

УДК 621.45

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ УЗЛОВ КРЕПЛЕНИЯ РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

© 2013 В.С. Мелентьев, А.С. Гвоздев

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

Поступила в редакцию 02.12.2013

В статье рассмотрены проблемы создания численных параметрических моделей узлов крепления реактивных двигателей различного назначения.

Ключевые слова: граничные условия, реактивный двигатель, динамический расчёт, кинематика, параметризация, прочность, узел крепления, 3D-модель, ADAMS, ANSYS.

На двигателе располагают узлы крепления для его установки на летательном аппарате (ЛА) и передачи силы тяги. Обычно узлы крепления располагаются на камере, как основном тяговом агрегате. Конструкция и расположение креплений должны отвечать следующим требованиям: а) обеспечивать минимальные нагрузки на силовые элементы; б) минимальные температурные напряжения в элементах конструкции; в) удобство монтажа и обслуживания.

Сами крепления должны иметь достаточную жёсткость, чтобы обеспечить заданное взаимное расположение соединяемых агрегатов. Для установки креплений на камере выполняются силовые элементы – опоры.

Особым требованием, предъявляемым к опорам камеры, является обеспечение высокой точности совпадения осей камеры и ЛА или же заданной величины угла между этими осями. Это необходимо для получения расчётной траектории полета непосредственно после старта, когда система управления ещё не в состоянии работать эффективно.

Крепления двигателя делятся на два вида: 1) обеспечивающие неподвижную установку камеры относительно ЛА; 2) дающие возможность поворота камеры для создания управляющих моментов.

Во многих случаях для неподвижного крепления двигателей к ЛА используется промежуточный элемент – рама двигателя. Она необходима в следующих случаях: а) при неподвижном креплении двигателя, если поперечные размеры камеры меньше размеров ЛА; б) при использовании многокамерных двигателей; в) при необ-

ходимости равномерного распределения тяги по окружности корпуса [1,2].

При этом назначение рамы заключается в следующем:

1) Воспринять силу тяги камер, входящих в двигатель, и равномерно передать эту силу корпусу, распределив ее по стыковочным узлам.

2) Соединить все агрегаты двигателя в единую технологическую группу, удобную для транспортировки и монтажа двигателя.

3) Установить главную ось двигателя в заданном положении по отношению к оси ЛА.

Конструктивно рамы состоят из отрезков труб, опор, косынок, кронштейнов и других элементов, которые соединяются сваркой. Конструкция соединения отрезков труб с другими элементами должна обеспечить получение сварного шва, равнопрочного с соединяемыми элементами.

Если основной двигатель выполняет также и функции рулевого, то крепления должны обеспечить возможность его поворота в одной или двух взаимно перпендикулярных плоскостях. В этом случае для крепления двигателя всегда нужен промежуточный элемент, который также часто представляет собой раму. Такие крепления располагают или сверху, в центре головки, или же по бокам камеры, обычно в конце цилиндрического участка корпуса, а иногда в зоне критического сечения сопла.

Другую конструкцию имеют крепления, расположенные на корпусе камеры, обычно вблизи её центра тяжести.

При повороте в одной плоскости крепление представляет собой силовое кольцо, приваренное к средней части корпуса камеры, с двумя цапфами, которые могут вращаться относительно рамы двигателя.

Для уменьшения трения на цапфы устанавливаются подшипники качения, наружная обойма которых входит в гнезда рамы двигателя.

При повороте камеры в двух взаимно перпендикулярных плоскостях приходится использо-

Мелентьев Владимир Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов.

E-mail: vladatgenja@mail.ru

Гвоздев Александр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов.

E-mail: xandr_mail@mail.ru

вать промежуточную раму, в которой устанавливаются подшипники цапф камеры. Цапфы промежуточной рамы располагают под углом 90° к цапфам камеры и вращают в подшипниках рамы двигателя. С целью уменьшения габаритов и массы рамы такую опору размещают в зоне критического сечения камеры.

Промежуточная рама для облегчения выполняется сварной из пустотелых секций и имеет гнезда под подшипники. Поворот камеры относительно промежуточной рамы, как и поворот самой промежуточной рамы, относительно рамы двигателя осуществляется рулевыми машинками, которые часто представляют собой гидроцилиндры.

Построение численной модели узла крепления ЖРД состоит из нескольких этапов, главными из которых являются создание параметрической 3D-модели, кинематико-динамической, необходимая при наличии в системе подвижных узлов, в частности, качающейся камеры сгорания, а также прочностной модели, каждой из которых посвящён соответствующий раздел настоящего пособия. В целом, представленные модели открыва-

ют дорогу оптимизации конструкции узлов крепления ЖРД с последующей передачей на производство с применением САМ-технологий.

В данной работе 3D-модель строилась с использованием пакета SolidWorks. Созданная параметрическая модель была использована для проведения прочностного анализа.

Расчёт созданной 3D-модели может быть произведён в любом конечно-элементном пакете, например, ANSYS. Для этого модель импортировалась в пакет ANSYS в формате Parasolid, позволяющем точно передать геометрию рамы. Модель разбивалась на конечные элементы тетрагональной сеткой с целью расчёта конструктивной геометрии. Размеры сетки подбирались вручную. Задавались необходимые свойства конструктивных материалов рамы. В качестве граничных условий (рис. 2) использовались жёсткие заделки (Fixed Support) A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M, N, P, Q, R, S, T, U, V, W, X, Y, Z; распределённые нагрузки (Pressure) G, H, I, J, K, L, M, N, O, P, Q, R, S, T, U, V, W, X, Y, Z; ограничения перемещений (Displacement) K, L, M, N, O, P, Q, R, S, T, U, V, W, X, Y, Z; выбранные из условий работы рамы. Распределённые нагрузки G, H, I, J, K, L, M, N, O, P, Q, R, S, T, U, V, W, X, Y, Z моделировали со-

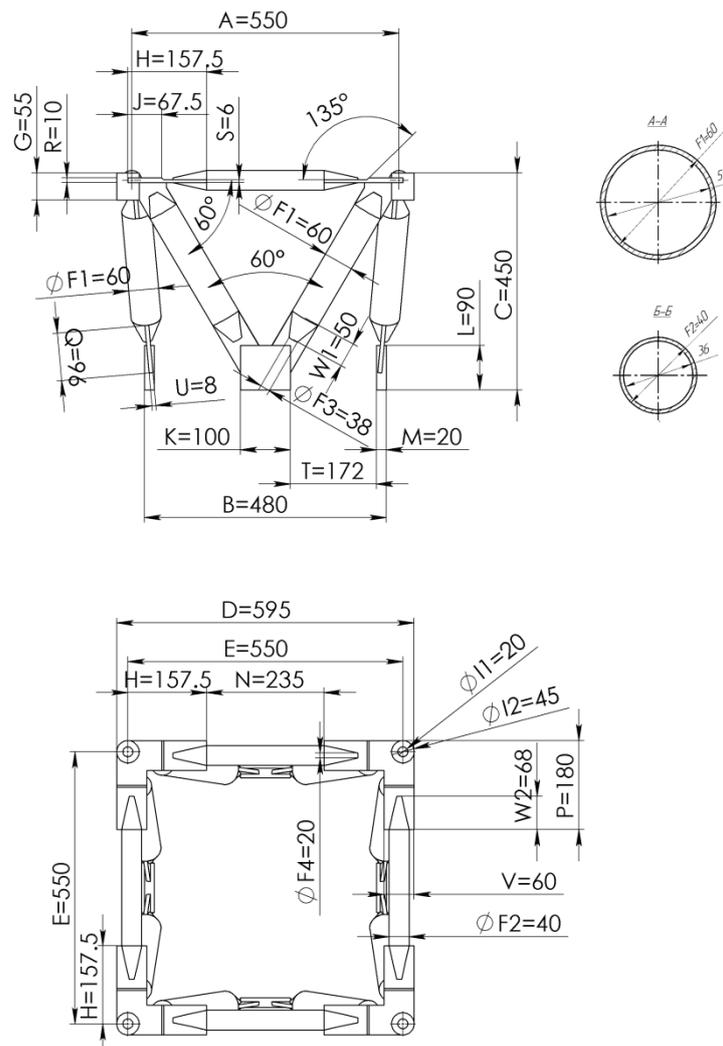


Рис. 1. Схематический чертеж рамы реактивного двигателя

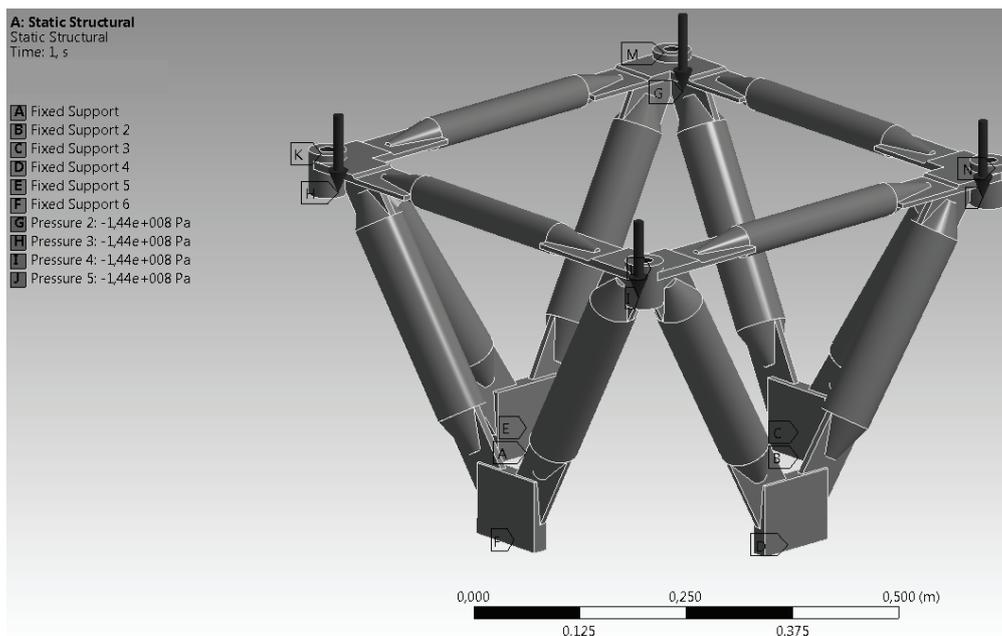


Рис. 2. Задание граничных условий

бой усилия от тяги двигателя. При этом усилие в 367500 делится на площадь, к которой приложена нагрузка. Такое приложение является более реалистичным, чем приложение вектора силы в одном узле. Ограничения перемещений К, L, М, N обеспечивают перемещение верхних площадок закреплений в строго вертикальном направлении, что также обусловлено конструкцией рамы.

Расчёт выполнялся в статической постановке без учёта нелинейности, вследствие малости деформаций конструкции. Подробнее о проведении прочностных и динамических расчётов с использованием готовой объёмной модели изложено в [3].

Итогом расчёта выступает диаграмма распределения эквивалентных напряжений по объёму конструкции (рис. 3).

На диаграмме хорошо виден характер деформации рамы. Используя данную диаграмму, можно найти минимальные и максимальные значения напряжений в горизонтальных и наклонных стержнях конструкции, чтобы использовать их для расчёта устойчивости конструкции на основе теории упругости.

Подвижность камеры позволяет управлять вектором тяги в полете, но при этом значительно усложняется конструкция. Для управления ракетой по тангажу и рысканью необходимо обеспечить качание двигателя в двух плоскостях. Если крепление расположено на головке камеры, то поворот двигателя в двух взаимно перпендикулярных плоскостях можно осуществить, используя шаровую пяту или универсальный шар-

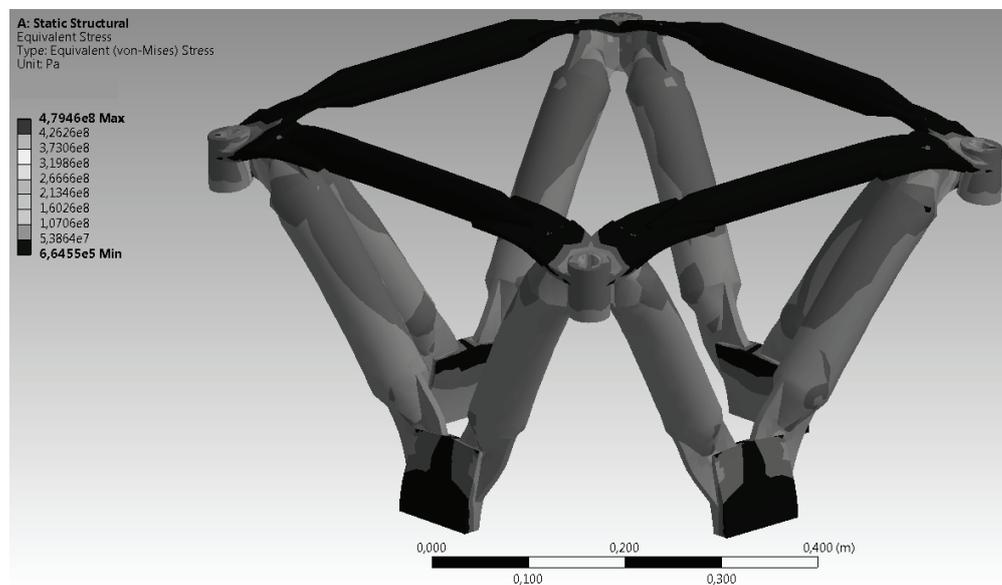


Рис. 3. Распределение эквивалентных напряжений по конструкции (Па)

нир (см. рис. 4). Возможно сочетание этих устройств, в котором тяга передается через шаровую пятую, а подвес двигателя сделан через универсальный шарнир. В этом случае подшипники шарнира разгружены.

Конструкция с шаровой пятой позволяет получить более компактное подвижное крепление, однако в этом случае имеет место трение скольжения по сферической поверхности. При применении универсального шарнира оси кардана обычно снабжают подшипниками качения, что позволяет уменьшить трение в опоре.

Была проработана конструкция подвижного крепления с универсальным шарниром. Конструкция подвижного крепления должна передавать большое усилие (150 т), обеспечивать малое трение в шарнирах и иметь малую массу. В работе представлена возможная конструкция подвижного подвеса без оптимизации по всем этим параметрам. Ставилась задача определить возможность применения такой опоры и её геометрические характеристики.

Для того, чтобы установить узел крепления на силовое кольцо головки, предлагается использовать раму. Кардан (крестовина) соединяется с рамой через подшипники качения. В связи с большой радиальной нагрузкой возникает необходимость применения роликовых подшипников. По-

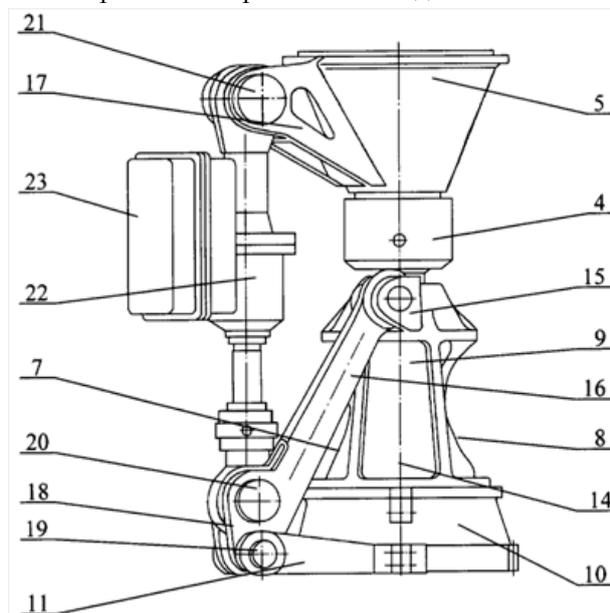


Рис. 4. Общий вид сборочной единицы карданного подвеса без камеры:

4 – шаровой подвес; 5 – неподвижный опорный элемент, скреплённый с корпусом ракеты; 7, 8 – окна в корпусе подвижного конуса; 9, 10 – верхняя и нижняя части подвижного конуса; 11 – нижние кронштейны; 14 – ось камеры; 15 – верхние кронштейны; 16 – раскос, соединяющий 11 и 15; 17 – кронштейны верхнего (подвижного) конуса; 18 – вилки; 19 – оси шарниров; 20 и 21 – шаровые шарниры; 22 – силовые цилиндры; 23 – рулевые машинки

скольку кардан, образующий ось подшипников, при действии нагрузки деформируется, придется применять бочкообразные роликовые самоустанавливающиеся подшипники.

Как видно из рисунка, исходная рама претерпела значительные изменения: рама разомкнута в направлении, перпендикулярном оси подшипников, что позволяет опустить корпуса подшипников и снизить их массу; связь стержней рамы в осевом направлении подшипников также опущена, что обеспечивает выход вала за габаритные размеры подвеса. Определённые трудности представлял подбор подшипника в соответствии с действующими стандартами. На одной оси кардана установлено по два подшипника, поэтому значение грузоподъемности для каждого из них должно быть в диапазоне 750 – 800кН (75000-80000 кгс) [5]. С учетом того, что подшипник должен быть роликовым, радиально-упорным (чтобы обеспечить поворот узла и закрепить его в осевом направлении), выбран подшипник по ГОСТ 5721-57 тип 3540 (рис. 5).

Грузоподъемность подшипника	составляет	935 кН;
наружный диаметр		D = 360 мм;
внутренний диаметр		d = 200 мм;
ширина подшипника		B = 98 мм;
масса подшипника		G = 45 кг.

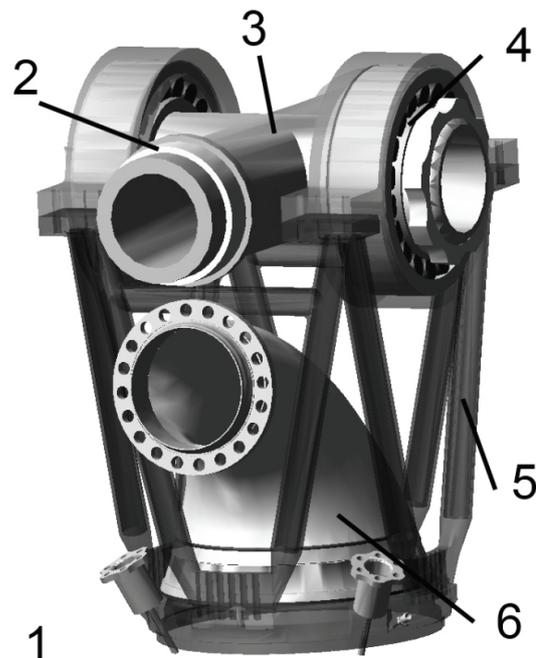


Рис. 5. Крепление камеры ЖРД НК-33 в программе ADAMS.

Камера в отклонённом положении относительно подвижной оси Кардана (связанной с двигателем): 1 – все поле модели представляет собой Корпус; 2 – подшипники оси Y (скрыты); 3 – крестовина; 4 – подшипники оси X; 5 – рама; 6 – камера

В карданной подвеске используется четыре таких подшипника, которые надо установить на крестовину.

Подшипники по наружным кольцам устанавливаются в цилиндрические корпуса подшипников, которые с помощью крепежных болтов устанавливаются на подвижной раме (закрепленной на двигателе) и неподвижной раме (связанной с ракетным блоком). Рамы соединяются между собой с помощью кардана (крестовины) через подшипники.

Конструкция узла подшипника, осевое закрепление колец подшипников и крепление корпуса подшипников к раме показано на рис. 5.

Как видно, недостатком рассматриваемого варианта подвески является значительная масса. Причем основная составляющая веса подвески приходится на подшипники.

В ГОСТе представлены подшипники таких размеров для общего машиностроения, когда не предъявляются требования по минимальным массе и габаритам. Поэтому в данной конструкции целесообразно использовать специальные подшипники, например такие, как на двигателе РД-170.

В случае применения специальных подшипников, имеющих меньшие габариты и массу, а также оптимизации крепления подвески к смесительной головке, можно значительно уменьшить габариты и массу узла крепления двигателя (примерно в 1,5...2 раза). В таком случае такая подвеска может

конкурировать по массе с шаровой пятой.

Проверить возможные движения камеры с разработанным креплением можно, используя пакет программ ADAMS, предназначенный для кинематико-динамического анализа механических систем

На рис. 5 показано расположение отдельных кинематических групп, а на рис. 6 - кинематическая схема сборки, где показаны связи между ними. На первом этапе сборки наружные кольца подшипников оси Y соединяются JF фиксирующими шарнирами в корпусе, затем их внутренние кольца фиксируются на крестовине. Подшипники реализуют вращательную связь JR с одной степенью свободы (вращательный шарнир) либо вращательную с возможностью движения вдоль оси JC (цилиндрический шарнир).

Использование пары шарниров JR и JC (вместо пары JR и JR) в симметричных подшипниках объясняется особенностями математической модели пакета MSC.ADAMS и позволяет снизить число паразитных связей в модели, никак не влияя на движения деталей.

Крестовина через подшипники оси X соединяется с рамой двигателя, на которой закрепляется камера [7]. По оси камеры прикладывается вектор тяги двигателя. К шарнирам, связывающим крестовину с подшипниками, прикладываются генераторы движения для задания за-

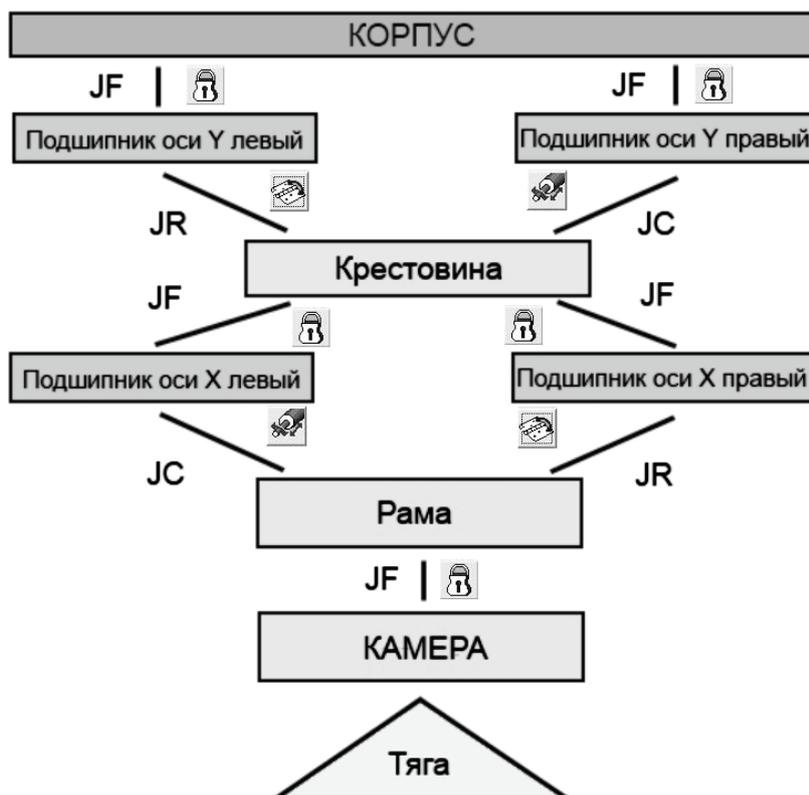


Рис. 6. Кинематическая схема ЖРД с карданным подвесом

кона качания камеры. Для качания в одной плоскости генератор  прикладывается только к соответствующей паре подшипников, для качания в двух плоскостях - на обе пары (X и Y). Законы могут быть выбраны в зависимости от назначения расчёта (для испытаний, в полёте, на земле, на орбите, манёвр и т.д.) независимо для каждой плоскости качания. Если пренебречь трением и сопротивлением трубопроводов, то качание камеры отдельно относительно оси X и Y практически одинаково.

Задавшись законом $6 \cdot \pi / 180 \cdot \sin(5 \cdot \text{time})$, где 6 – амплитуда качания в градусах, $\pi / 180$ – множитель для перевода градусов в радианы, time – модельное время в секундах, был проведён расчёт, время задавалось 2,5 секунды и число шагов более 2000. Основной расчётный график представлен на рис. 7.

Рассмотрена более сложная ситуация, когда камера качается одновременно в двух плоскостях. Взяты следующие законы качания:

$\pi / 50 \cdot \sin(5 \cdot \text{time})$ – для оси X,
 $\pi / 18 \cdot \sin(5 \cdot \text{time} / 2)$ – для оси Y.
 Полученные графики представлены на рис. 8-9.

ВЫВОДЫ

Основным результатом проведённого исследования является создание численных моделей узлов крепления реактивного двигателя, включающих в себя:

1. Параметрическую 3D-модель узлов крепления двигателя, созданную в САД-пакете, в т.ч. пригодную для автоматизированного создания чертежей;
 2. Конечно-элементную модель узлов крепления, основанную на 3D-модели;
 3. Динамическую модель качающегося подвеса двигателя для одно- и двухплоскостного качания.
- Представленные модели в совокупности позволяют получать перемещения, скорости и ускорения деталей узлов крепления, нагрузки, де-

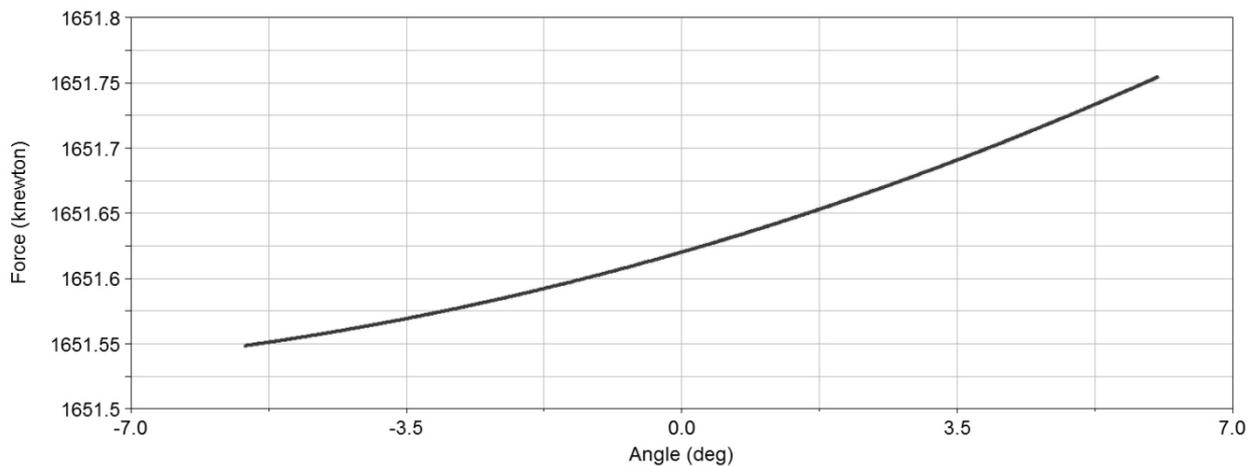


Рис. 7. Зависимость силы, действующей на подшипники, (Н·м) от угла качания камеры (градусы) для качания в одной плоскости: $\text{Force} = f(\text{angle})$

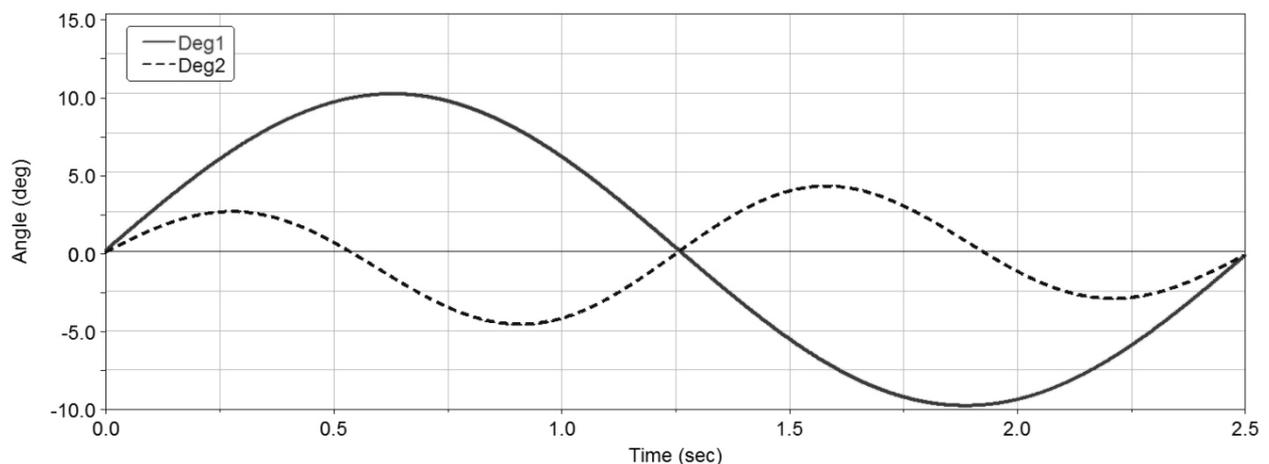


Рис. 8. Зависимость угла качания камеры (градусы) от времени (секунды) для качания в двух плоскостях: $\text{Angle} = f(\text{time})$: Deg1 – поворот относительно оси X, Deg2 – поворот относительно оси Y

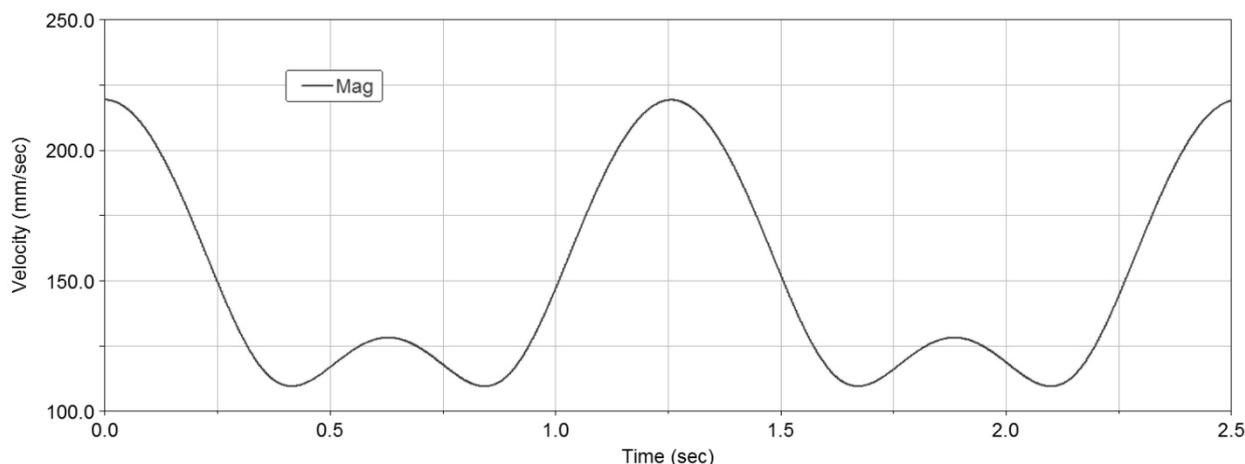


Рис. 9. Зависимость скорости качания камеры (мм/с) от угла качания камеры (градусы) для качания в двух плоскостях:
 $Velocity = f(\text{angle})$

формации, напряжения. Проводить оптимизационные расчёты и подготовить конструкцию для расчёта на надёжность и оценку ресурса, а также использовать полученные модели в САМ-пакетах для технологического проектирования и последующего производства в рамках концепции «Виртуального двигателя».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пичугин Д.Ф. Конструкция и проектирование агрегатов двигателей летательных аппаратов : учеб. пособие. Куйбышев: Изд-во Куйбышев. авиац. ин-та им. С. П. Королёва, 1989. 244 с.
2. Шустов И.Г. Двигатели 1944-2000: авиационные,

ракетные, морские, наземные: справочник. М.: АКС - Конверсалт, 2000. 510 с.

3. Гвоздев А.С. Изучение конструкции двигателей с использованием 3D-моделей их элементов: метод. указания. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. 24 с.
4. Гвоздев А.С. Изучение конструкции авиационного ДВС с использованием пакетов ANSYS, ADAMS, SOLIDEDGE: метод. указания. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. 53 с.
5. Бейзельман Р.Д. Подшипники качения: справочник. М.: Машиностроение, 1975. 572 с.
6. Мелентьев В.С. ADAMS/View, ADAMS/PostProcessor: Краткий справочник пользователя: учеб. пособие. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. 105 с.
7. Борисов В.А. Разработка численной модели узлов крепления ЖРД: учеб. пособие. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2013. 169 с.

MATHEMATICAL MODEL OF MOUNTING UNITS OF JET ENGINES

© 2013 V.S. Melentjev, A.S. Gvozdev

Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov
 (National Research University)

The problems concerning the creation of parametric mathematical models of the mounting units of jet engines various purposes are described in this article.

Key words: boundary condition, jet engine, dynamic analyze, kinematics, parameterization, durability, mounting unit, 3D-model, ADAMS.