

УДК 629.7:539.4

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗБРОСОВ ЖЕСТКОСТНЫХ И ДИССИПАТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЕТНЫХ НАГРУЗОК

© 2014 А.И.Селиверстов<sup>1</sup>, И.В.Шевченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ГКНПЦ им. М.В. Хруничева

<sup>2</sup> «МАТИ» - РГТУ имени К.Э.Циолковского, г. Москва

Поступила в редакцию 19.03.2014

В работе изложены результаты расчетного исследования влияния разбросов жесткостных и диссипативных характеристик элементов конструкции ракеты-носителя на точность определения полетных нагрузок. Показано, что для РН «Ангара-А5» корпусные нагрузки варьируются от выбранных разбросов жесткостей не более, чем на 10% от номинала.

Ключевые слова: *динамическая модель, жесткостная характеристика, ракета, нагрузка*

Эксплуатационные нагрузки для вновь создаваемых ракет-носителей (РН) и изделий космической техники определяются расчетным путем. Основные сложности возникают при определении динамических нагрузок, связанных с переходными процессами и знакопеременными внешними воздействиями, на нагрузки при ее движении в плотных слоях атмосферы по фиксированной траектории. Для наиболее полной и всесторонней оценки влияния разбросов жесткостных и диссипативных характеристик элементов конструкций РН «Ангара-А5» на условия их нагружения были рассмотрены следующие типы внешних воздействий: 1 – гармоническое воздействие на конструкцию органами управления; 2 – квазистатическое нагружение системой аэродинамических сил и балансирующих сил от органов управления в зоне максимального скоростного напора; 3 – действие нормативного ветрового порыва в зоне максимального скоростного напора; 4 – типовые воздействия при управляемом движении РН по траектории в плотных слоях атмосферы. Расчеты нагрузок на конструкции РН для пунктов 1-3 выполняются при следующих вариантах разбросов жесткостных параметров: номинальные жесткости; все жесткости уменьшены на 50% и на 25%; все жесткости увеличены на 25%, 50% и на 100%; при номинальных балочных жесткостях значения жесткостей связей уменьшены на 50% и на 25%; при номинальных балочных жесткостях

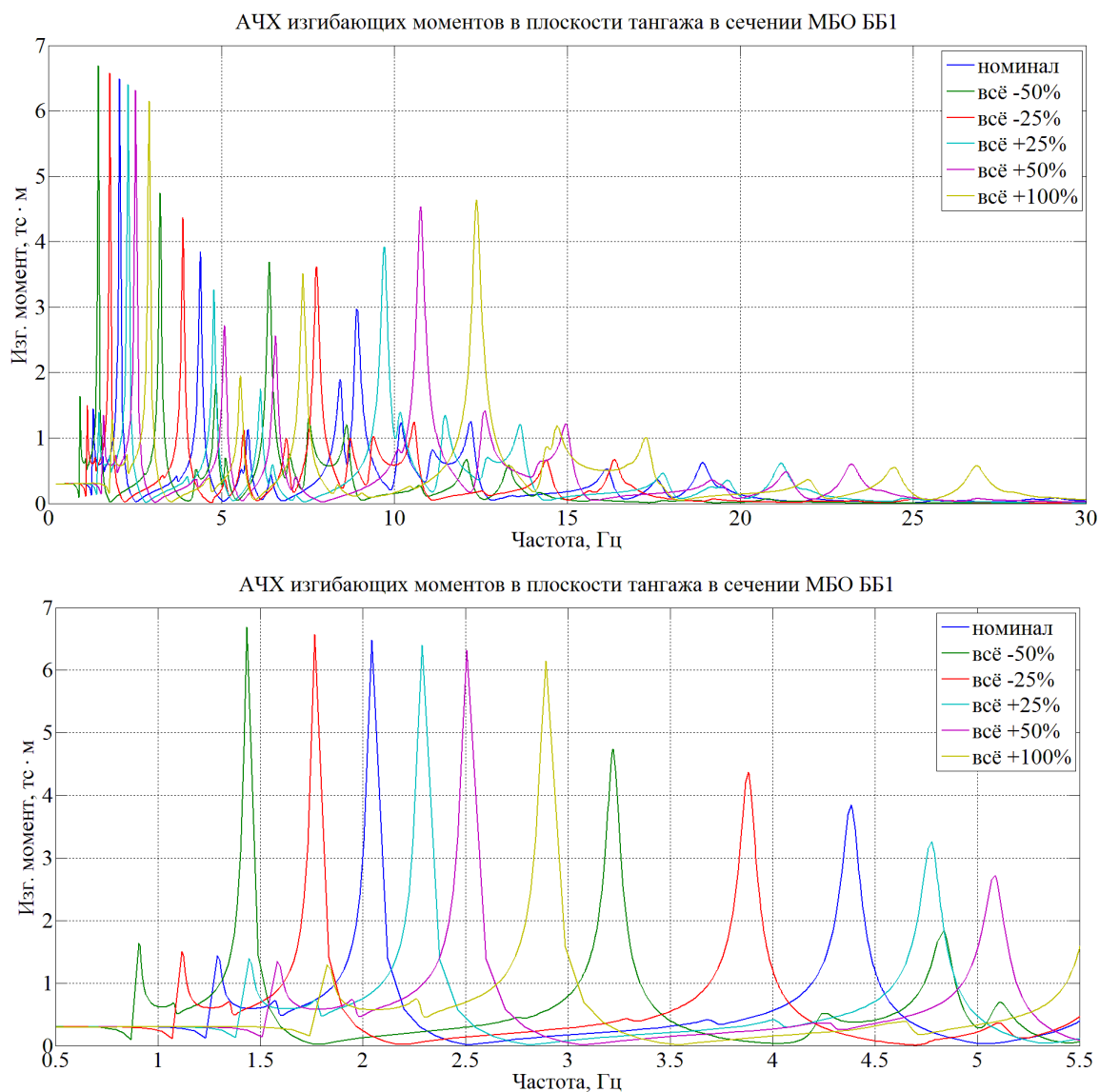
значения жесткостей связей увеличены на 25%, 50% и на 100%; при номинальных балочных жесткостях значения жесткостей связей в нижнем поясе уменьшены на 50%, а в верхнем и среднем поясах – увеличены на 100%; при номинальных балочных жесткостях значения жесткостей связей в нижнем поясе увеличены на 100%, а в верхнем и среднем поясах – уменьшены на 50%.

Как известно, диссипативные характеристики не оказывают влияния на нагрузки при квазистатических воздействиях. С другой стороны, при переходных процессах экстремальные значения нагрузок реализуются в моменты времени, достаточно близкие к началу действия нестационарного процесса (в частности, при действии ветрового порыва), когда диссипативные свойства также не оказывают существенного влияния на реализующиеся экстремальные величины параметров нагружения. В связи с этим влияние демпфирующих свойств конструкции оценивалось только при анализе влияния гармонических воздействий на конструкцию РН органами управления. Расчеты выполнялись с использованием верифицированной динамической модели РН. Верификация модели осуществлялась с использованием различных типов экспериментов: статических испытаний различных сборок; частотных и вибропрочностных испытаний сборок [1]; огневых испытаний изделий KSLV; динамических испытаний сборки В4 [2]. Верификация динамической модели базировалась на сопоставительном анализе расчетных и экспериментальных данных. С этой целью были разработаны две конечно-элементные расчетные модели – детализированная (оболочечная) и

Селиверстов Александр Иванович, генеральный директор. E-mail: seliverstova.i@khrunichev.com  
Шевченко Игорь Владимирович, доктор технических наук, заведующий кафедрой. E-mail: mmm@mati.ru

эквивалентная ей в низкочастотном диапазоне балочная для соответствующих испытательных сборок. В первую очередь достигалось совпадение результатов расчёта, полученных на основе детализированной модели, с экспериментальными данными. Затем определялись параметры эквивалентной балочной модели путём минимизации невязки между результатами детализированной оболочечной и балочной моделей в низ-

кочастотной области. На основе проведенных верификационных исследований были сформированы массивы номинальных жесткостных характеристик для обобщённой пространственной балочной модели РН «Ангара-А5», позволяющей определять квазистатические и динамические нагрузки на различных этапах эксплуатации РН.



**Рис. 1.** АЧХ изгибающих моментов при возбуждении конструкции РН в плоскости тангажа

Для анализа результатов расчетных исследований было выполнено построение амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) силовых факторов: изгибающих моментов в сечении межбакового бокового блока, центрального блока, отсека третьей ступени; изгибающих моментов и скачков перерезывающих сил в сечении центрального блока на уровне верхнего пояса связей; изгибающих моментов и скачков перерезывающих сил в сечении центрального блока на уровне среднего пояса связей; изгибающих

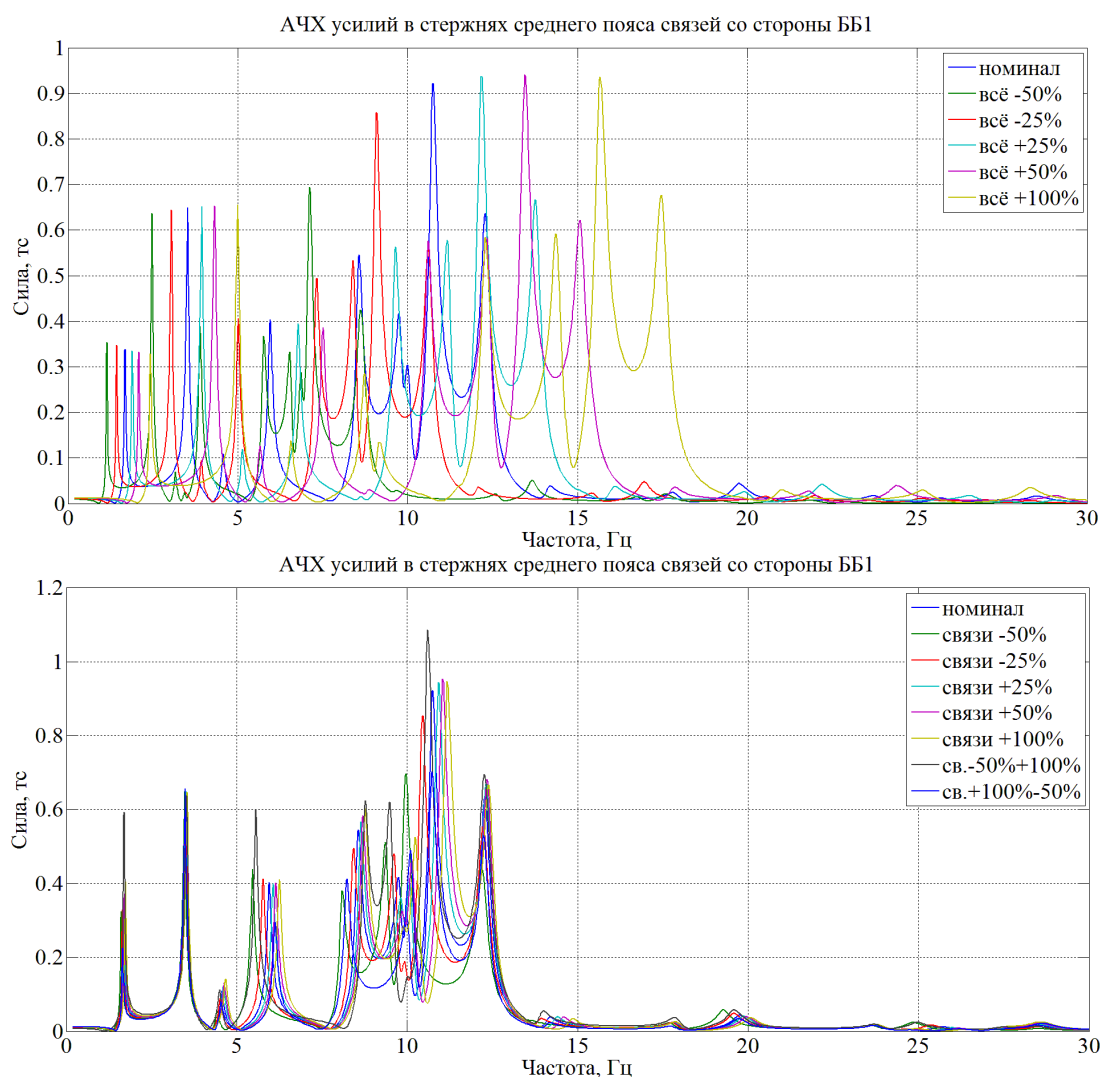
моментов в сечении интерфейса адаптера РБ и КА; усилий в штырях всех поясов межблочных связей; усилий с тангенциальных упорах нижнего пояса связей; ускорений узле интерфейса адаптера разгонного блока (РБ) и космического аппарата (КА). Для анализа построенные по результатам расчета графики АЧХ были разбиты на две группы: первая группа отражает эффекты влияния изменений всей совокупности жесткостных параметров конструкции (за исключением параметров РБ) на АЧХ; вторая группа

иллюстрирует влияние на АЧХ только лишь параметров жесткостей связей. Построение АЧХ проводилось в частотном диапазоне от 0,3 до 30 Гц. В тех случаях, когда необходимо продемонстрировать разбросы главных максимумов в зависимости от вариации жесткостей конструкции, дополнительно приводятся графики АЧХ в окрестностях этих максимумов. В ходе расчетов АЧХ внутренних силовых факторов уровень диссипации закладывался равным 1% (декремент 0.06) критического демпфирования.

В качестве примера приведены результаты исследования влияния разбросов жесткостных и диссипативных характеристик элементов конструкции РН на нагрузки при гармоническом возбуждении органами управления. В расчетах гармоническое возбуждение задавалось исполнительными органами первой ступени в плоскости тангажа и по крену с амплитудой усилия от одного двигателя равной 0,1 тс. На рис. 1. представлены результаты расчетов АЧХ изгибающих моментов в плоскости тангажа при возбуждении

конструкции по тангажу при синхронном варьировании жесткостей конструкции.

Результаты исследования показали, что при синхронном варьировании жесткостных характеристик блоков РН в низкочастотном диапазоне до 10 Гц происходит смещение резонансных частот в АЧХ преимущественно по закону квадратного корня из жесткостей. При этом с ростом жесткостей блоков РН выявлено незначительное увеличение максимальных силовых факторов по низшим тонам колебаний (в пределах 15%). Анализ влияния разбросов диссипативных характеристик на интерфейсные нагрузки показал обратную зависимость максимальных нагрузок от уровня диссипации от 1 до 3% критического демпфирования. В целом, была установлена сильная чувствительность нагрузок на РКН от амплитуд усилий при гармоническом воздействии управляющих органов. Это указывает на необходимость исключения автоколебаний при управляемом движении РН на активном участке полёта.



**Рис. 2.** АЧХ усилий в стержнях среднего пояса связей при возбуждении конструкции РН по крену

При варьировании жесткостных характеристик наибольшие отклонения от номинального уровня максимальных величин силовых факторов на центральном блоке при нагружения конструкции РН системой квазистатических сил, обусловленных аэродинамическими воздействиями и работой органов управления при прохождении зоны максимального скоростного напора, составляют: изгибающих моментов – 9-10%, эквивалентных растягивающих усилий – 6%, эквивалентных сжимающих усилий – порядка 14%. Однако данная величина (14%) реализуется в сечении среднего пояса связей, где рассматриваемые нагрузки не являются экстремальными и имеются достаточные запасы прочности.

Оценки влияния жесткостных характеристик элементов на условия нагружения конструкций РН «Ангара-А5» при действии нормативного ветрового порыва в зоне прохождения максимального скоростного напора показала что, разбросы величин эквивалентных сжимающих и растягивающих усилий, а также моментов, не превосходят 10% от номинала. Также было установлено что: экстремальные величины силовых факторов слабо зависят от длительности ветрового порыва и в значительной мере определяются производной функции порыва в

начальный момент времени, при всех вариантах рассмотренных жесткостных характеристик. Изменения величины динамических нагрузок от действия ветрового порыва оказываются в достаточной степени консервативными в случае, когда время действия порыва оказывается равным половине периода первого тона колебаний конструкции, разбросы величин моментов составляют порядка 13%.

**Выводы:** представленные расчеты свидетельствуют о том, что корпусные нагрузки, в целом, варьируются от выбранных разбросов жесткостей не более, чем на 10% от номинала.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Бахвалов, Ю.О. Метод идентификации диссипативных и жесткостных характеристик конструкций ракетно-космической техники при вибрационных испытаниях. / Ю.О. Бахвалов, Г.Б. Клейменов, И.В. Шевченко // *Авиационная промышленность*. 2009. №3. С. 15-18.
2. Селиверстов, А.И. Уточнение расчетной динамической модели элемента ракеты-носителя по результатам испытаний сбросом статических сил / А.И. Селиверстов, И.В. Шевченко // *Материалы XX Международной заочной научно-практической конференции «Технические науки – от теории к практике»*. (17 апреля 2013 г.). - Новосибирск: Изд. «СибАК», 2013. С. 73-81.

## RESEARCH THE INFLUENCE OF DISPERSIONS OF STIFFNESS AND DISSIPATIVE CHARACTERISTICS OF DESIGN ELEMENTS OF THE ROCKET ON THE ACCURACY OF DEFINITION THE FLIGHT LOADS

© 2014 A.I. Seliverstov<sup>1</sup>, I.V. Shevchenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> SCSPC named after M.V. Khrunichev

<sup>2</sup> "MATI" - RSTU named after K.E. Tsiolkovskiy, Moscow

In work results of calculated research the influence of dispersions of stiffness and dissipative characteristics of design elements of the rocket on the accuracy of definition the flight loads are stated. It is shown that for RC «Angara-A5» case loadings vary from the chosen dispersions of scatter rigidities no more, than for 10% of nominal.

Key words: *dynamic model, stiffness characteristic, rocket, load*