

В. В. ПИЛИПЕНКО, Н. И. ДОВГОТЬКО, О. В. ПИЛИПЕНКО, А. Д. НИКОЛАЕВ, В. А. ПИРОГ, С. И. ДОЛГОПОЛОВ, В. Ф. ХОДОРЕНКО, Н. В. ХОРЯК, И. Д. БАШЛИЙ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ ПРОДОЛЬНЫХ ВИБРОУСКОРЕНИЙ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРИ ЕГО ВЫВЕДЕНИИ НА РАБОЧУЮ ОРБИТУ ЖИДКОСТНОЙ РАКЕТОЙ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ «ЦИКЛОН-4»

Приведены результаты теоретического прогноза продольной устойчивости ракеты космического назначения «Циклон-4» и продольных виброускорений космического аппарата на активном участке траектории полета ракеты, выполненного с учетом изменений конструкций третьей ступени и других элементов ракеты после этапа эскизного проектирования.

Приведено результати теоретичного прогнозу поздовжньої стійкості ракети космічного призначення «Циклон-4» та поздовжніх віброприскорень космічного апарата на активній ділянці траєкторії польоту ракети, що виконаний з урахуванням змін конструкцій третього ступеня та інших елементів ракети після етапу ескізного проектування.

Presented are the results of a mathematical simulation of free longitudinal oscillations of structure of a three-staged liquid rocket which will be used for construction of a nonlinear mathematical model of closed dynamic system of the liquid propulsion system and the rocket body and for a theoretical prediction of the amplitudes of rocket longitudinal oscillations. The calculation dependencies of parameters of prevailing tones of natural longitudinal oscillations of the Cyclone-4 space rocket body on its flight time, which were calculated considering the energy dissipation under various levels of tank fuelling its first stage, are examined.

Введение. Надежность функционирования жидкостных ракет-носителей (РН) и их элементов, в том числе сохранность космических аппаратов (КА) и работоспособность приборов системы управления, в значительной мере зависят от уровня динамических нагрузок, действующих на них на активном участке траектории полета жидкостной РН. Уровень динамических нагрузок существенно возрастает при продольных колебаниях жидкостной РН. При летных испытаниях ракет-прототипов ракеты космического назначения (РКН) «Циклон-4» было установлено, что они теряют продольную устойчивость на двух временных интервалах активного участка траектории полета во время работы жидкостной ракетной двигательной установки (ЖРДУ) первой ступени – от 0 до 30 с и от 50 до 90 с. Зарегистрированные величины амплитуд продольных колебаний, однако, не превышали допустимые уровни и, следовательно, не устанавливались специальные средства для обеспечения продольной устойчивости ракет-прототипов РКН «Циклон-4». Следует отметить, что опасным является не факт возможной потери продольной устойчивости, а превышение амплитудами продольных колебаний определенного допустимого уровня, который может диктоваться требованиями нормальной работы систем и агрегатов РН, например приборов системы управления. В конечном итоге, именно результаты теоретического прогноза возможных величин амплитуд продольных колебаний или зарегистрированные величины амплитуд продольных колебаний при летно-конструкторских испытаниях РН должны служить базой для принятия решений о специальных мерах по обеспечению продольной устойчивости жидкостных РН.

В этой связи особую актуальность приобретают работы по обеспечению допустимого уровня динамических нагрузок (продольных виброускорений), действующих на конструкцию РКН «Циклон-4» и ее элементы на активном участке траектории полета РКН. Важное место в этих работах занимает теоретический прогноз продольных виброускорений конструкций РКН и КА.

© В.В. Пилипенко, Н.И. Довготько, О.В. Пилипенко, А.Д. Николаев, В.А. Пирог, С.И. Долгополов, В.Ф. Ходоренко, Н.В. Хоряк, И.Д. Башлий, 2011

Техн. механика. – 2011. – № 4.

В настоящее время такой прогноз можно сделать на основе разработанных в Институте технической механики НАН Украины и НКА Украины (ИТМ НАНУ и НКАУ) методик для анализа продольной устойчивости жидкостных РН на активном участке траектории их полета во время работы ЖРДУ первой ступени. Эти методики не имеют аналогов в Украине и за рубежом и позволяют выполнять достоверные прогнозы уровней динамических нагрузок (продольных виброускорений), действующих на конструкции РН и КА различных типов [1 – 3].

При научно-техническом сопровождении разработки РКН “Циклон-4” (на этапе аванпроекта и на этапе эскизного проектирования) в ИТМ НАНУ и НКАУ выполнялся теоретический прогноз продольной устойчивости РКН “Циклон-4” и динамических нагрузок (продольных виброускорений), действующих на конструкции РКН и КА на активном участке траектории полета РКН во время работы ЖРДУ первой ступени.

Целью настоящей работы является выполнение такого прогноза для РКН “Циклон-4” с учетом изменений конструкции РКН после этапа эскизного проектирования.

Изменения в конструкции РКН “Циклон-4” после этапа эскизного проектирования. РКН “Циклон-4” создается на базе РН “Циклон-3”. Технические решения, принятые при разработке трехступенчатой РКН “Циклон-4”, соответствуют сложившейся международной практике использования РН для запуска КА в широком диапазоне их массовых характеристик, отвечают современным требованиям, предъявляемым разработчиками космических аппаратов к параметрам орбит КА и к поставщикам пусковых услуг, а также учитывают возможности максимального использования материальной части и технологии изготовления ракет-прототипов. Модернизация РН “Циклон-3” практически не затронула ее первую и вторую ступени. Третья ступень РН “Циклон-4” представляет собой новую разработку. Особенности её конструкции приведут к изменению динамических характеристик конструкции РКН и, в конечном счете, к изменению уровня продольных колебаний РКН “Циклон-4” и КА по сравнению с уровнем продольных колебаний РН “Циклон-3”. Кроме того, на уровень продольных колебаний РКН влияют возможные варианты массовых и жесткостных характеристик адаптеров и самих КА. Поэтому на всех этапах разработки РКН “Циклон-4” для каждого конкретного варианта комплектации РКН и КА было необходимо выполнять теоретический прогноз уровня продольных виброускорений КА, сравнивать его с допустимым уровнем и разрабатывать, в случае необходимости, рекомендации по обеспечению допустимых значений продольных виброускорений КА.

Новые технические решения, принятые при разработке РКН “Циклон-4” после этапа эскизного проектирования, затрагивают в основном конструкцию третьей ступени и межступенного отсека. Основные изменения в конструкции элементов РКН “Циклон-4” состоят в следующем [4]. С целью обеспечения требований по энергетическим возможностям третьей ступени увеличена её масса за счет дозаправки двух тонн топлива в топливные баки третьей ступени. В значительной мере изменена конструкция топливного отсека третьей ступени путем замены сферической формы верхнего сегмента бака горючего на коническую, введения цилиндрической вставки в бак окислителя и выдвижения бака окислителя вверх. Кроме того, при проведении пуска №1Л в настоящее время планируется вывести на рабочую орбиту составной макет КА

массой 1500 кг. Вторая ступень РКН оснащается узлами новой разработки: переходным и межступенчатым отсеками, при этом выполнено усиление продольного и поперечного набора межступенного отсека. Увеличена толщина обечайки бака горючего второй ступени РКН. Усилен хвостовой отсек первой ступени РКН под торцевую заправку.

Указанные доработки в конструкции РКН “Циклон-4” после этапа эскизного проекта приведут к изменению массовых и жесткостных характеристик соответствующих элементов конструкции РКН, которые в совокупности с массовыми и жесткостными характеристиками составного макета КА для пуска № 1Л окажут влияние на параметры (частоты, формы и соответствующие им приведенные массы) собственных продольных колебаний конструкции РКН и, следовательно, обуславливают необходимость выполнения теоретического прогноза продольной устойчивости РКН “Циклон-4” и динамических нагрузок (продольных виброускорений), действующих на конструкции РКН “Циклон-4” и КА на активном участке траектории полета РКН.

Линейная и нелинейная математические модели низкочастотной динамики системы “ЖРДУ первой ступени – корпус РКН “Циклон-4”. Ранее в ИТМ НАНУ и НКАУ были разработаны линейная и нелинейная математические модели низкочастотной динамики системы “ЖРДУ первой ступени – корпус РН” применительно к РКН “Циклон-4” на различных этапах её проектирования, в том числе и на этапе эскизного проектирования. Эти модели необходимы для проведения теоретического прогноза продольной устойчивости и амплитуд продольных колебаний РКН “Циклон-4”. В настоящей работе выполнено уточнение указанных моделей, обусловленное изменением конструкции РКН “Циклон-4” после этапа эскизного проектирования.

Линейная и нелинейная математические модели низкочастотной динамики системы “ЖРДУ первой ступени – корпус РКН “Циклон-4” включают уравнения динамики маршевого ЖРД первой ступени и его питающих магистралей, а также уравнения, описывающие продольные колебания корпуса РКН. В линейной математической модели данной системы продольные колебания корпуса РКН описывались как колебания многосвязной диссипативной системы (на основе его схематизации цепочкой дискретных масс, соединенных упругими и диссипативными связями [4]), а в нелинейной модели четыре низших тона собственных продольных колебаний корпуса РН описывались в обобщенных нормальных координатах уравнениями осцилляторов. Параметры этих тонов колебаний определялись с учетом диссипации энергии.

В результате математического моделирования свободных продольных колебаний корпуса РКН “Циклон-4” [4] были определены характеристики собственных продольных колебаний (частоты, декременты, формы и приведенные массы) конструкции корпуса РКН при различных уровнях заполнения топливных баков первой ступени РКН, соответствующих времени работы ЖРДУ первой ступени.

На базе современных представлений о динамических процессах в элементах ЖРД построены математические модели низкочастотной динамики маршевого двигателя первой ступени РКН “Циклон-4”. Они включают в себя уравнения динамики всех элементов ЖРД: жидкостных магистралей, турбо-насосного агрегата (в том числе кавитирующих шнекоцентробежных насосов окислителя и горючего), газогенератора, камеры сгорания и т. д. Соответственно система дифференциальных уравнений, описывающих низкочастотную динамику двигателя, состоит из большого числа уравнений. Использование в

математических моделях динамики ЖРД уравнений динамики кавитирующих шнекоцентробежных насосов, полученных в рамках теории кавитационных автоколебаний в насосных системах питания ЖРДУ [7, 8], позволяет наиболее полно реализовать количественный учет влияния кавитационных явлений в шнекоцентробежных насосах на динамические характеристики систем питания ЖРДУ и динамику замкнутой системы «ЖРДУ – корпус РН». Такого рода учет кавитационных явлений в насосах ЖРД не имеет аналогов в Украине и за рубежом и позволяет делать достаточно достоверные теоретические прогнозы продольной устойчивости жидкостных РН [1 – 3]. Отличительной особенностью уравнений низкочастотной динамики кавитирующих шнекоцентробежных насосов окислителя и горючего маршевой ЖРДУ первой ступени РКН “Циклон-4” является использование обобщенных экспериментально-расчетных зависимостей, характеризующих кавитационные явления в насосах ЖРД, что существенно повышает достоверность результатов теоретического анализа продольной устойчивости и определения амплитуд продольных колебаний РКН.

При математическом моделировании динамики жидкости в питающих магистралях маршевой ЖРДУ первой ступени РКН “Циклон-4” магистраль окислителя, имеющая значительную длину и тонкие стенки, рассматривалась как система с распределенными параметрами. При переходе от модели движения жидкости в питающей магистрали окислителя с учетом распределенности параметров к эквивалентной ей модели в сосредоточенных параметрах была обеспечена их адекватность в частотном диапазоне от 0 до 40 Гц. Магистраль горючего ввиду её относительно малой длины рассматривалась как система с сосредоточенными параметрами.

Учет внешних динамических воздействий со стороны конструкции РКН на движение жидкости в магистралях окислителя и горючего проводился путем ввода в уравнения движения компонентов топлива на каждом участке магистралей динамической составляющей ускорения жидкости в магистралях, которая обусловлена продольными колебаниями [2, 3].

Теоретический прогноз продольной устойчивости РКН “Циклон-4” на активном участке траектории полета во время работы ЖРДУ первой ступени проводился на основе линейной математической модели низкочастотной динамики системы “ЖРДУ первой ступени – корпус РКН “Циклон-4” с “замороженными” коэффициентами, в которой учитывались диссипативные связи между тонами собственных продольных колебаний корпуса и влияние диссипации энергии на параметры его собственных продольных колебаний [4]. Методика проведения анализа продольной устойчивости РН как анализа устойчивости системы по первому приближению Ляпунова на основе решения проблемы собственных значений с использованием QR-алгоритма изложена в работах [5, 6]. На основе расчета спектра матрицы системы “ЖРДУ первой ступени – корпус РН” определяются собственные частоты и соответствующие им показатели затухания колебаний этой системы, устанавливается факт устойчивости или неустойчивости системы и оценивается близость системы к границе области устойчивости.

На рис. 1 представлены расчетные зависимости собственных частот и показателей затухания колебаний динамической системы “ЖРДУ первой ступени – корпус РКН “Циклон-4” с составным макетом КА массой 1500 кг от времени полета РКН.

Расчетные собственные частоты колебаний исследуемой системы были условно разделены на две группы (рис. 1, а). К первой группе отнесены частоты (кривые 1 – 3), которые определяются динамическими свойствами корпуса РН и близки по значениям к его собственным частотам колебаний. Вторую группу составили частоты, близкие по значениям к собственным частотам колебаний жидкости в питающей магистрали горючего (кривая 4) и окислителя (кривые 5 – 7) ЖРДУ первой ступени.

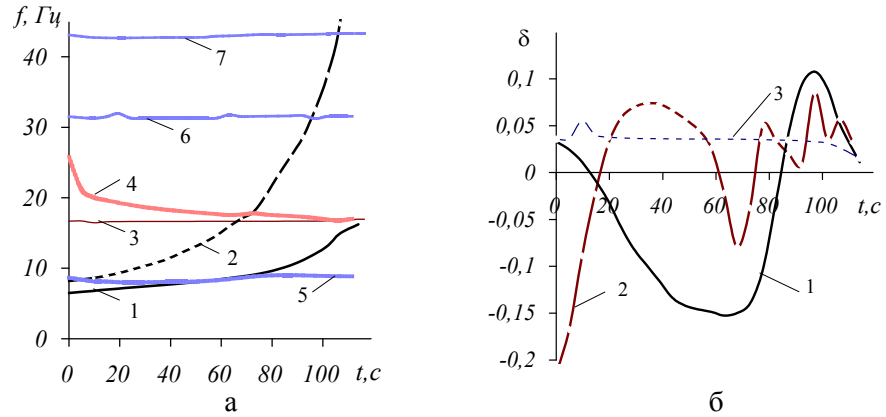


Рис. 1.

Из рис. 1, б следует, что на интервале времени (0; 83 с) рассматриваемая линейная динамическая система “ЖРДУ первой ступени – корпус РКН “Циклон-4” с “замороженными” коэффициентами неустойчива. Область неустойчивости системы состоит из трех пересекающихся интервалов: $0 \leq t < 16$ с (зона 1); $14 \leq t < 84$ с (зона 2); $61 \leq t < 74$ с (зона 3). Неустойчивость системы в каждой из этих зон обусловлена динамическим взаимодействием ЖРДУ и корпуса РН при сближении собственных частот колебаний корпуса РН с частотами колебаний жидкости в системе питания ЖРД окислителем и горючим. При сближении первой доминирующей собственной частоты корпуса с собственной частотой колебаний жидкости в системе питания ЖРД окислителем (кривые 1, 5 на рис. 1, а) система теряет устойчивость в зоне 2 по отношению к I-му тону колебаний корпуса (рис. 1, б, кривая 1). Сближение второй доминирующей собственной частоты корпуса (рис. 1, а, кривая 2) с собственной частотой колебаний жидкости в системе питания ЖРД окислителем и горючим (соответственно кривые 5 и 4 на рис. 1, а) приводит к потере устойчивости системы в зонах 1 и 3 по отношению ко II-му тону колебаний корпуса.

Таким образом, рассматриваемая линейная динамическая система с “замороженными” коэффициентами имеет одну зону нарастающих колебаний с собственной частотой, близкой к частоте I-го тона собственных продольных колебаний корпуса РКН (ее значения изменяются в этой зоне от 7 Гц до 9,9 Гц), и две зоны нарастающих колебаний с частотой, близкой к частоте II-го тона собственных колебаний корпуса РКН (в зоне 1 – с частотой 8,2 – 9 Гц и в зоне 3 – с частотой 16 – 17 Гц).

Следует отметить, что результаты выполненного на основании работ [5, 6] прогноза продольной устойчивости РКН “Циклон-4” позволяют расширить представления о потере продольной устойчивости жидкостных РН, объяснить процессы, которые происходят при взаимодействии динамических

звеньев линейной и соответствующей нелинейной системы “ЖРДУ первой ступени – корпус РКН”, и определить причины потери устойчивости в определенные моменты времени полета РКН.

Теоретический прогноз амплитуд продольных колебаний РКН “Циклон-4” на активном участке траектории полета РКН во время работы ЖРДУ первой ступени выполнялся на основе нелинейной нестационарной математической модели низкочастотной динамики системы “ЖРДУ первой ступени – корпус РКН “Циклон-4”. Математическая модель включает нелинейные уравнения динамики ЖРД первой ступени, его питающих магистралей и уравнения собственных продольных колебаний конструкции корпуса РКН с новой третьей ступенью (учитывающие 4 тона собственных колебаний конструкции корпуса).

В настоящей работе выполнен теоретический прогноз частот и амплитуд продольных колебаний конструкции РКН “Циклон-4” с составным макетом КА массой 1500 кг, результаты которого приведены на рис. 2.

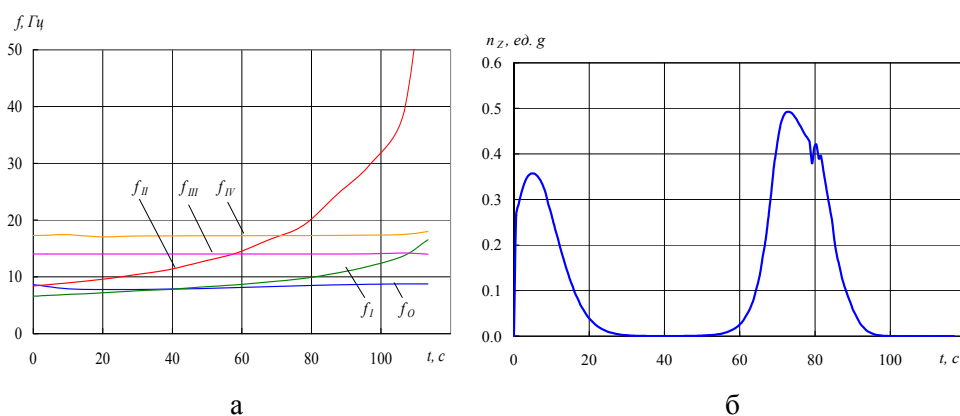


Рис. 2

На рис. 2, а приведены расчетные собственные частоты I – IV-го тонов продольных колебаний конструкции РКН “Циклон-4” ($f_I, f_{II}, f_{III}, f_{IV}$) и колебаний жидкости (f_O) в питающей магистрали окислителя ЖРДУ первой ступени, а на рис. 2, б представлена огибающая продольных виброускорений РКН “Циклон-4” в сечении центра масс КА. Расчеты показывают (см. рис. 2, б), что потеря устойчивости РКН “Циклон-4” происходит на двух временных интервалах полета РКН. На первом интервале потеря продольной устойчивости происходит с 0 с до 30 с, а на втором – с 52 с до 100 с. При этом максимальное значение продольных виброускорений на первом интервале времени составляет 0,36 g (на частотах колебаний 8 – 10 Гц), а на втором – 0,49 g (на частотах колебаний 8 – 11 Гц). Указанное максимальное значение продольных виброускорений на втором интервале времени полета РКН близко к допустимому уровню 0,5 g (на частотах колебаний 5 – 20 Гц), но не превышает его.

Выводы. На основании полученных результатов теоретического прогноза продольной устойчивости РКН “Циклон-4” с составным макетом КА массой 1500 кг и продольных виброускорений КА на активном участке траектории полета РКН во время работы ЖРДУ первой ступени можно сделать следующее заключение: РКН “Циклон-4” неустойчива по отношению к продольным колебаниям, однако прогнозируемые значения продольных виброу-

скорений КА не превышают их допустимый уровень и, следовательно, не требуется принятия специальных мер по снижению уровня продольных ускорений КА массой 1500 кг для пуска РКН “Циклон-4” № 1Л.

1. *Пилипенко В. В.* Исследования в области динамики жидкостных ракетных двигательных установок и продольной устойчивости жидкостных ракет-носителей / *В. В. Пилипенко, Н. И. Довгоцько, О. В. Пилипенко* // *Техническая механика*. – 2011. – № 4. – С. 16 – 29.
2. Теоретическое определение амплитуд продольных колебаний жидкостных ракет-носителей / *В. В. Пилипенко, Н. И. Довгоцько, С. И. Долгополов, А. Д. Николаев, В. А. Серенко, Н. В. Хоряк* // *Космічна наука і технологія*. – 1999. – Т. 5, № 1. – С. 90 – 96.
3. Теоретическое определение динамических нагрузок (продольных виброускорений) на конструкцию жидкостной ракеты РС-20 на активном участке траектории ее полета / *В. В. Пилипенко, Н. И. Довгоцько, А. Д. Николаев, С. И. Долгополов, Н. В. Хоряк, В. А. Серенко* // *Техническая механика*. – 2000. – № 1. – С. 3 – 18.
4. Математическое моделирование свободных продольных колебаний конструкции третьей ступени и корпуса ракеты космического назначения «Циклон-4» / *В. В. Пилипенко, А. Д. Николаев, Н. В. Хоряк, И. Д. Башлий, В. А. Пирог, В. Ф. Ходоренко* // *Техническая механика*. – 2011. – № 4. – С. 37 – 44.
5. *Хоряк Н. В.* Анализ устойчивости многоконтурной динамической системы “ЖРД – корпус РН” по спектру матрицы : методические основы и приложение / *Н. В. Хоряк* // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. – № 9(45). – С. 87 – 91.
6. *Хоряк Н. В.* Математическое моделирование взаимодействия продольных колебаний корпуса жидкостной ракеты как многосвязной упруго-диссипативной системы и динамических процессов в двигательной установке / *Н. В. Хоряк, А. Д. Николаев* // *Техническая механика*. – 2010. – № 3. – С. 27 – 37.
7. *Пилипенко В. В.* Кавитационные автоколебания и динамика гидросистем / *В. В. Пилипенко, В. А. Задонцев, М. С. Натанзон*. – М. : Машиностроение, 1977. – 352 с.
8. *Пилипенко В. В.* Кавитационные автоколебания / *В. В. Пилипенко*. – Киев : Наук. думка, 1989. – 316 с.

Институт технической механики
НАН Украины и НКА Украины,
Днепропетровск

Получено 13.10.11,
окончательном варианте 24.10.11