешность показаний уровнемера, тем надёжнее отработывают алгоритмы СУРТ. В статье разработана математическая модель движения жидкости в уровнемере ёмкостного типа, исследована его дополнительная (динамическая) погрешность и даны рекомендации по её снижению.

Конструкция и математическая модель уровнемера. Уровнемер устанавливается внутри топливного бака и представляет собой трубчатую конструкцию с расположенными по высоте ёмкостными чувствительными элементами (рис. 1 и 2). Такие датчики используются, в частности, на семействе РН «Союз».

Для снижения чувствительности датчика к колебаниям зеркала жидкости к выходу из вертикального участка подсоединены две трубки меньшего диаметра, развёрнутые по кругу днища бака. По мере выработки топлива из топливного бака имеет место отставание уровня жидкости в

Гимадиев Асгат Гатьятович, доктор технических наук, профессор кафедры автоматических систем энергетических установок. E-mail: gimadiev_ag@mail.ru.

Одиноков Денис Александрович, инженер-конструктор. E-mail: _deo_@rambler.ru.

Стадник Дмитрий Михайлович, младший научный сотрудник. E-mail: sdm-63@bk.ru

уровнемере относительно уровня жидкости в баке, обусловленное инерционностью жидкости в датчике и гидравлическим сопротивлением его конструкции.

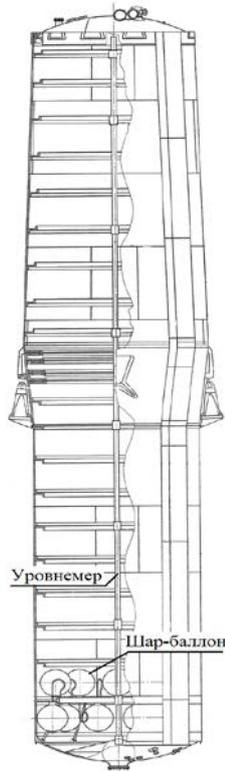


Рис. 1. Бак окислителя (вид сбоку)

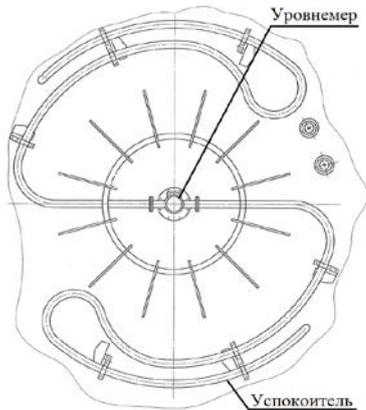


Рис. 2. Нижнее днище бака окислителя (вид сверху)

Для разработки математической модели движения жидкости в уровнемере была составлена его принципиальная схема (рис. 3). Газовая полость бака находится под давлением p_n . Уровень жидкости в баке 1 опускается по мере выработки топлива через расходную магистраль 4. Одновременно с этим происходит снижение уровня в мерной трубке 2 с чувствительными элементами 5. При выводе расчётных зависимостей принимается следующие допущения: движение жидкости в трубках датчика одномерно; трубки датчика уровня рассматриваются в сосредото-

ченных параметрах; гидравлические потери по концам трубок не учитываются. За положительное направление движения жидкости в трубках датчика принято движение в сторону движения жидкости.

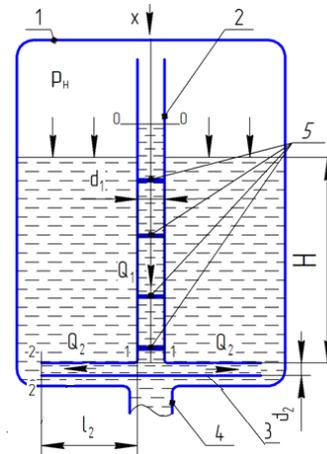


Рис. 3. Принципиальная схема уровнемера: 1 – бак компонента топлива; 2 – трубка уровнемера; 3 – демпфирующие трубки или успокоители; 4 – топливная магистраль; 5 – ёмкостные чувствительные элементы

Для описания движения жидкости справедливо уравнение Бернулли в трубке между сечениями n и $n+1$, правая часть которого дополнена инерционным напором [5]:

$$x_n + \frac{p_n}{\rho \cdot g \cdot n_x} + \alpha_n \frac{v_n^2}{2g} = x_{n+1} + \frac{p_{n+1}}{\rho \cdot g \cdot n_x} + \alpha_{n+1} \frac{v_{n+1}^2}{2g} + \sum_{i=1}^N h_i + h_{ин}, \quad (1)$$

где x – уровень жидкости в мерной трубке; p – гидростатическое давление; ρ – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения; n_x – перегрузка в процессе полёта РН; α – коэффициент кинетической энергии; v – скорость потока

жидкости; $\sum_{i=1}^N h_i$ – суммарная потеря напора на участке между рассматриваемыми сечениями; N – число учитываемых сопротивлений; $h_{ин}$ – инерционный напор.

Уровнемер разделим на два участка: первый – между сечениями 0-0 мерной трубки и сечением 1-1 на входе в успокоители; второй – между сечением 1-1 и сечением 2-2 на выходе из успокоителей. Учитывая малую скорость движения жидкостной пробки в мерной трубке, на основании равенства (1) можно записать для неё уравнение движения жидкости

$$x_1 + \frac{p_n}{\rho \cdot g \cdot n_x} = \frac{p_1}{\rho \cdot g \cdot n_x} + \sum_{i=1}^{N(x_1)} h_{1i}(x_1) + \frac{x_1}{g} \frac{d^2 x_1}{dt^2} \quad (2)$$

где $\sum_{i=1}^{N(x_1)} h_{i1}(x_1)$ - суммарное гидравлическое сопротивление, зависящее от уровня жидкости в мерной трубке. Представим его в виде суммы распределённого и местных сопротивлений

$$\sum_{i=1}^{N(x_1)} h_{i1}(x_1) = \left(\lambda_1 \frac{x_1}{d_1} + \sum_{i=1}^{N(x_1)} \zeta_{i1} \right) \frac{1}{2g} \left(\frac{dx_1}{dt} \right)^2 \quad (3)$$

здесь λ_1 - коэффициент гидравлического сопротивления по длине мерной трубки; d_1 - внутренний диаметр мерной трубки; ζ_{i1} - коэффициенты местных гидравлических сопротивлений.

Уравнение (1) для второго участка записывается аналогично:

$$\frac{p_1}{\rho \cdot g \cdot n_x} = \frac{p_2}{\rho \cdot g \cdot n_x} + \lambda_2 \frac{l_2}{2gd_2} \left(\frac{dx_2}{dt} \right)^2 + \frac{l_2}{g} \frac{d^2 x_2}{dt^2} \quad (4)$$

где $p_2 = p_n + \rho \cdot g \cdot n_x \cdot H$ - давление на выходе из трубок-успокоителей; H - уровень жидкости в баке; λ_2 - коэффициент гидравлического сопротивления по длине трубок-успокоителей; l_2 и d_2 - соответственно длина и диаметр успокоителя; dx_2/dt - скорость движения жидкостной пробки в трубках-успокоителях.

Из условия неразрывности потока жидкости в сечении 1-1 следует, что объёмный расход жидкости в мерной трубке $Q_1 = S_1 \cdot \frac{dx_1}{dt}$ равен сумме объёмных расходов жидкости $Q_2 = S_2 \cdot \frac{dx_2}{dt}$ через одинаковые по размерам успокоители, то есть $Q_1 = 2Q_2$ или

$$\frac{dx_2}{dt} = \frac{S_1}{2S_2} \frac{dx_1}{dt}, \quad \frac{d^2 x_2}{dt^2} = \frac{S_1}{2S_2} \frac{d^2 x_1}{dt^2} \quad (5)$$

где S_1 и S_2 - площади проходных сечений успокоителей. Дополнительным возмущающим фактором является увеличение осевой перегрузки n_x по мере выработки топлива, что соответствует ускорению РН на активном участке полёта.

После совместного решения уравнений (3)-(5) получим уравнение неустановившегося движения жидкости в уровнемере

$$\frac{1}{g} \left(x_1 + \frac{l_2 \cdot S_1}{2S_2} \right) \frac{d^2 x_1}{dt^2} + \frac{1}{2g} \left[\lambda_1 \frac{x_1}{d_1} + \sum_{i=1}^{N(x_1)} \zeta_{i1} + \lambda_2 \frac{l_2}{d_2} \left(\frac{S_1}{2S_2} \right)^2 \right] \left(\frac{dx_1}{dt} \right)^2 = x_1 - H \quad (6)$$

Как видно из формулы (6), в ней не присутствует перегрузка n_x , что связано с тем, что перегрузка одинаково действует на бак и

уровнемер. Однако, если перегрузка РН приводит к деформации корпуса топливных баков, то это скажется на точности уровнемера в виде дополнительного возмущающего фактора, наравне с расходом компонентов. В этом случае при задании уровня топлива в баке необходимо принять $H = \varphi[Q_{КТ}(t), n_x(t)]$, где $Q_{КТ}(t)$ - объёмный расход компонента топлива в процессе полёта РН.

Анализ функционирования уровнемера показывает, что непосредственно после начала выработки топлива из бака имеют место колебания уровня жидкости в мерной трубке, вызванные разностью скоростей опускания уровня жидкости в уровнемере и баке. Такие колебания называют разгонными. Разгонные колебания могут вносить существенную погрешность в показания верхних чувствительных элементов. Для снижения амплитуды таких колебаний уровнемер оснащают перфорационным гасителем колебаний. Перфорационный гаситель представляет собой один или несколько поясов отверстий, выполненных на верхнем участке мерной трубки уровнемера, вблизи начального уровня топлива (рис. 4). Перфорация обеспечивает перетекание жидкости мерной трубки уровнемера в бак и, тем самым, исключают в ней колебательный процесс. Расход жидкости $Q_{П}$ через перфорационные отверстия согласно [6] рассчитывается по формуле

$$Q_{П} = \mu_{П} \cdot S_{П}(x_{П}) \sqrt{2g|x_{П} - H|} \text{sign}(x_{П} - H) \quad (7)$$

где $\mu_{П}$ - коэффициент расхода; площадь отверстия; $x_{П}$ - уровень жидкости в мерной трубке в момент её течения через перфорации; $S_{П}(x_{П})$ - суммарная площадь перфораций, зависящая от уровня жидкости в мерной трубке.

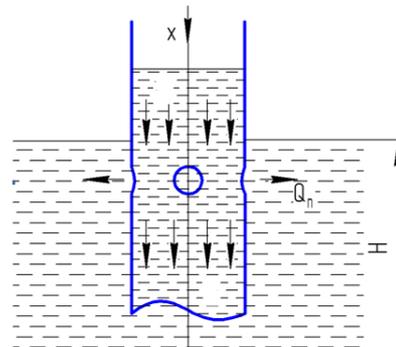


Рис. 4. Принципиальная схема перфорационного гасителя

Уровень жидкости в мерной трубке, в пределах которой происходит течение жидкости через перфорации, то есть до момента, когда

площадь перфорации $S_{II}(x_1)$ не станет равной нулю, определяется по зависимости

$$x_{II} = \int \left(\frac{dx_1}{dt} + \frac{Q_n}{S_1} \right) dt \quad (8)$$

При $S_{II}(x_1)=0$ установится значение $x_{II}=x_1$.

В результате совместного решения нелинейных дифференциальных уравнений (6)-(8) можно определить уровень жидкости в мерной трубке $x_{ур}=x_0 - x_{II}$, здесь x_0 – начальный уровень в мерной трубке, совпадающий с начальным уровнем топлива в баке H_0 .

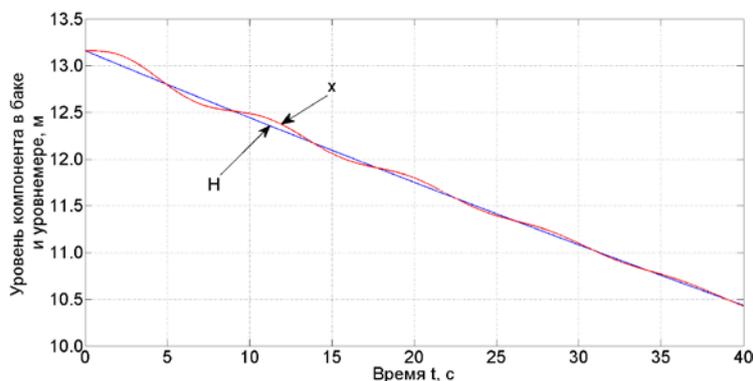


Рис. 5. Изменение уровня окислителя в топливном баке и уровнемере в течение первых 40 секунд полёта РН

Одной из базовых задач, стоящих при проектировании уровнемеров СУРТ, является минимизация случайной составляющей погрешности регистрируемых ими данных независимо от внешних возмущений, сопровождающих РН на активном участке полёта. Решение данной задачи состоит в рациональном выборе геометрических параметров уровнемера, успокоителей и, при необходимости, гасителя колебаний. Ввиду этого возникает необходимость в анализе их влияния на динамические характеристики системы, в частности, на статическую и колебательную составляющие отставания уровня компонента в уровнемере от уровня в топливном баке. Из рис. 6 видно, что при увеличении диаметра уровнемера происходит снижение колебательной составляющей за счёт увеличения площади проходного сечения трубопровода. При этом увеличивается статическая составляющая отставания уровня из-за увеличения объёма компонента в трубопроводе, который необходимо пропустить через успокоители с неизменным диаметром.

Чрезмерное уменьшение проходного сечения (рис. 7) успокоителей может привести к значительному росту статического отставания уровня компонента в трубопроводе, даже несмотря на снижение при этом колебательной со-

Исследование погрешности уровнемера.

В качестве примера рассчитана погрешность показаний датчика уровня в баке окислителя блока первой ступени РН «Союз-2-1в». В результате расчёта в программной среде Delphi получены параметры движения компонента в уровнемере при возмущении в виде расхода окислителя с учётом осевой перегрузки, конфигурации бака и решёток конденсаторов, установленных по высоте уровнемера. Анализ полученного графика, изображённого на рис. 5 показывает, что при изменении расхода компонента из бака происходит неустановившееся движение жидкости в уровнемере, сопровождающееся колебаниями уровня.

ставляющей. Гашение колебаний происходит из-за увеличения сопротивления успокоителей, но при этом увеличивается отставание из-за уменьшения их пропускной способности. Увеличение длины успокоителей приводит к росту амплитуды колебаний уровня в уровнемере при незначительном повышении стационарной составляющей отставания (рис. 8).

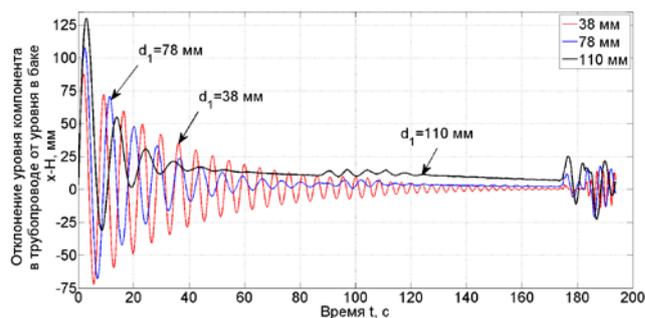


Рис. 6. Погрешность уровнемера бака окислителя в зависимости от его диаметра

Таким образом, реализация приведенной математической модели движения жидкости в уровнемере при использовании численных методов в программе Delphi позволяет проанализировать влияние основных геометрических параметров на динамические характеристики

системы с целью прогнозирования величины стационарной составляющей и гашения колебательной составляющей отставания уровня компонента в уровнемере от уровня в баке.

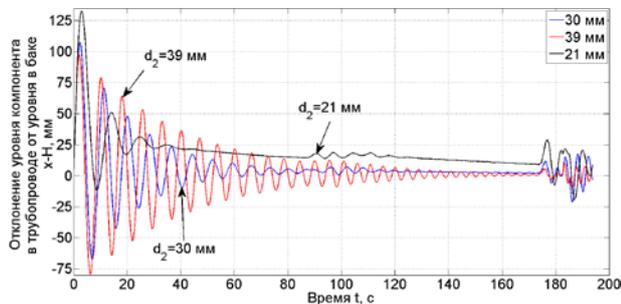


Рис. 7. Погрешность уровнемера бака окислителя в зависимости от диаметра успокоителей

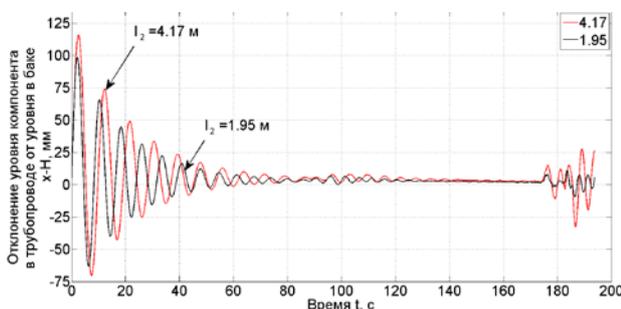


Рис. 8. Погрешность уровнемера бака окислителя в зависимости длины успокоителей

Выбор геометрических параметров уровнемеров всегда сопровождается рядом ограничений, связанных с габаритами и массой конструкции. Зачастую без применения дополнительных конструктивных мер невозможно достичь желаемого результата по точности измерений. Одной из таких мер является включение в состав уровнемера специального гасителя колебаний. Простейший гаситель представляет собой один или несколько поясов отверстий, выполненных в измерительном канале уровнемера вблизи начального уровня топлива (перфорационный гаситель). Настройка такого гасителя состоит в выборе количества поясов перфорации, их расположения и диаметров отверстий. На рис. 9 наглядно продемонстрировано, что включение перфорационного гасителя в состав уровнемера может весьма существенно снизить амплитуду колебаний уровня жидкости в нём непосредственно после начала выработки топлива из бака. Для данного расчётного случая параметры оптимального перфорационного гасителя были получены методом перебора с учётом разброса начального уровня жидкости в баке. Критерий оптимальности – минимизация амплитуды колебаний между первым и вторым чувствительными элементами уровнемера, которые срабатывают на 11 и 20 секундах соответственно, с

ограничениями по координате расположения поясов перфорации и диаметров отверстий.

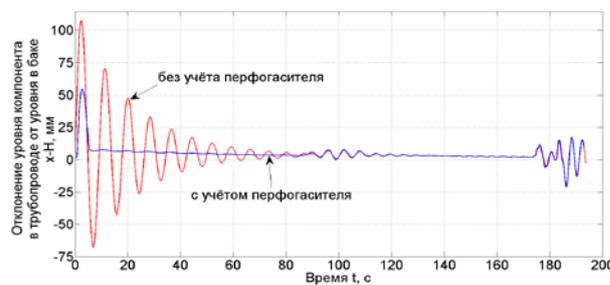


Рис. 9. Погрешность уровнемера бака окислителя при использовании перфорационного гасителя

Как и ожидалось, погрешность измерения есть суперпозиция стационарного отставания и колебательной составляющей, возникающей при изменении скорости опускания уровня в баке в случаях: в момент начала выработки топлива из бака: при переходе от расширяющейся части бака к цилиндрической (90 с); при прохождении зеркала жидкости на уровне шар-баллонов системы наддува вблизи нижнего днища (175-190 с). При этом стационарное отставание по мере выработки топлива падает с 6 до 1 мм, тогда как амплитуда колебательной составляющей в зоне расположения чувствительных элементов (после 11 с) без учёта перфорационного гасителя достигает 60 мм.

Выводы и рекомендации по снижению погрешности уровнемера

- погрешность ёмкостного уровнемера складывается из стационарной и динамической (колебательной) составляющей;
- стационарная и динамическая погрешности ёмкостного уровнемера обратно пропорциональны;
- колебательные процессы уровня жидкости в ёмкостном уровнемере могут вносить существенную (до 60 мм для рассмотренного уровнемера) погрешность измерения;
- для снижения погрешности ёмкостного уровнемера геометрическую расстановку чувствительных элементов по высоте мерной трубки следует выполнять таким образом, чтобы в момент их срабатывания отсутствовали колебательные процессы;
- если предыдущее условие выполнить по каким-либо причинам невозможно, то чувствительные элементы следует устанавливать таким образом, чтобы в момент его прохождения отклонение колебательной составляющей уровня жидкости в мерной трубке было близко к нулю, и, как следствие, увеличение количества чувствительных элементов необязательно приведёт к увеличению точности измерений;

- оптимально настроенный перфорационный гаситель позволяет успешно бороться с разгонными колебаниями жидкости в уровнемере, возникающими непосредственно после начала выработки топлива из бака, что способствует уменьшению погрешности показаний верхних датчиков уровня.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Андриенко, А.Я. Цифровая система управления расходом топлива ракет-носителей «Союз-2» и «Союз-СТ» / А.Я. Андриенко, Л.Н. Бельский, М.И. Заплатин и др. // Проблемы управления. 2012. № 5. С. 81-83.
2. Андриенко, А.Я. Вопросы теории и практики создания бортовых терминальных систем жидкостных ракет-носителей / А.Я. Андриенко, В.П. Иванов // Автоматика и телемеханика. 2013. № 3. С. 103–119.
3. Андриенко, А.Я. Совершенствование энергетических характеристик жидкостных ракет средствами автоматического управления / А.Я. Андриенко, В.П. Иванов // Ч. II. Бортовые системы управления расходом топлива. Проблемы управления. 2009. выпуск 1. С. 66-71.
4. Мазуренко, В.Б. Обзор применяемых методов измерения уровня жидкого топлива в баках нижних ступеней ракет-носителей // Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки. Том XVI. 2013. С. 82-96.
5. Некрасов, Б.Б. Гидравлика и ее применение на летательных аппаратах. – М.: Машиностроение, 1967. 368 с.
6. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1992. 672 с.

LIQUID QUANTITY INDICATOR DISCREPANCY ANALYSIS OF THE LAUNCH VEHICLE TERMINAL PROPELLANT FEED SYSTEM

© 2015 A.G. Gimadiev¹, D.A. Odinkov², D.M. Stadnik¹

¹ Samara State Aerospace University

² JSC "RCC" Progress"

The mathematical model of the fluid flow in the liquid content gage with the capacitive sensors of the launch vehicle fuel consumption control system was developed. The gage error of indication under disturbances arising during the flight of the launch vehicle (LV) was investigated on the basis of the mathematical model by the Delphi software. The recommendations to reduce the liquid content gage error were made and its implementation will increase the accuracy of the gage and improve the reliability of the fuel consumption control system operation.

Key words: *launch vehicle, fuel tank, liquid quantity indicator, mathematic model, discrepancy*

Asgat Gimadiev, Doctor of Technical Sciences, Professor
at the Department of Automatic Systems of Power Plants.

E-mail: gimadiev_ag@mail.ru.

Denis Odinkov, Engineer-Designer. E-mail:

deo@rambler.ru.

Dmitriy Stadnik, Minor Research Fellow. E-mail:

sdm-63@bk.ru