

М. И. Дьяченко, А. Н. Темнов

**ПРОБЛЕМЫ ДИНАМИКИ  
ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОПЛИВА  
В КРУПНОГАБАРИТНЫХ РАКЕТНО-  
КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ**

*Одним из возможных путей улучшения энергетических характеристик современных ракет-носителей тяжелого класса, является повышение весовой эффективности конструкции за счет перераспределения части топлива из баков одной ступени в другую и обеспечения более полной заправки к моменту отделения предшествующей ступени. Рассмотрена проблема влияния перераспределения топлива на динамику конструкции разрабатываемой ракеты.*

**E-mail: temnov@m1.sm.bmstu.ru**

**Ключевые слова:** перераспределение, пакетная схема, центральный блок, боковой блок, обобщенные координаты.

Прогресс в освоении космоса и постоянно возрастающая коммерческая деятельность требует от конструкторов современной космической индустрии создание более надежных ракет-носителей (РН), разгонных блоков и космических аппаратов (КА), т.е. средств выведения с максимальными энергомассовыми характеристиками.

При проектировании РН используют две основные схемы компоновки: тандемную и пакетную. Пакетная схема позволяет вывести на орбиты большую массу полезного груза, но уступает перед тандемной в энерго-массовом совершенстве ступеней.

Одним из возможных путей улучшения энергетических характеристик РН тяжелых классов (массы полезного груза, выводимого на опорную орбиту) является повышение весовой эффективности конструкции второй ступени за счет перераспределения части топлива из баков первой ступени и обеспечения ее полной заправки к моменту отделения боковых блоков.

При эксплуатации РН пакетной схемы есть большая вероятность, что уровни топлива в топливных баках будут различны. Разные уровни компонентов топлива могут иметь место в результате разброса расходов жидких компонентов топлива; из-за ошибок при заправке топливных баков, из-за разброса характеристик топливных установок; из-за невыхода на режим или отказа в процессе полета одного из двигателей двигательной установки (ДУ), или вследствие управления ракетой с помощью разности тяг ДУ.

Для обеспечения одновременного опускания уровней компонентов топлива могут быть применены различные схемы синхронизации уровней компонентов топлива в баках с использованием гидравлических связей между баками.

Необходимость выполнения операций по перераспределению компонентов топлива между баками КА возникает также при его автономном полете для обеспечения необходимой центровки, при проведении динамических операций (коррекции орбиты, ориентации, стабилизации) и особенно перед стыковкой с космической станцией. Задача обеспечения космической станции необходимым запасом топлива может быть решена путем доставки на орбиту и стыковку со станцией грузовых кораблей-танкеров. После стыковки, проведения необходимых проверок, подготовки баков модуля к приему топлива проводится перелив топлива в условиях невесомости из баков корабля-танкера в баки модулей станции за счет перепада давления в баках танкера и баках модуля станции.

**История вопроса.** На заре развития ракетной техники К.Э. Циолковский, предлагая принцип ступенчатости, рассмотрел переливание топлива из дополнительных модулей для достижения космической скорости. В 1934 г. он сделал открытие, которое действительно могло приблизить время выхода в космос. Открытие состояло в том, что “с помощью эскадры одинаковых ракет, путем переливания запасов взрыва (топлива), мы можем получить высшие скорости, которых одна ракета получить не может” [1]. По расчетам Циолковского космической скорости мог бы достигнуть последний ракетоплан из группы в 16 подобных.

В послевоенные годы советский конструктор ракетно-космической техники М.К. Тихонравов пишет: “При помощи комбинации из нескольких ракетопланов, в виде ли составной ракеты, или аппаратов, переливающих запасы топлива из одного в другой, можно достигнуть скорости 8 км/сек и сделаться спутником Земли”. В феврале 1948 г. Тихонравов выступает с докладом “Пути осуществления больших дальностей стрельбы ракетами”. Именно в этот период его симпатии, основанные на научном анализе, переходят от самолетной схемы к ракетам с переливанием топлива.

Конструкторская проработка идеи К.Э. Циолковского переливания топлива впервые была осуществлена при создании РН УР-700. При старте должны были включаться двигатели первой и второй ступеней, причем ЖРД второй ступени расходовали топливо из баков перелива, расположенных в передней части блоков первой ступени. К моменту отделения первой ступени баки второй ступени должны были быть полны. По одному из вариантов проекта все баки окислителя и горючего первой ступени были попарно соединены между собой (закольцованы) так же, как и баки второй ступени. Комплексная система управления расходованием топлива обеспечивала практически полную выработку его компонентов.

Практическая реализация идеи перераспределения топлива между баками впервые была осуществлена на КА “Союз-ТМ”. Комбиниро-

ванная ДУ с маршевым двигателем тягой 300 кгс в кардановом подвесе была объединена по питанию топливом с системой двигателей причаливания и ориентации (26 шт.) с использованием единых компонентов топлива в общих баках. Это позволяло перераспределять топливо между разными двигателями для его оптимального использования и обеспечивать гибкость при выполнении программы полета, особенно в нештатных ситуациях.

На РН сверхтяжелого класса “Энергия” также рассматривалась система перераспределения топлива для обеспечения возможности перелива компонентов из блока в блок при возникновении ситуации с выключением аварийного или предаварийного двигателя и расходом оставшегося компонента в форсированном режиме через остальные двигатели. Однако по результатам исследований система перераспределения не была принята из-за ряда проблем, связанных с динамикой системы в целом, большой подвижностью элементов конструкции, чрезмерной усложненностью пневмогидравлической схемы питания компонентами и, как следствие, падением надежности системы.

В 2000 г. было впервые проведено перераспределение компонентов топлива между баками низкого давления модуля “Заря” МКС с использованием упругих свойств сильфонных разделителей [2].

Компания SpaceX [3] намерена уже к концу 2012 г. осуществить запуск РН Falcon Heavy со стартового комплекса на базе ВВС США Ванденберг. Ракета-носитель способна выводить до 53 т полезного груза на низкую земную орбиту. По заявлению компании, РН Falcon Heavy станет *первой в истории ракетой с перекачкой топлива боковых блоков* (первой ступени) в центральный, что позволит сохранить больше топлива в центральном блоке после отделения израсходовавших топливо боковых блоков.

ФГУП ГКНЦ им. М.В. Хруничева, как следует из материалов [4], также проводит работы, связанные с повышением энерго-массовых характеристик РН “Ангара-А5” и эффективности целевого применения КРК “Ангара”, и предусматривает внедрение перераспределения топлива между баками боковых блоков и баком центрального блока.

**Способы реализации перераспределения топлива.** Существующие методы перераспределения компонентов топлива, как правило, реализуют технологические операции с использованием блока компрессоров избыточного давления подаваемых компонентов топлива, а также турбонасосных агрегатов (ТНА) модулей. По виду агрегата, создающего давление подачи, способы реализации перераспределения топлива можно разделить на безнасосные, насосные и комбинированные (нашли широкое применение в системах, работающих долгое время). Выравнивание уровней компонентов в баках можно осуществить двумя способами: активными (с помощью специальных насосов) и

пассивными (под действием разности гидравлических столбов компонентов в баках). В условиях невесомости перераспределение топлива между баками двигательной установки КА может быть осуществлено с использованием упругих свойств сильфонных разделителей.

**Особенности динамики РН пакетной компоновки.** Ракеты-носители пакетной схемы компоновки, как правило, имеют большое число баков с жидким топливом, расположенных в центральном и боковых модулях. Динамические схемы РН пакетной компоновки оказываются более сложными по сравнению с аналогичными ракетами тандемной схемы по следующим причинам:

а) взаимозависимость параметров движения в продольном направлении с параметрами, характеризующими динамику носителя в плоскостях тангажа, рысканья и крена;

б) наличие более плотного спектра в низкочастотной области вследствие влияния боковых модулей и межмодульных транспортных магистралей.

Математическая модель возмущенного движения РН на активном участке траектории управляется линеаризованной системой дифференциальных уравнений, которые могут быть разделены на несколько подгрупп. Одна подгруппа соответствует движению РН как абсолютно твердого тела с затвердевшим топливом, другая — движению с учетом подвижности жидкого топлива в абсолютно твердом теле. Третья подгруппа описывает движения, связанные с упругостью корпуса, четвертая содержит коэффициенты и переменные, характеризующие упругую подвеску поворотных двигателей. Последняя (пятая) подгруппа описывает колебания тяги ДУ.

Анализ уравнений возмущенного движения показывает, что при исследовании динамики РН пакетной схемы существенным моментом является взаимосвязь колебаний контура “корпус–двигатель” с плесканием топлива в баках боковых модулей, изгибными колебаниями корпуса и динамикой поворотных двигателей. Это, например, может означать, что изменение частоты топливных магистралей для обеспечения устойчивости на частотах продольных колебаний может вызвать неустойчивость колебаний жидкого топлива.

При рассмотрении вопросов динамики РН с сильной взаимной связью продольных и поперечных колебаний реализация технических решений, используемых в тандемной схеме, требует тщательного анализа фазовых и амплитудных соотношений между условиями устойчивости в плоскостях стабилизации и продольном направлении. Установка в расходную магистраль демпфера (гидроаккумулятора) может привести к увеличению динамического коэффициента усиления в плоскостях стабилизации и, как следствие, к невозможности с помощью автомата стабилизации справиться с дополнительным возмущением в совместном продольно-поперечном канале стабилизации.

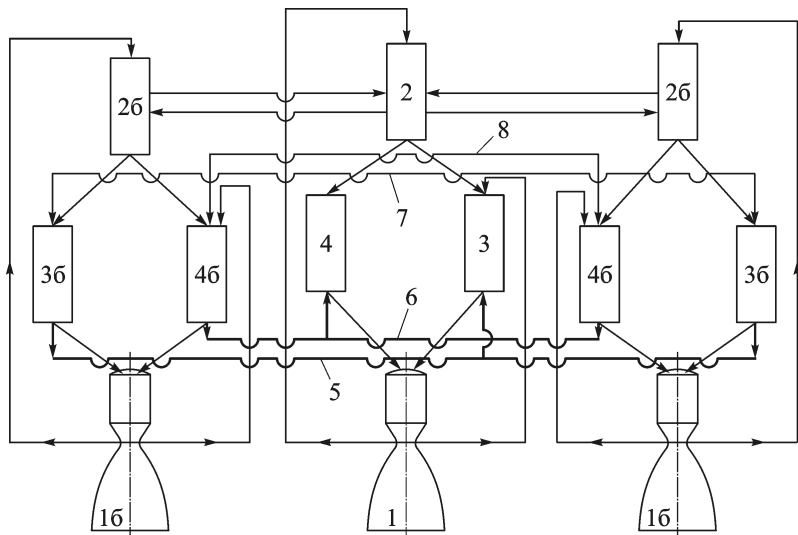


Рис. 1. Укрупненная блок-схема РН пакетной компоновки с двухкомпонентным ЖРД

**Проблемы динамики перераспределения топлива в РН пакетной схеме.** Для выяснения влияния конструктивных изменений (установка насосов перекачки, топливных магистралей перелива, дополнительных заборных устройств) на динамику РН рассмотрим сначала блок-схему РН пакетной компоновки с одним двухкомпонентным ЖРД в каждом блоке (рис. 1), где введены следующие обозначения: 1, 1б — ДУ центрального и боковых блоков (ЦБ и ББ); 2, 2б — корпус и модули (ЦБ и ББ); 3, 3б и 4, 4б — основные магистрали компонентов топлива (ЦБ и ББ); 5, 6 — магистрали закольцовки газовых подушек баков окислителя и горючего; 7, 8 — магистрали перераспределения и закольцовки окислителя и горючего. Стрелки на рис. 1 указывают на динамическое воздействие одного агрегата на другой. Из рис. 1 следует, что случайно возникшие колебания корпуса ЦБ могут вызвать колебания боковых модулей, затем колебания давления в топливных магистралях и, следовательно, колебания подачи топлива в камеры сгорания (ЦБ и ББ). В камерах сгорания возникнут колебания давления, которые передадутся на топливные магистрали, корпус и модули (ЦБ и ББ), взаимодействующие между собой через узлы крепления и магистрали перераспределения. В зависимости от соотношения параметров частотных характеристик возникших колебаний дальнейшее взаимодействие может стать слабее, усилиться или остаться на определенном уровне некоторое время.

Чтобы получить более наглядное представление о влиянии перераспределения топлива на динамику РН, введем ось  $Ox$ , совпадающую с продольной осью, с началом в вершине РН и рассмотрим

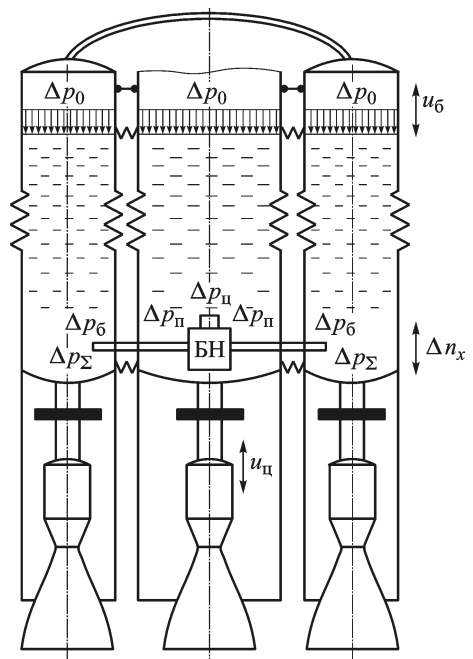
упрощенную модель продольных колебаний носителя пакетной схемы с однокомпонентным ЖРД (рис. 2). На рис. 2 введены обозначения:  $\Delta p_{п}$ ,  $\Delta p_{ц}$  — отклонения давлений на выходе из бустерного насоса (БН) перелива и в нише центрального блока от номинальных значений;  $\Delta p_{\Sigma}$ ,  $\Delta p_{б}$ ,  $\Delta p_0$  — отклонения давлений в нише бокового блока, на входе в магистраль перелива и на свободной поверхности топлива от номинальных значений;  $\Delta n_x$ ,  $u = u(x, t)$  — отклонение продольной перегрузки от расчетного значения и малое перемещение произвольного поперечного сечения РН в направлении оси  $Ox$  при продольных упругих колебаниях. Под номинальными значениями будем понимать значения, отвечающие программным или расчетным [5].

Уравнения движения составим для отклонений (возмущений) переменных величин от их значений в номинальном режиме. Промежуток времени, в течение которого изменяются отклонения, будем считать значительно больше периода собственных продольных колебаний РН. Подача топлива в камеру сгорания, сила тяги двигателя, ускорение всех элементов конструкции носителя и другие параметры в номинальном режиме принимаются постоянными.

Введем следующие допущения:

- проблему будем рассматривать в линейной постановке. Отклонения параметров от номинальных значений суть малые величины;
- отдельные агрегаты будем описывать упрощенными динамическими уравнениями.

Всю модель представим в виде последовательности соединенных между собой динамических звеньев, таких как корпус, упругое днище бака, расходные магистрали, магистрали перелива, насосы (рис. 3), и составим упрощенные динамические уравнения. На рис. 3 введены обозначения: 1, 1б — корпус ЦБ и модуль ББ; 2, 2б — топливные баки; 3, 3б — расходные магистрали; 4, 4б — сумматоры воздействия на поток топлива в расходных магистралях; 5, 5б — сосредоточенные упругости; 6, 6б — насосы подачи топлива; 7, 7б — напорные магистрали; 8, 8б и



**Рис. 2.** Упрощенная модель РН пакетной схемы с однокомпонентным ЖРД и с перераспределением топлива из ББ в ЦБ

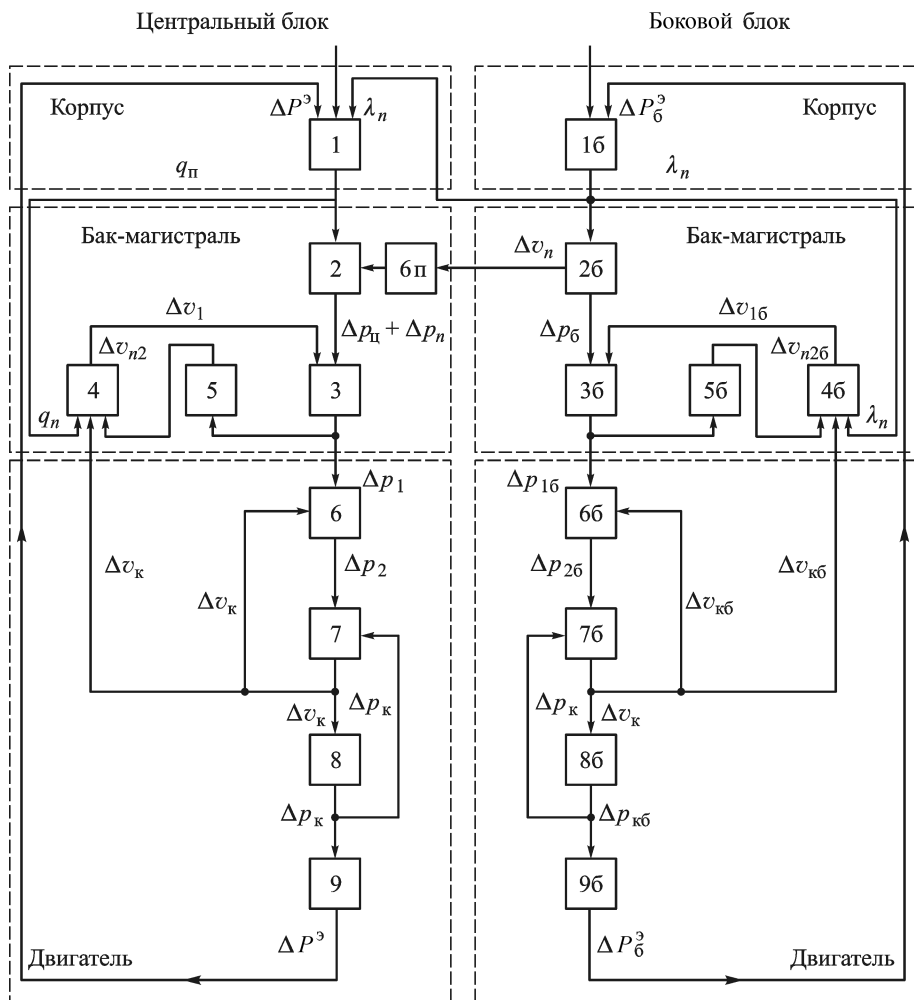


Рис. 3. Блок-схема упрощенной математической модели РН пакетной схемы с однокомпонентным ЖРД и с перераспределением топлива из ББ в ЦБ

9, 9б — форсуночные головки и камеры сгорания ЦБ и ББ; бп — насос и магистраль перераспределения топлива.

Корпус РН, состоящий из ЦБ и ББ, представим в виде системы упруго скрепленных между собой неоднородных стержней с распределенными параметрами. Смещения поперечных сечений РН относительно его центра масс запишем следующим образом:

$$u(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \{f_n^q(x)q_n(t), f_n^\lambda(x)\lambda_n(t)\}^T, \quad (1)$$

где  $f_n^q(x)$ ,  $f_n^\lambda(x)$ ,  $q_n(t)$ ,  $\lambda_n(t)$  — формы колебаний и обобщенные координаты стержней при собственных колебаниях по  $n$ -му тону. Центральный и боковой блоки совершают продольные колебания вследствие отклонения сил тяги двигателей  $P^q(t)$ ,  $P_6^q(t)$  от номинальных

значений. В зависимости от варианта перераспределения топлива боковые модули могут содержать избыточное число одного компонента топлива ( $\Delta P_6^3 = 0$ ) или быть оснащенными двигательной установкой. Предполагаем последний вариант ( $\Delta P_6^3 \neq 0$ ).

Форма колебаний  $f_n(x) = \{f_n^q(x), f_n^\lambda(x)\}^T$  определяется известными методами теории колебаний, а изменение по времени обобщенных координат  $q_n(t), \lambda_n(t)$  из уравнений

$$\ddot{q}_n + 2\xi_n \omega_n \dot{q}_n + \omega_n^2 q_n = \frac{1}{m_{\text{пр}}^q} Q_n^q(t); \quad (2)$$

$$\ddot{\lambda}_n + 2\xi_n \omega_n \dot{\lambda}_n + \omega_n^2 \lambda_n = \frac{1}{m_{\text{пр}}^\lambda} Q_n^\lambda(t). \quad (3)$$

Уравнения (2) и (3) записаны с использованием метода приведенных параметров. Здесь  $m_{\text{пр}}^q, m_{\text{пр}}^\lambda$  — приведенные массы ЦБ и ББ;  $\xi_n$  — относительный коэффициент затухания собственных колебаний;  $\omega_n$  — частота собственных колебаний;  $Q_n^q(t), Q_n^\lambda(t)$  — обобщенные силы.

Приведенные массы  $m_{\text{пр}}^q, m_{\text{пр}}^\lambda$  определяются из выражений

$$m_{\text{пр}}^q = \int_0^{L_{\text{ц}}} m_x^q (f_n^q)^2 dx, \quad m_{\text{пр}}^\lambda = \int_0^{L_6} m_x^\lambda (f_n^\lambda)^2 dx. \quad (4)$$

Система подачи топлива современных ЖРД состоит из большого числа сложных агрегатов. При упрощенном рассмотрении не будем учитывать колебательные процессы в системе наддува. При составлении уравнений для жидкого топлива, находящегося в баках и магистралях, будем считать жидкость несжимаемой и идеальной и не будем учитывать составляющие массовых сил тяжести, так как они намного меньше составляющих, возникающих за счет колебания корпуса как упругой системы. Уравнение возмущенного давления в нише ЦБ запишем в виде

$$\Delta p_6 = -\chi \rho H_{\text{ц}} \ddot{u}_{\text{ц}} + \Delta p_{\text{ц}}, \quad \ddot{u}_{\text{ц}} = \sum_{n=1}^{\infty} f_n^q(x_{\text{ц}}) \ddot{q}_n(t). \quad (5)$$

Уравнение возмущенного движения в расходной магистрали центрального блока

$$\Delta p_6 - \Delta p_1 = -\rho l_{\text{ц}} \Delta \dot{v}_m + \xi \rho v_m^* \Delta v_m. \quad (6)$$

Уравнение возмущенного движения в двигателе ЦБ будет

$$\Delta p_k = k_{\text{дв}} \Delta p_1, \quad k_{\text{дв}} = (k_m - Y_{\text{дв}}) / k_m, \quad (7)$$

где  $\Delta p_1, \Delta p_k$  — отклонения давлений на входе в насос ТНА и в камере сгорания ДУ ЦБ;  $k_m, k_{\text{дв}}, Y_{\text{дв}}$  — параметры ДУ.



Отклонение  $\Delta v_m$  скорости топлива в расходной магистрали ЦБ запишем в виде

$$\Delta v_m = \Delta v_n + \Delta v_{yn} + \Delta v_q, \quad (8)$$

где  $\Delta v_n$  — отклонение скорости жидкости через насос;  $\Delta v_{yn}$  — отклонение скорости топлива, обусловленное изменением объема сосредоточенной упругости (каверны, сиффона);  $\Delta v_q$  — отклонение скорости топлива, обусловленное колебаниями корпуса.

Аналогичные уравнения могут быть составлены для ББ:

$$\Delta p_\Sigma = -\chi \rho H_\delta \ddot{u}_\delta, \quad \ddot{u}_\delta = \sum_{n=1}^{\infty} f_n^\lambda(x_\delta) \ddot{\lambda}_n(t); \quad (9)$$

$$\Delta p_\Sigma - \Delta p_{16} = -\rho l_\delta \Delta \dot{V}_{m\delta} + \xi \rho v_{m\delta}^* \Delta v_{m\delta}; \quad (10)$$

$$\Delta p_{к6} = k_{дв} \Delta p_{16}, \quad k_{дв} = (k_m - Y_{дв})/k_m; \quad (11)$$

$$\Delta v_{m6} = \Delta v_{н6} + \Delta v_{yn6} + \Delta v_\lambda. \quad (12)$$

При составлении уравнений (5)–(12) предполагали, что  $\Delta p_1 = \Delta p_2$ , где  $\Delta p_2$  — изменение давления на выходе насоса ТНА.

Перейдем к составлению уравнений возмущенного движения в магистралях перераспределения.

Если в нише бокового блока, где расположены заборные устройства, давление изменится на  $\Delta p_\Sigma$ , то на входе в заборное устройства магистрали перераспределения будет выполняться уравнение

$$\Delta p_\Sigma - \Delta p_{(0)} = \xi \rho v_\Sigma^* \Delta v_\Sigma, \quad (13)$$

а в самой в магистрали перелива

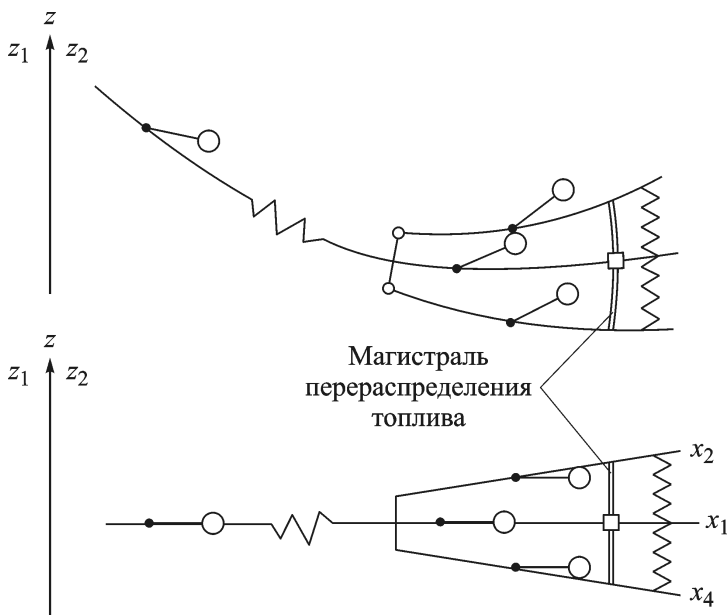
$$\Delta p_{(0)} - \Delta p_{1п} = l_{п} \rho \Delta \dot{v}_п. \quad (14)$$

Примем, что в бустерном насосе перелива, как и в основном насосе, будет выполняться условие  $\Delta p_{1п} = \Delta p_п$ , где  $\Delta p_п$  — изменение давления на выходе насоса перелива. Тогда на выходе из насоса перелива потери давления составят

$$\Delta p_п - \Delta p_ц = \xi \rho v_п^* \Delta v_п. \quad (15)$$

Выражения (13)–(15) будут являться дополнительными уравнениями, характеризующими влияние перераспределения топлива на динамику носителя, рассматриваемого в упрощенном варианте.

Приведенная на рис. 3 блок-схема, соответствующая рассмотренной упрощенной математической модели продольных колебаний РН с перераспределением топлива, и составленные уравнения упрощенной математической модели наглядно указывают на усиление взаимосвязи динамических процессов, происходящих в центральном и боковых блоках.



**Рис. 4.** Динамическая модель РН пакетной схемы с перераспределением топлива при упругих поперечных колебаниях ЦБ и ББ

Для РН пакетной компоновки при рассмотрении поперечных упругих колебаний также используется модель упругосвязанных неоднородных стержней с осцилляторами или маятниками [5], заменяющими воздействие жидкого топлива (рис. 4). На активном участке траектории при совершении программного разворота и в условиях случайно возникших поперечных колебаний взаимосвязь с продольными колебаниями для РН пакетной схемы может значительно возрасти через поворотные двигатели и повлиять на работу автомата стабилизации. Влияние системы перераспределения топлива в этой ситуации становится сложной проблемой и заслуживает серьезного отдельного внимания. Очевидно, что возникшие поперечные колебания ББ создадут дополнительное поле скоростей  $\Delta v_{\text{п}}$  в магистрали перелива и дополнительное давление  $\Delta p_{\text{п}}$  на входе в расходную магистраль ЦБ и будут породить продольные колебания РН.

При рассмотрении особенностей динамики РН пакетной компоновки отмечено, что одна из подгрупп линеаризованной системы дифференциальных уравнений математической модели возмущенного движения РН на активном участке является моделью абсолютно твердого тела с полостями, частично заполненными жидкостью. Исследование колебаний жидкости в твердом сосуде с учетом ее вытекания впервые было предпринято В.В. Кирилловым [6] и продолжено в работах [7]. В упомянутых работах рассматривались простые задачи для жидкости, занимающей часть цилиндрического бака, на дне которого ставилось кинематическое условие вытекания.

Установлено, что изменение уровня невозмущенной поверхности при вытекании жидкости в условиях постоянной интенсивности внешнего поля массовых сил приводит к эффекту демпфирования поверхностных волн идеальной жидкости, а повышение уровня — к экспоненциальному росту амплитуд колебаний.

Это означает, что при совершении программного разворота в наполняемом топливном баке центрального блока могут развиваться колебания жидкости с нарастающей амплитудой, способные привести к неустойчивости движения РН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Б и р ю к о в Ю. В. <http://readings.gmik.ru/lecture/2006-K-E-Tsiolkovskiyy-i-printsip-stupenchatosti-osuschestvleniya-kosmicheskikh-poletov>. ГМИК им. К.Э. Циолковского Секция “Исследование научного творчества К.Э. Циолковского”, 2006 г.
2. Г е р а с и м о в Н. М., К у д и н о в С. В., Б и з я е в Р. В. Перераспределение топлива в системе питания космического аппарата силами упругости сильфонных оболочек баков / Третий Междунар. аэрокосмич. конгресс IAC'2000: Сб. тез. – М., 23–27 августа 2000 г.
3. А ф а н а с ь е в М., Л е в ч е н к о Е. Широко шагает SpaceX... // Новости космонавтики. – 2011. – №. 6. – С. 48–49.
4. Б и р к и н И. А. Об эффективности перелива топлива между ракетными ступенями, Актуальные проблемы российской космонавтики // Материалы XXXV академических чтений по космонавтике. – М., январь 2011 г. – С. 42–43.
5. К о л е с н и к о в К. С. Динамика ракет. – М.: Машиностроение, 2003. – 520 с.
6. К и р и л л о в В. В. Исследование колебаний жидкости в неподвижном сосуде с учетом ее вытекания // Труды МФТИ. – 1960. – Вып. 5. – С. 19–25.
7. М о и с е е в Н. Н., П е т р о в А. А. Численные методы расчета собственных частот колебаний ограниченного объема жидкости. – М.: ВЦ АН СССР, 1966. – 270 с.

Статья поступила в редакцию 15.06.2012