

УДК: 532.5:629.7.014.2

Некоторые проблемы моделирования динамики на участках действия слабых гравитационных полей

А.В. Владимиров, А.Ю. Притыкин, Ю.Т. Шлуинский

Аннотация.

Статья посвящена решению проблем разработки математических моделей динамики жидких компонентов топлива в баках. Показано, что для разных этапов выведения космических аппаратов на орбиту необходимо применять специальные динамические модели поведения жидкого компонента. Особое внимание уделено моделированию криогенного топлива.

Ключевые слова: динамика топлива, перегрузки, ракета-носитель, космический аппарат, разгонный блок.

При использовании жидкостных двигателей на ракетах-носителях и разгонных блоках для выведения космических аппаратов на заданные орбиты большое значение имеет динамика топлива в баках этих изделий. Для решения практических задач динамики таких объектов в условиях возмущенного движения чрезвычайно важным является определение как характера движения самой жидкости в баках, так и возникающих при этом возмущающих сил и моментов, действующий на управляемый объект. Наличие на борту больших объемов жидкости со свободной поверхностью является существенным фактором, влияющим на устойчивость и управляемость изделия, на точность операций разделения ступеней, на точность выполнения требований по конечным параметрам отделения космического аппарата. Существенно различается поведение жидкости (и как следствие, ее влияние на объект управления) на разных участках циклограммы выведения: при наличии и отсутствии перегрузки. Для участков полета, на которых на топливо в баках воздействуют слабые гравитационные поля, не существует единого подхода в математическом описании динамики летательных аппаратов с полостями, частично заполненными топливом. Такое состояние связано с двумя основными причинами:

- сложностью подтверждения правильности тех или иных математических описаний из-за дороговизны воспроизведения условий невесомости и действия слабых гравитационных сил;

- многообразием факторов, определяющих поведение топлива в баках, включая геометрические формы и размеры баков и внутрибаковых устройств, начальные условия, характеристики система управления и управляющих двигателей ориентации и стабилизации.

Эти факторы практически для каждого случая выведения КА на орбиту различны, что существенно усложняет системный подход к решению задачи математического описания динамики топлива при воздействии микрогравитации.

При моделировании динамики полета различных РН и РБ применение той или иной математической модели движения компонентов топлива в баках определяется особенностями характерного участка полета:

- полет на активных участках выведения;
- разделение ступеней РН;
- полет РБ с КА в паузах между включениями маршевой двигательной установки;
- полет КА и РБ на участке их разделения и кратковременного относительного движения.

Формирование и анализ проблемной ситуации в каждом из указанных случаев с учетом сложившихся в отрасли условий позволяет наметить основные пути к моделированию динамики топлива в баках.

На активных участках выведения РН применяются маятниковые модели колебаний топлива в баках РН. При этом результаты многочисленных пусков РН хорошо согласуются с результатами теоретических расчетов и экспериментальных исследований.

На участке разделения ступеней ввиду сложности и неопределенности физических процессов и кратковременности самого процесса разделения применяются принципы физического моделирования при наземной экспериментальной отработке.

На пассивных участках полета РБ с КА применяются различные подходы для различных задач и, соответственно, различные математические модели, в том числе для

задач управления РБ с КА, для задач обеспечения функционирования пневмогидросистемы и некоторых других.

Разделение КА от переходной системы разгонного блока происходит практически в условиях невесомости, после разворота орбитального блока в направлении отделения КА и его стабилизации в этом положении.

Отделение от переходной системы разгонного блока является завершающей операцией при выведении космических аппаратов. При этом Заказчик требует выполнения жестких требований по параметрам движения КА после отделения. В подавляющем большинстве случаев отделение КА происходит в условиях полной невесомости или при действии весьма слабых гравитационных полей, при которых положение топлива в баках КА является в большой степени неопределенным.

Реальные массово-инерционные характеристики КА на участках отделения от РБ являются переменными по времени, что определено перемещениями топлива внутри баков под действием кратковременных перегрузок в области слабых гравитационных полей, включая невесомость. Экспериментальные и теоретические работы, направленные на создание адекватных моделей динамики топлива в баках КА, выполненные в России, США, Германии, Франции преимущественно решали задачи обеспечения работоспособности заборных устройств двигателей. Результатами являлись конечно-элементные модели, граничные условия для которых определяются, в общем случае, из дорогостоящих экспериментов.

Предлагаемая ниже математическая модель динамики топлива, свободно перемещающегося внутри бака в условиях действия переменных перегрузок и микрогравитации, основана на физической аналогии, отличной от маятниковых моделей, связанных со статическим расположением топлива.

Настоящая математическая модель была разработана для анализа отделения КА на самых ранних этапах проектирования и изготовления средств разделения КА и для адаптации КА к выведению на ракете-носителе с целью выполнения требований Заказчика к параметрам движения КА после его отделения. Требования Заказчика являются самыми разнообразными к угловым скоростям закрутки КА относительно продольной или поперечной оси КА. При этом баки КА заполнены компонентами топлива, и массовое соотношение топлива к полной массе КА составляет величину не менее 60%. Для

моделирования движения КА в процессе его отделения от РБ и сразу после отделения была разработана специальная математическая модель, учитывающая подвижность масс топлива в баках КА, и на основании этой математической модели было создано программное обеспечение для моделирования процессов разделения КА. Это программное обеспечение было использовано при расчетах динамики отделения различных КА. Расчеты позволили обеспечить выполнение требований Заказчика, которые записаны в специальных документах требований к интерфейсам (ДКИ). Последующие пуски всех КА показали, что параметры движения КА после их отделения от переходных систем разгонного блока не выходят за пределы расчетных значений, которые были получены на основании предлагаемой математической модели.

1. Принятые допущения

При составлении математической модели динамики КА с учетом колебаний топлива в баках приняты следующие допущения:

1. В баках КА отсутствуют какие-либо конструктивные элементы, препятствующие свободному перемещению топлива и газовых включений по всему объему баков.
2. В процессе полета КА после отделения на КА не действуют никакие возмущающие факторы.
3. Отделение КА производится с помощью системы пружинных толкателей, в общем случае с произвольным количеством толкателей.

В такой постановке решение вопроса о моделировании поведения КА после отделения сводилось к определению возмущающих факторов в процессе отделения, моделированию пространственного движения с учетом меняющихся из-за подвижности топлива в баках характеристик КА и начальных ошибок ориентации (углов и угловых скоростей) связки РБ+КА в момент времени, предшествующий началу действия пружинных толкателей.

2. Дифференциальные уравнения модели движения КА с учетом движения центров масс жидких компонентов в баках

$$I_g \frac{d\omega}{dt} + M_g C \times \frac{d^2 l}{dt^2} = T - \omega \times (I_g \omega) - \sum_i (r_i \times F_{CT,i} + 2m_i r_i \times (\omega \times \frac{dr_i}{dt}));$$

$$-M_g \mathbf{C} \times \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} + M_g \frac{d^2 \boldsymbol{\Gamma}}{dt^2} = \mathbf{F} - \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\omega} \times M_g \mathbf{C} - \sum_i (F_{CT,i} + 2\boldsymbol{\omega} \times (m_i \frac{d\alpha_i}{dt}));$$

$$\frac{d^2 \alpha_i}{dt^2} = -G_i \bar{A}_i + F_{CT,i} / m_i; \quad \bar{A}_i = \frac{d^2 \boldsymbol{\Gamma}}{dt^2} + \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} \times \mathbf{r}_{0i} + \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_{0i}).$$

$$M_g = M_s + \sum_i m_i (1 - G_i) \quad \text{- масса КА с жидкостью;}$$

$$M_g \mathbf{C} = M_s \mathbf{r}_s + \sum_i m_i (1 - G_i) \mathbf{r}_i \quad \text{- статический момент КА с жидкостью;}$$

$$I_g = I_s - \sum_i m_i (1 - G_i) S(\mathbf{r}_i) S(\mathbf{r}_i) \quad \text{- матрица инерции КА с жидкостью;}$$

$$S(\mathbf{r}_i) = S \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & z_i & -y_i \\ -z_i & 0 & x_i \\ y_i & -x_i & 0 \end{bmatrix} \quad G_i = \frac{2(1 - K_i)}{1 + (1 - K_i)} \quad \text{- масштабный множитель ускорения}$$

(функция уровня заполнения i -го бака K_i);

$$F_{CT,i} = -k_{pr} \bar{d}_i - k_{dem} V_{pi} - k_{shear} V_{ti} \quad \bar{d}_i = \alpha_i - d_0 \alpha_i / |\alpha_i|;$$

$$d_0 = R_i (1 - \sqrt[3]{1 - K_i}) (1 - K_i) / K_i$$

Коэффициенты, характеризующие взаимодействие топлива со стенками бака:

$$k_{pr} = 170229 \text{ Н/м}; \quad k_{dem} = 16256 \text{ Н/м/с}; \quad k_{shear} = 354,3 \text{ Н/м/с};$$

Условные обозначения:

$\boldsymbol{\omega}$ - вектор угловой скорости КА;

$\boldsymbol{\Gamma}$ - вектор, определяющий положение начала координат, связанного с корпусом КА, в инерциальной системе координат;

\mathbf{C} - вектор, определяющий положение центра масс КА;

T - сумма внешних моментов относительно выбранного начала координат;

F - сумма внешних сил, действующих на КА;

a_i - вектор, определяющий положение центра масс жидкости в i -ом баке относительно центра этого бака;

V_{pi}, V_{ti} - радиальная и тангенциальная составляющая скорости $\frac{da_i}{dt}$ центра масс жидкости в i -м баке.

M_s, I_s - масса и матрица инерции сухого КА (без жидких компонентов);

R_i - радиус i -го бака;

r_s - вектор, определяющий положение центра масс сухого КА относительно начала координат;

m_i - масса жидкости в i -ом баке;

r_{0i} - вектор, проведенный из начала координат в центр i -го бака;

r_i - вектор, определяющий положение центра масс жидкости в i -ом баке относительно начала координат;

\ddot{A}_i - вектор инерциального ускорения i -го бака;

K_i - коэффициент заполнения i -го бака, отношение объёма заправляемого компонента топлива к полному объему бака.

В результате интегрирования представленных уравнений получаются величины проекций угловой скорости КА на связанные оси ($\omega_x, \omega_y, \omega_z$), а также линейные координаты (x, y, z) положения в инерциальной системе координат некоторой точки, жестко связанной с корпусом КА и выбранной в качестве начала координат связанной системы. По требованию Заказчика необходимо обеспечивать выполнение требований по величинам угловых скоростей КА сразу после его отделения от переходной системы разгонного блока.

Традиционными вопросами, решение которых требуется на участке отделения космических аппаратов от разгонных блоков, помимо требований по обеспечению выведения КА в заданную точку пространства с требуемыми параметрами вектора состояния, является требование к безударности отделения КА от РБ, и к динамическим характеристикам КА, обеспечиваемым начальными условиями отделения и средствами

разделения. После разделения необходимо осуществить увод разгонного блока с орбиты, на которую он вывел космический аппарат. Естественное требование к манёвру увода РБ - исключение соударения РБ с КА как во время выполнения манёвра, так и, в дальнейшем, при переводе КА на целевую орбиту.

Применение криогенных разгонных блоков добавляет ещё одно условие, жизненно важное для успешного запуска КА на орбиту - обеспечение ограничения давления внутри топливных баков РБ с целью предотвращения их взрыва и соответствующих негативных последствий.

Комплексный анализ динамики движения криогенного РБ после отделения КА показывает, что величины сил и моментов, действующих на РБ, довольно сложно определить из-за ряда факторов:

1. Движение происходит под действием небольших и переменных сил, вызывающих малые перегрузки (менее 0.01g). При таких перегрузках динамика остатков топлива в баках трудно прогнозируема. Это, в свою очередь, осложняет описание таких термодинамических процессов как парообразование и конденсация криогенных компонентов на «горячих» стенках бака, а значит и расчёт температуры и давления в баке.

2. Величины воздействий на РБ от дренажей не точно определяются из-за малой статистики и сложности их верификации, кроме того, они зависят от динамики РБ.

Учитывая эти обстоятельства и необходимость гарантированного обеспечения выполнения всех требований пусков с криогенными блоками, был разработан комплексный подход к изучению физических процессов, построению математических моделей, их верификации и, в результате, формированию циклограммы заключительного этапа полёта криогенного блока.

Обеспечение увода и не превышения допустимого давления в баке - противоречивые задачи. Первая требует интенсивной закрутки, вторая, как показала практика, таковую не допускает.

Решение было найдено в разработке специальной последовательности включения дренажных сбросов на заключительном участке полёта, которая обеспечила безопасный увод КРБ от КА и приемлемое давление в баке водорода.

Сложность разработки такой циклограммы заключается в следующем:

- движение РБ неуправляемо;
- имеется неопределённость массово-инерционных характеристик РБ из-за свободного перемещения остатков компонентов топлива в баках;
- имеются разбросы на величину и направление векторов реактивных сил дренажей;
- имеются дренажи, тяга которых изменяется в зависимости от характера движения разгонного блока.

Математическая модель РБ после отделения КА

После отделения КА система управления разгонного блока отключается, и он переходит в режим неуправляемого движения. Воздействовать на динамику блока можно только тягой от дренажей, которые необходимо открыть по жёстко заданной заранее сформированной циклограмме.

Пространственное движение КРБ описывается системой уравнений, представленной ниже. Эти уравнения описывают движение объекта, как движение твёрдого тела с «материальной точкой», перемещающейся внутри объекта. Материальная точка имитирует движение «капли» водорода в баке, которая образуется в результате отрыва части компонента от нижнего днища в результате толчка при отделении полезной нагрузки.

Основное допущение, принятое при записи уравнений - движение остатков компонентов топлива в баках низкого давления не оказывает влияния на динамику разгонного блока.

$$\overline{W}_T = \frac{\overline{P}}{m}$$

$$J\overline{\varepsilon} + \overline{\omega} \times (J\overline{\omega}) = \overline{M}_T$$

$$\overline{W}_P = \overline{W}_T + \overline{\varepsilon} \times \overline{r}_{TP} + \overline{\omega} \times (\overline{\omega} \times \overline{r}_{TP})$$

$$\frac{d\overline{u}}{dt} = -(\overline{W}_P + \overline{\varepsilon} \times \overline{r} + \overline{\omega} \times (\overline{\omega} \times \overline{r}) + 2\overline{\omega} \times \overline{u}) + \frac{\overline{F}_A}{m_P}$$

$$\frac{d\overline{r}}{dt} = \overline{u}$$

$$\dot{\bar{V}} = A(\bar{a})\bar{W}_T$$

$$\dot{\bar{R}} = \bar{V}$$

Обозначения в уравнениях:

\bar{W}_T - линейное ускорение центра масс РБ в проекции на оси связанной СК РБ;

$\bar{\varepsilon}$ - угловое ускорение РБ в проекции на оси связанной СК;

$\bar{\omega}$ - угловая скорость РБ в проекции на оси связанной СК;

\bar{R} - радиус-вектор центра масс РБ относительно опорной СК;

\bar{V} - скорость центра масс РБ относительно опорной СК;

\bar{P} - вектор суммарной силы, приложенной к РБ;

\bar{M}_T - вектор суммарного момента относительно центра масс РБ;

P_f - модуль силы тяги дренажа f ;

\bar{n}_f - единичный вектор направления действия дренажа f в проекции на оси связанной СК;

\bar{r}_{TD_f} - радиус-вектор точки приложения силы тяги дренажа f относительно центра масс РБ в проекции на оси связанной СК;

\bar{W}_P - линейное ускорение нижнего полюса бака «Г» в проекции на оси связанной СК;

\bar{r} - радиус-вектор центра «капли» водорода относительно нижнего полюса бака «Г»;

\bar{u} - вектор относительной скорости центра «капли» водорода относительно нижнего полюса бака «Г»;

\bar{a} - столбец направляющих косинусов матрицы перехода от связанной СК к опорной СК;

$A(\bar{a})$ - матрица перехода от связанной СК к опорной СК;

\bar{F}_A - внешние силы, действующие на «каплю» водорода;

m_p - масса «капли» водорода.

Система замкнута кинематическими уравнениями для направляющих косинусов

$$\bar{a}_i = \bar{\omega} \times \bar{a}_i - k_i (\bar{a}_i^2 - 1) \bar{a}_i - k_3 (\bar{a}_1 \cdot \bar{a}_2) \bar{a}_{3-i}, \quad i=1,2, \quad ,$$

$$\bar{a}_3 = \bar{a}_1 \times \bar{a}_2$$

где

\bar{a}_i - i -й столбец матрицы направляющих косинусов;

k_i - коэффициенты стабилизации решения ($k_1 = k_2 = k_3 = 0.5$).

Суммарная сила и суммарный момент относительно центра масс КРБ вычисляется по формулам

$$P = \sum_{f=1}^8 n_f P_f \quad M_T = \sum_{f=1}^8 r_{TD_f} \times n_f P_f, \quad \text{где}$$

P_f - модуль силы тяги дренажа f ;

\bar{n}_f - вектор направления действия дренажа f в проекции на оси связанной СК;

\bar{r}_{TD_f} - радиус-вектор точки приложения силы тяги дренажа f относительно центра масс РБ в проекции на оси связанной СК.

Для эффективной работы над разработкой циклограммы требуется создать замкнутый расчётный алгоритм. Были разработаны алгоритмы, позволяющие провести весь цикл разработки циклограммы заключительного участка.

Разработанный программный комплекс позволяет проводить моделирование движения разгонного блока после отделения КА для одиночной траектории, а также проводить статистическое моделирование для подтверждения правильности принятых решений.

Результаты моделирования показывают, что при самых неблагоприятных траекториях движения разгонный блок заходит в полупространство перед КА на дистанции более 300м,

где эта дистанция продолжает увеличиваться. Давление в баке водород не превышает 2,4 атм., что существенно ниже предельно допустимого давления.

Разработанная циклограмма была применена при пуске последующих разгонных блоков.

Анализ движения КРБ после отделения КА по телеметрической информации показал, что блок двигался на безопасном расстоянии от КА.

Выводы

1. Рассмотрена задача обеспечения выполнения совокупности требований, предъявляемых к заключительной фазе выведения КА на орбиту криогенными разгонными блоками.

2. Разработана методика моделирования динамических процессов и формирования требуемой совокупности воздействий на криогенный разгонный блок после его отделения от КА.

3. Эффективность методики подтверждена численными расчётами и успешным выведением криогенным блоком 12КРБ космических аппаратов на орбиту.

Таким образом, в заключение можно констатировать, что для решения задачи корректного формирования и верификации математических моделей учета влияния движения компонентов топлива в баках КА и РБ необходимо: - обеспечивать некоторые конструктивные ограничения движения компонентов топлива внутри бака;

- формировать циклограмму полета РБ таким образом, чтобы обеспечивать взрывобезопасность его движения.

Список литературы

1. Колесников К.С. Динамика ракет. – М: Машиностроение, 1980.
2. Микишев Г.Н., Рабинович Б.И. Динамика твердого тела с полостями, частично заполненными жидкостью. – М: Машиностроение, 1968.
3. Рабинович Б.И. Введение в динамику ракет-носителей космических аппаратов. – М: Машиностроение, 1983.

4. Владимиров А.В., Шлуинский Ю.Т. Имитационное моделирование динамики процессов разделения при лабораторно-стендовой отработке изделий ракетно-космической техники. –М: Издательство МАИ, 1999.

5. Микишев Г.Н. Экспериментальные методы в динамике космических аппаратов. –М: Москва, «Машиностроение», 1978 г.

6. Альбрехт А.В., Бизяев Р.В., Владимиров А.В., Баталин Н.Н., Пущенко Н.Н. Информационная модель сопровождения лабораторно-стендовой отработки изделий РКТ. –Общероссийский научно-технический журнал «Полет» , 2004, №1, Стр. 47-54.

Сведения об авторах:

Владимиров Александр Владимирович, профессор, начальник отделения КБ «Салют» ГКНПЦ им. М.В. Хруничева, д.т.н., тел.:8 916 256 47 18.

Притыкин Андрей Юрьевич, заместитель начальника отдела КБ «Салют» ГКНПЦ им. М.В. Хруничев, тел.:8 916 188 81 69.

Шлуинский Юрий Томашевич, начальник отдела КБ «Салют» ГКНПЦ им. М.В. Хруничева, к.т.н., тел.:8 906 779 13 02.