

УДК 629.7.027.2

## **Моделирование динамического обжатия основной опоры шасси вертолѐта**

**Загидулин А.Р.<sup>1\*</sup>, Подружин Е.Г.<sup>2\*\*</sup>.**

<sup>1</sup>*Сибирский научно-исследовательский институт авиации имени С.А. Чаплыгина, (СибНИИА), ул. Ползунова, 21, Новосибирск, 630051, Россия*

<sup>2</sup>*Новосибирский государственный технический университет, ул. К. Маркса, 20, Новосибирск, 630051, Россия*

*\*e-mail: t-rex27@mail.ru*

*\*\*e-mail: planer@craft.nstu.ru*

### **Аннотация**

Приводится математическая модель основной опоры шасси вертолѐта Ка-62, базирующаяся на методике численного моделирования плоскопараллельного движения произвольной голономной системы твѐрдых тел. Используемая методика основана на решении уравнений Лагранжа первого рода и позволяет моделировать как двусторонние, так и односторонние связи, ограничивающие движение системы твѐрдых тел. Данная методика позволяет представлять модель в объектном виде, что даёт возможность автоматизирования процесса построения модели опоры шасси произвольной кинематической схемы. Приведены результаты расчѐта динамики основной опоры шасси Ка-62 при посадке.

**Ключевые слова:** шасси вертолѐта, жидкостно-газовый амортизатор, модель амортизации, метод неопределѐнных множителей Лагранжа

## 1. Введение

Первые работы по расчёту амортизации шасси летательных аппаратов появились ещё во втором десятилетии 20-го века. В 1919 году В. П. Ветчинкин предложил схему резино-масляной амортизации и методику расчёта площадей отверстий для перетока масла, получившую развитие в его работе [1]. Уточнение методики в связи с появлением жидкостно-газовой амортизации было выполнено А. Г. Агладзе [2]. Одними из первых работ по расчёту жидкостно-газовой амортизации шасси, с учётом инерционности деталей шасси и сил трения в уплотнениях штока амортизатора являются работы В. В. Ветчинкина [3] и А. А. Белоуса [4].

В дальнейшем появились новые работы по исследованию и расчёту жидкостно-газовой амортизации шасси летательных аппаратов, и усиливалась тенденция к более узкой специализации исследований. Вопросам исследования математических моделей амортизационных стоек шасси посвящены работы А. А. Белоуса, В. М. Дмитриева, М. В. Дмитриевой [6-7]; В. А. Белокопытова, Ю. А. Стучалкина [9], а также ряд работ иностранных авторов: М. К. Wahi [9,-10], Н. Hall [11], R. R. Allen [12]. Методика расчёта двухкамерных жидкостно-газовых амортизаторов приведена в работе Н. А. Мелик-Заде [13].

Традиционно в расчётных практиках конструкторских бюро для расчёта амортизации шасси летательных аппаратов применяются уравнения Лагранжа второго рода в обобщённых координатах. Недостатком такой методики является то, что для каждой кинематической схемы опоры шасси необходимо составлять свою систему уравнений, что является весьма трудоёмким процессом. Для новой стойки

шасси приходится, по сути, разрабатывать свою программу расчёта амортизации. В связи с этим ставится задача разработки универсальной методики моделирования амортизации шасси летательных аппаратов с жидкостно-газовыми амортизаторами для различных кинематических схем стоек.

Для решения этой задачи целесообразно использовать методику моделирования движения системы твёрдых тел с голономными связями на основе уравнений Лагранжа первого рода. Такой подход позволяет представлять модель опоры шасси в объектном виде — как совокупность объектов: твёрдых тел, силовых факторов и механических связей, что обеспечивает модульность и расширяемость моделей. Что в свою очередь даёт возможность автоматизировать процесс построения модели опоры шасси произвольной кинематической схемы. В статье представлена методика моделирования плоскопараллельного движения произвольной голономной системы твёрдых тел и приводится расчёт основной опоры шасси вертолёта Ка-62 на работоспособность с использованием программного обеспечения, основанного на предложенной методике.

## **2. Моделирование плоскопараллельного движения произвольной голономной системы твёрдых тел**

Рассматривается плоскопараллельное движение произвольной системы твёрдых тел относительно некоторой инерциальной системы отсчёта. На положения тел наложены идеальные голономные связи. Одну такую связь можно описать скалярной функцией от  $x$ :

$$C_k = f(\mathbf{x}), \quad (1)$$

где  $\mathbf{x}$  — вектор, определяющий положение тел:

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{x}_n \end{pmatrix}; \quad \mathbf{x}_i = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ \alpha_i \end{pmatrix},$$

где  $n$  — количество тел в системе;  $x_i, y_i$  — координаты центра масс  $i$ -того тела в глобальной системе координат;  $\alpha_i$  — угол поворота тела в глобальной системе координат.

Функция связи, ограничивающая положение точки одного тела прямой линией другого тела, записывается следующим образом:

$$C_k = (\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j) \cdot \mathbf{n}_j,$$

где  $\mathbf{p}_i$  — заданная точка первого тела,  $\mathbf{p}_j$  — точка на заданной линии второго тела,  $\mathbf{n}_j$  — нормаль к заданной линии второго тела.

Функция связи, ограничивающая положение двух точек двух тел заданным расстоянием:

$$C_k = (\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j)^2 - L^2,$$

где  $L$  — заданное расстояние между двумя точками.

Связь задаётся уравнением:

$$C_k(\mathbf{x}) = z_k,$$

где  $z_k = 0$  — для двусторонних связей,  $z_k \geq 0$  — для односторонних (неравенство означает, что для удовлетворения условиям, накладываемым данной связью, функция связи должна иметь любое неотрицательное значение).

Функции связей (1) для системы твёрдых тел, объединяются в вектор-столбец  $\mathbf{C}$  с размерностью  $d$ , равной количеству связей в системе:

$$\mathbf{C}(\mathbf{x}) = \mathbf{z}. \quad (2)$$

По определению идеальных связей, сумма работ всех реакций связей системы твёрдых тел на любом виртуальном перемещении равна нулю:

$$\delta A = \sum_{i=1}^n \mathbf{R}_i \cdot \delta \mathbf{x}_i = 0, \quad (3)$$

где  $\mathbf{R}_i = \begin{pmatrix} R_i^{(x)} \\ R_i^{(y)} \\ R_i^{(\alpha)} \end{pmatrix}$  — вектор суммарных реакций в связях, действующих на  $i$ -тое тело;

$n$  — количество тел в системе;  $\delta \mathbf{x}_i = \begin{pmatrix} \delta x_i \\ \delta y_i \\ \delta \alpha_i \end{pmatrix}$  — виртуальное перемещение  $i$ -того тела.

По определению виртуальных перемещений:

$$\sum_{i=1}^n \frac{\partial C_k}{\partial \mathbf{r}_i} \cdot \delta \mathbf{x}_i = 0 \quad \forall k \in [1, d], \quad (4)$$

или

$$\mathbf{J} \delta \mathbf{x} = \mathbf{0},$$

где  $\mathbf{J}$  — матрица Якоби для вектора функций связей:

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} \frac{\partial C_1}{\partial \mathbf{x}_1} & \dots & \frac{\partial C_1}{\partial \mathbf{x}_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial C_d}{\partial \mathbf{x}_1} & \dots & \frac{\partial C_d}{\partial \mathbf{x}_n} \end{pmatrix}.$$

Вектор  $\frac{\partial C_k}{\partial \mathbf{x}_i} = \left( \frac{\partial C_k}{\partial x_i} \quad \frac{\partial C_k}{\partial y_i} \quad \frac{\partial C_k}{\partial \alpha_i} \right)$  — есть градиент функции связи  $C_k$  в

пространстве  $\mathbf{x}_i$ , который задаёт направление вектора реакции  $k$ -той связи  $i$ -того тела.

Умножая слагаемые в равенстве (4) на неопределённые множители Лагранжа  $-\lambda_k$  и складывая почленно полученное выражение с равенством (3), имеем:

$$\sum_{i=1}^n \left( \mathbf{R}_i - \sum_{k=1}^d \frac{\partial C_k}{\partial \mathbf{x}_i} \lambda_k \right) \cdot \delta \mathbf{x}_i = 0. \quad (5)$$

Неопределённые множители  $-\lambda_k$  могут быть подобраны так, чтобы все векторные коэффициенты в равенстве (5) обращались в ноль [14]. Тогда:

$$\mathbf{R}_i - \sum_{k=1}^d \frac{\partial C_k}{\partial \mathbf{x}_i} \lambda_k = \mathbf{0} \quad \forall i \in [1, n],$$

или

$$\mathbf{R} - \mathbf{J}^T \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{0}, \quad (6)$$

где  $\boldsymbol{\lambda} = \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_d \end{pmatrix}$  — вектор множителей Лагранжа.

Уравнение движения записывается следующим образом:

$$\mathbf{M}\mathbf{a} - \mathbf{F} - \mathbf{R} = \mathbf{0}, \quad (7)$$

где  $\mathbf{F}$  — вектор активных сил:

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} \mathbf{F}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{F}_n \end{pmatrix}; \quad \mathbf{F}_i = \begin{pmatrix} F_i^{(x)} \\ F_i^{(y)} \\ T_i \end{pmatrix},$$

где  $F_i^{(x)}$ ,  $F_i^{(y)}$  — проекции суммарной силы, действующей на  $i$ -тое тело, на оси координат абсолютной системы отсчёта;  $T_i$  — момент сил, действующих на  $i$ -тое

тело;  $\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{d^2\mathbf{x}}{dt^2}$  — вектор ускорений;  $\mathbf{M}$  — диагональная матрица масс:

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} \mathbf{M}_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \mathbf{M}_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \mathbf{M}_n \end{pmatrix}; \quad \mathbf{M}_i = \begin{pmatrix} m_i & 0 & 0 \\ 0 & m_i & 0 \\ 0 & 0 & I_i \end{pmatrix},$$

где  $m_i$  — масса  $i$ -того тела,  $I_i$  — момент инерции  $i$ -того тела.

Уравнение (6) с учетом (7) примет вид:

$$\mathbf{M}\mathbf{a} - \mathbf{F} - \mathbf{J}^T\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{0}. \quad (8)$$

Полная вторая производная функции связи по времени:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{d}{dt} C_k(\mathbf{x}) \right) = \frac{d}{dt} \left( \sum_{i=1}^n \frac{\partial C_k}{\partial \mathbf{x}_i} \frac{d\mathbf{x}_i}{dt} \right) = \sum_{i=1}^n \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial C_k}{\partial \mathbf{x}_i} \right) \frac{d\mathbf{x}_i}{dt} + \sum_{i=1}^n \frac{\partial C_k}{\partial \mathbf{x}_i} \frac{d^2\mathbf{x}_i}{dt^2}.$$

С учётом (2) можно записать систему уравнений [16]:

$$\sum_{i=1}^n \frac{\partial C_k}{\partial \mathbf{x}_i} \frac{d^2\mathbf{x}_i}{dt^2} + h_k = z_k \quad \forall k \in [1, d]$$

или

$$\mathbf{J}\mathbf{a} + \mathbf{h} = \mathbf{z}, \quad (9)$$

$$\text{где } h_k = \sum_{i=1}^n \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial C_k}{\partial \dot{\mathbf{x}}_i} \right) \frac{d\mathbf{x}_i}{dt}.$$

Если подставить в векторное уравнение (9) выражение для вектора ускорений тел, полученное из уравнений Лагранжа (8), имеем:

$$\mathbf{JM}^{-1}\mathbf{J}^T\boldsymbol{\lambda} = -(\mathbf{JM}^{-1}\mathbf{F} + \mathbf{h}) + \mathbf{z}$$

или

$$\mathbf{A}\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{b} + \mathbf{z}, \quad (10)$$

где  $\mathbf{A} = \mathbf{JM}^{-1}\mathbf{J}^T$ ,  $\mathbf{b} = -(\mathbf{JM}^{-1}\mathbf{F} + \mathbf{h})$ .

Решение матричного уравнения (10) представляет собой так называемую задачу линейного дополнения [17].

При численном решении уравнений движения системы тел, включающей твёрдые тела со значительно различающимися массами, во избежание больших ошибок округления желательно решать уравнения не относительно скоростей, а относительно импульсов тел. Тогда система  $bn+d$  дифференциально-алгебраических уравнений плоскопараллельного движения системы из  $n$  твёрдых тел с  $d$  связями запишется следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{p}}{dt} = \mathbf{F} + \mathbf{J}^T\boldsymbol{\lambda}; \\ \frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{p}; \\ \mathbf{JM}^{-1}\mathbf{J}^T\boldsymbol{\lambda} = -(\mathbf{JM}^{-1}\mathbf{F} + \mathbf{h}) + \mathbf{z}. \end{cases}$$

где  $\mathbf{p}$  — вектор-столбец импульсов и моментов импульсов тел.

Активные силы можно задать в виде матрицы размерностью  $n \times e$ :

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} \mathbf{P}_{11} & \cdots & \mathbf{P}_{1e} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{P}_{n1} & \cdots & \mathbf{P}_{ne} \end{pmatrix},$$

где  $e$  — количество силовых факторов модели.

Каждый компонент матрицы  $\mathbf{P}_{ij}$  — это сила от  $j$ -того силового фактора, действующая на  $i$ -тое тело. При этом вектор активных сил определяется следующим образом:

$$\mathbf{F} = \mathbf{P} \mathbf{e},$$

где  $\mathbf{e}$  — вектор-столбец из единиц размерности  $e$ .

Силу, приложенную к двум точкам двух тел  $i$  и  $j$ , можно представить в следующем виде:

$$\mathbf{P}_{sk} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \forall s \in [1, n], s \neq i, s \neq j;$$

$$\mathbf{P}_{ik} = \begin{pmatrix} P_k^{(x)} \\ P_k^{(y)} \\ x_{pr}^i \cdot P_k^{(y)} - y_{pr}^i \cdot P_k^{(x)} \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{P}_{jk} = \begin{pmatrix} -P_k^{(x)} \\ -P_k^{(y)} \\ -x_{pr}^j \cdot P_k^{(y)} + y_{pr}^j \cdot P_k^{(x)} \end{pmatrix};$$

$$\begin{pmatrix} P_k^{(x)} \\ P_k^{(y)} \end{pmatrix} = \frac{P_k(t, l, v)}{l} \mathbf{1},$$

где  $P_k(t, l, v)$  — скалярная функция, определяющая величину силы;  $\mathbf{l}$  — пространственный вектор, соединяющий две точки приложения силы;  $l = |\mathbf{l}|$ ;  $v$  — относительная скорость движения точек приложения силы друг относительно друга;  $x_{pr}^i, y_{pr}^i$  — компоненты радиус-вектора точки приложения силы  $i$ -того тела в относительной системе координат (начало отсчёта относительной системы координат совпадает с центром масс тела, угол между осями относительной и глобальной системы координат равен нулю):

$$\mathbf{r}_{pr}^i = \begin{pmatrix} x_{pr}^i \\ y_{pr}^i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_i & \sin \alpha_i \\ -\sin \alpha_i & \cos \alpha_i \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_{pl}^i \\ y_{pl}^i \end{pmatrix},$$

где  $x_{pl}^i, y_{pl}^i$  — координаты точки приложения силы  $i$ -того тела в локальной системе координат тела (начало отсчёта локальной системы координат совпадает с центром масс тела, угол между осями локальной и глобальной системы координат равен углу поворота тела, т.е. локальная система координат жёстко связана с твёрдым телом).

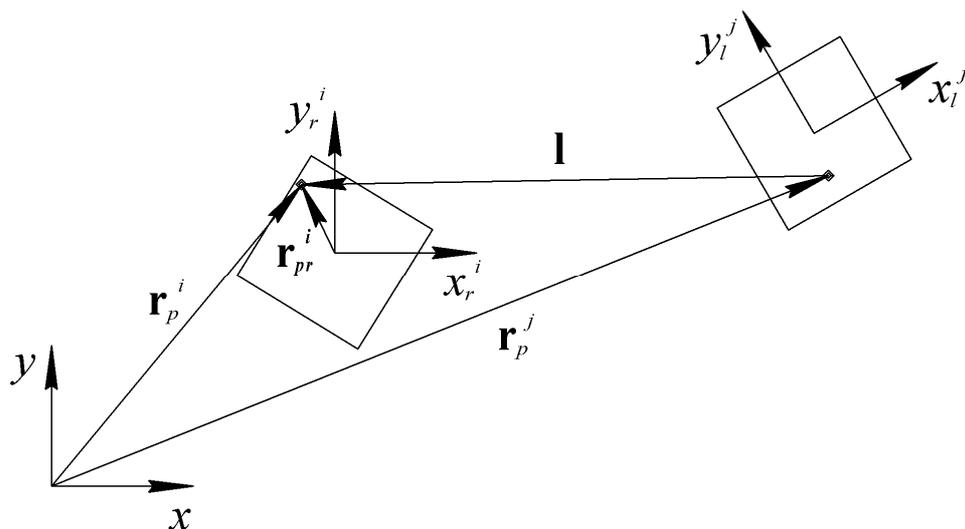


Рис. 1 Расчётная схема, для определения направления действия силы.

Вектор  $\mathbf{l}$  определяется следующим образом (рис. 1):

$$\mathbf{l} = \mathbf{r}_p^i - \mathbf{r}_p^j,$$

где  $\mathbf{r}_p^i$  — радиус-вектор точки приложения силы  $i$ -того тела в глобальной системе координат:

$$\mathbf{r}_p^i = \begin{pmatrix} x_p^i \\ y_p^i \end{pmatrix} = \mathbf{r}_{pr}^i + \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix}.$$

Скорость  $v$  определяется как:

$$v = \frac{\mathbf{l} \cdot \mathbf{v}_p^i - \mathbf{l} \cdot \mathbf{v}_p^j}{l},$$

где  $\mathbf{v}_p^i$  — вектор скорости точки приложения силы  $i$ -того тела:

$$\mathbf{v}_p^i = \begin{pmatrix} -\omega_i y_{pr}^i + v_i^{(x)} \\ \omega_i x_{pr}^i + v_i^{(y)} \end{pmatrix}.$$

Вращающий момент, действующий между двумя телами  $i$  и  $j$ , можно представить в следующем виде:

$$\mathbf{P}_{sk} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \forall s \in [1, n], s \neq i, s \neq j;$$

$$\mathbf{P}_{ik} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ T_k(t, \Delta\alpha, \Delta\omega) \end{pmatrix}; \quad \mathbf{P}_{jk} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -T_k(t, \Delta\alpha, \Delta\omega) \end{pmatrix};$$

$$\Delta\alpha = \alpha_i - \alpha_j; \quad \Delta\omega = \omega_i - \omega_j,$$

где  $T_k(t, \Delta\alpha, \Delta\omega)$  — скалярная функция вращающего момента.

Поле силы тяжести задаётся следующим образом:

$$\mathbf{P}_{ik} = \begin{pmatrix} 0 \\ -m_i g \\ 0 \end{pmatrix} \quad \forall i \in [1, n],$$

здесь  $g$  — ускорение свободного падения.

### 3. Моделирование динамического обжатия основной опоры шасси вертолёта Ка-62

Основная опора вертолёта Ка-62 выполнена по рычажной схеме (рис. 2) и состоит из рычага 1, жидкостно-газового амортизатора 2, совмещённого с гидроцилиндром уборки-выпуска, и тормозного колеса КТ217 — 3.

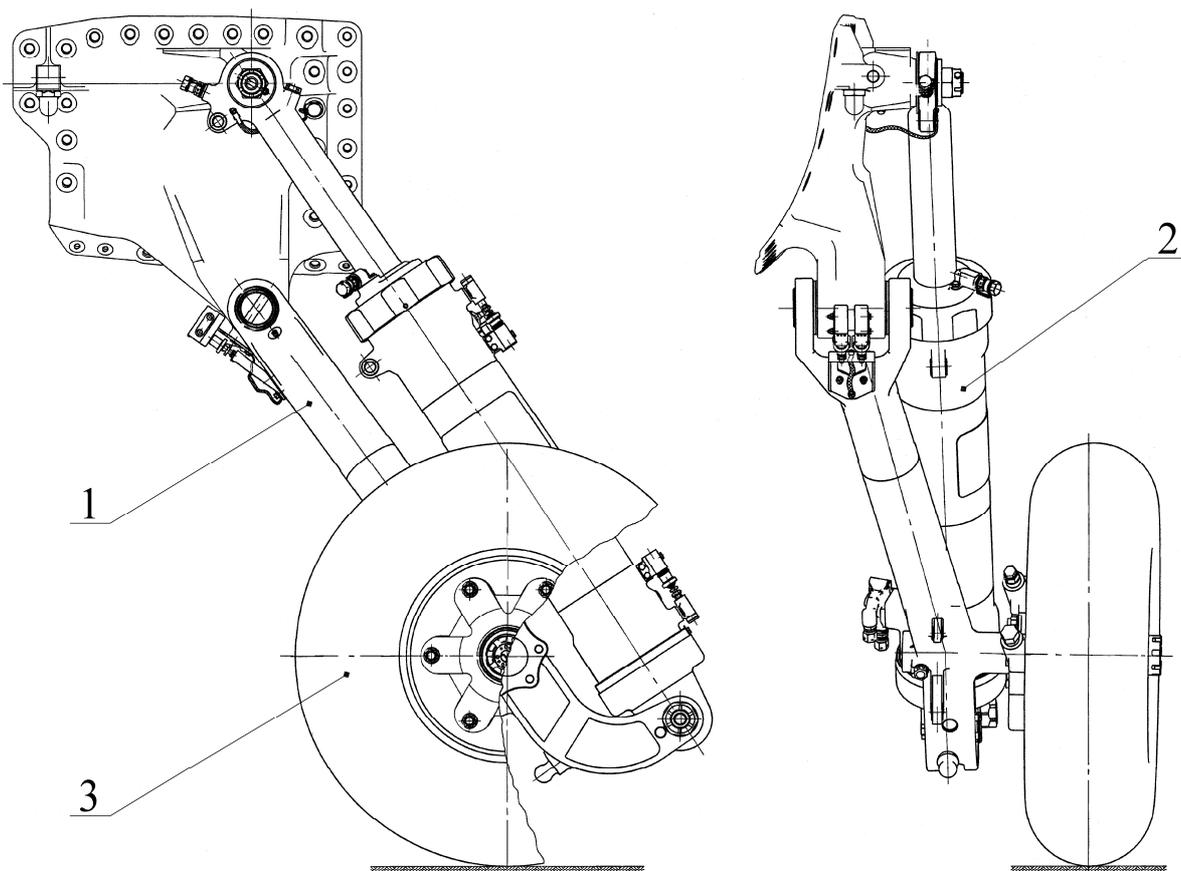


Рис. 2 Основная опора шасси вертолёта Ка-62.

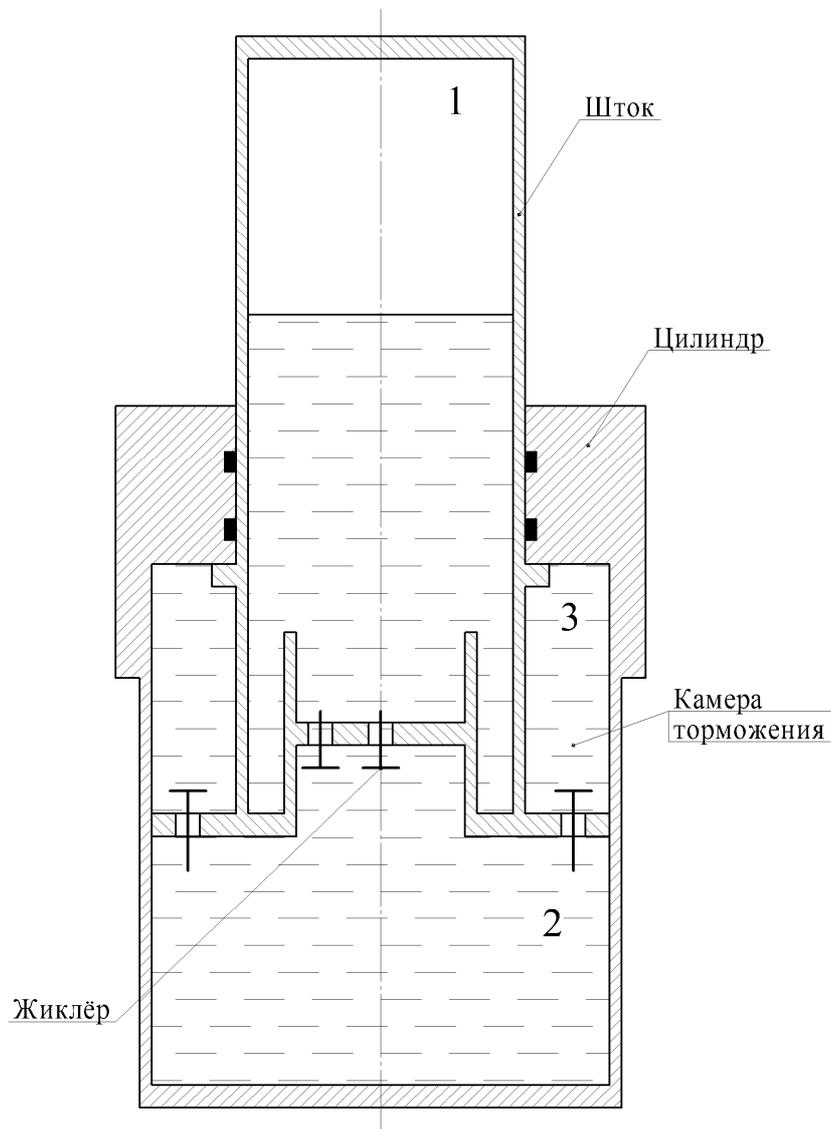


Рис. 3 Схема амортизатора

Схема амортизатора, используемая в динамической модели, представлена на рис. 3. Амортизатор представляет собой жидкостно-газовый агрегат с основной газовой камерой 1 и двумя жидкостными камерами 2 и 3.

Для моделирования динамического обжатия основной опоры шасси Ка-62 используется твёрдотельная модель, представленная на рис. 4. Модель включает 5 твёрдых тел: колесо 1, рычаг 2, шток амортизатора 3, цилиндр амортизатора 4 и груз, приходящийся на одну опору, 5.

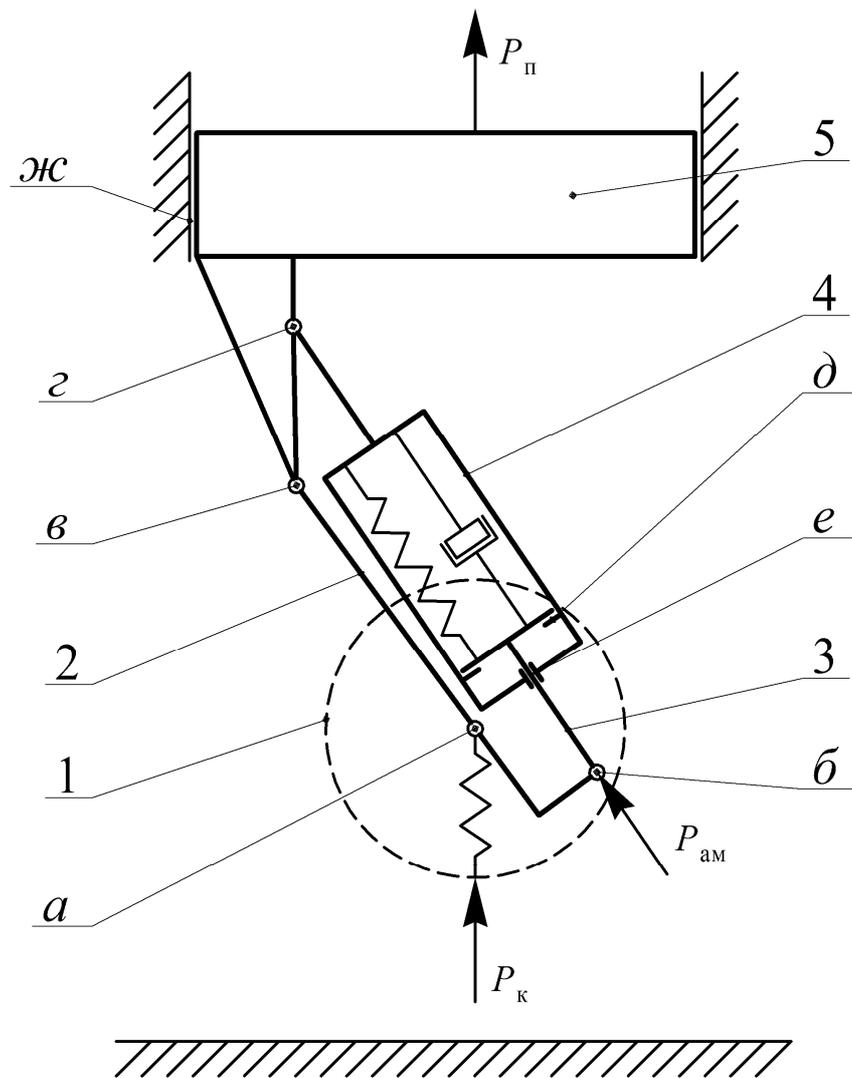


Рис. 4 Модель основной опоры шасси Ка-62.

Заданы 7 механических соединений *a*, *б*, *в*, *г*, *д*, *е* и *ж*. Соединения *a*, *б*, *в* и *г* являются шарнирами. Каждое шарнирное соединение ограничивает две степени свободы системы и задаётся двумя двусторонними связями. Скользящее соединение *e*, связывает шток амортизатора с цилиндром. В скользящей заделке *ж* закреплён груз 5. Скользящие соединения также ограничивают две степени свободы системы и задаются двумя двусторонними связями. Упор *д* ограничивает одну степень свободы и моделируется односторонней связью. Таким образом, модель включает 13 голономных механических связей. Также в модели заданы три активных силы: сила

обжатия пневматика  $P_k$ , осевая сила в амортизаторе  $P_{ам}$  и подъёмная сила  $P_p$ . В начальный момент моделирования движения системы колесо касается опорной поверхности, и система твёрдых тел имеет вертикальную скорость  $V_y$ , направленную вниз.

Осевая сила в амортизаторе  $P_{ам}$  определяется из выражения:

$$P_{ам}(s, s_2, s', s'_2) = (1 + \mu \operatorname{sgn}(s')) p_1 F + \xi_{пл} \rho F^3 (s')^2 \operatorname{sgn}(s') / 2 f_{пл}^2 + \\ + \xi_6 \rho F_3^3 (s')^2 \operatorname{sgn}(s') / 2 f_6^2,$$

где  $s$  — обжатие амортизатора;  $s'$  — скорость обжатия амортизатора;  $F = \pi D^2 / 4$  — площадь штока амортизатора;  $F_3 = \pi (D_2^2 - D^2) / 4$  — площадь третьей камеры;  $\mu = 0,07$  — суммарный коэффициент трения в бужах и уплотнениях амортизатора;  $f_{пл}$  — площадь дроссельных отверстий между камерами 1 и 2;  $f_6$  — площадь дроссельных отверстий между камерами 2 и 3;  $\xi_{пл} = 2,0$  — коэффициент гидродинамического сопротивления при дросселировании перетока жидкости между камерами 1 и 2;  $\xi_6 = 1,7$  — коэффициент гидродинамического сопротивления при дросселировании перетока жидкости между камерами 2 и 3;  $\rho = 815,0 \text{ кг/м}^3$  — массовая плотность жидкости;  $p_1$  — давление в газовой камере [13]:

$$p_1 = p_{01} / (1 - sF / \Omega_{01})^{\chi_1},$$

где  $p_{01} = 5883978 \text{ МПа}$  — начальное давление в первой камере;  $\Omega_{01} = 0,000442272 \text{ м}^3$  — начальный объём газовой камеры;  $\chi_1 = 1,15$  — показатель политропы сжатия газа в амортизаторе.

Площадь дроссельных отверстий между камерами 1 и 2 определяется из уравнения обжатия жиклёра амортизатора (рис. 5):

$$f_{\text{кл}} \xi_{12} \rho F^3 (s')^2 \operatorname{sgn}(s') / 2 f_{\text{пл}}^2 - s_{\text{кл}} C_{\text{пр}} - P_{\text{пр}0} = 0,$$

$$f_{\text{пл}} = f_{\text{пл}1} + f_{\text{пл}2},$$

где  $f_{\text{кл}}$  — площадь клапана жиклёра,  $C_{\text{пр}} = 59820,6$  Н/м — жесткость пружины жиклёра,  $P_{\text{пр}0} = 598,206$  Н — начальное усилие затяжки пружины,  $f_{\text{пл}1}$  — площадь дроссельных отверстий в штоке амортизатора,  $f_{\text{пл}2}$  — площадь дроссельного отверстия в жиклёре.

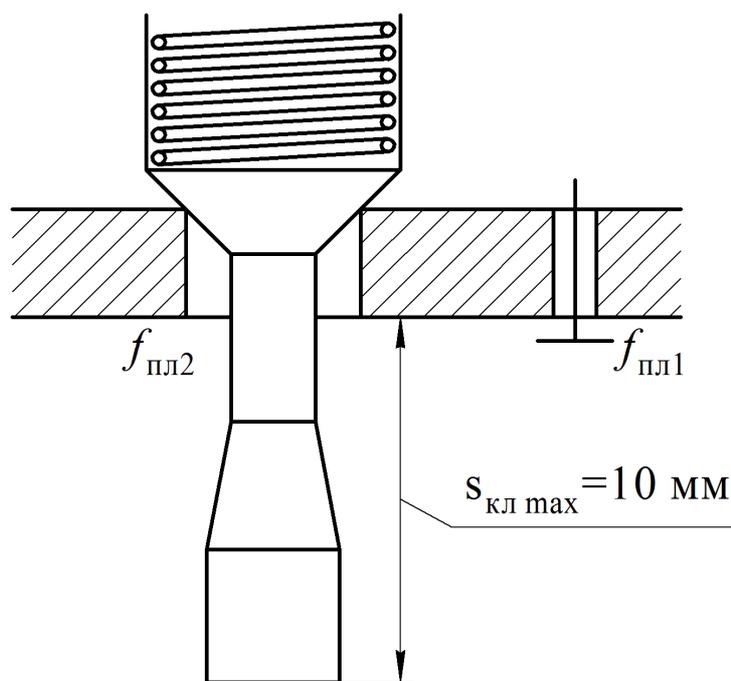


Рис. 5 Схема жиклёра амортизатора.

Площадь клапана и дроссельного отверстия жиклера определяются по заданному профилю клапана в зависимости от величины хода клапана.

Выражение для силы обжатия пневматика можно записать в следующем виде [18]:

$$P_{\kappa}(\delta) = \frac{k\delta}{\left(1 - \frac{\delta}{\delta_{max}}\right)^{\alpha}},$$

где  $k$  — жесткость пневматика;  $\delta$  — обжатие пневматика;  $\delta_{max}$  — максимально допустимое обжатие пневматика;  $\alpha = 0...0,5$  — коэффициент, учитывающий нелинейность диаграммы обжатия пневматика.

#### 4. Диаграммы обжатия опоры шасси

Предложенная в статье методика была реализована в виде программы на языке программирования «Java», с помощью которой были проведены расчёты, моделирующие обжатие основной опоры шасси вертолёта Ка-62 при посадке.

При этом были приняты следующие исходные параметры:

масса груза, приходящегося на основную опору  $M = 2500$  кг;

вертикальная скорость стойки в момент касания  $V_y = 2,0$  м/с;

подъёмная сила  $F_{\pi} = 24516,625$  Н;

диаметр штока амортизатора  $D = 0,06$  м;

диаметр третьей камеры  $D_3 = 0,075$  м;

площадь дроссельных отверстий между камерами 1 и 2:

на прямом ходу  $f_{пл1 пр} = 0,0000028$  м<sup>2</sup>, на обратном ходу  $f_{пл1 об} = 0,00005$  м<sup>2</sup>;

площадь дроссельных отверстий между камерами 2 и 3:

на прямом ходе  $f_{б пр} = 0,0002$  м<sup>2</sup>, на обратном ходе  $f_{б об} = 0,000003$  м<sup>2</sup>;

площадь отверстия жиклёра  $f_d = 0,0002$  м<sup>2</sup>.

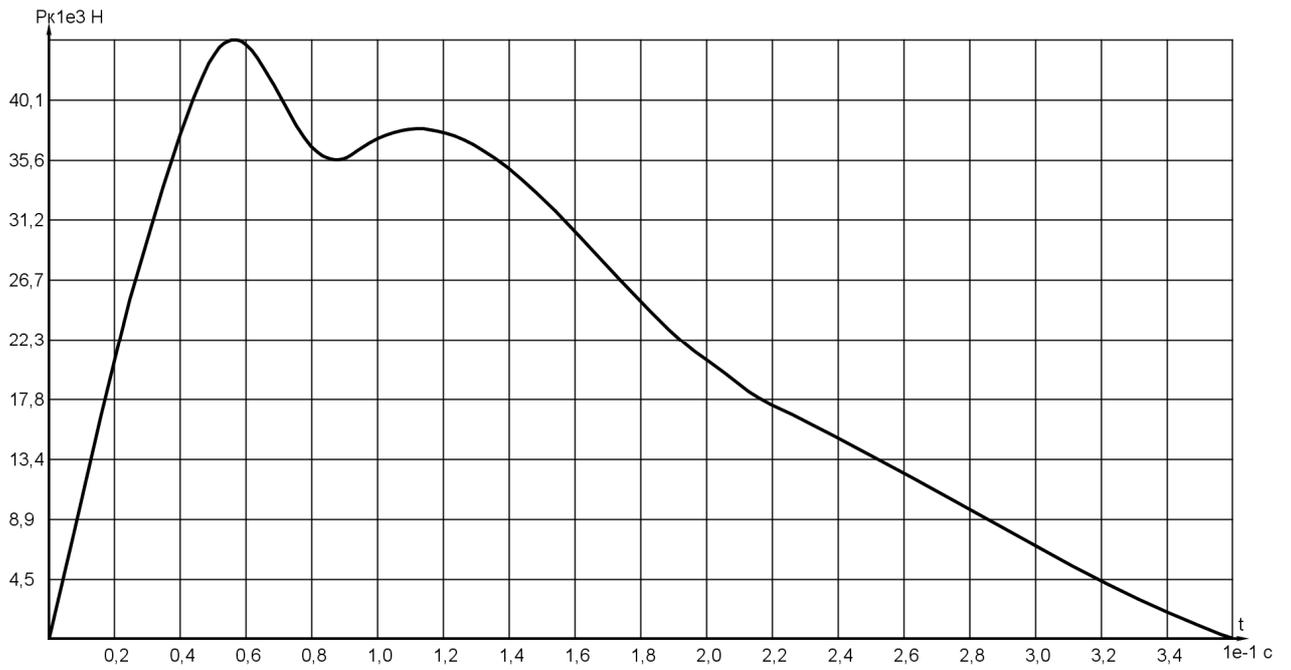


Рис. 6 Диаграмма вертикальной нагрузки на колесо по времени.

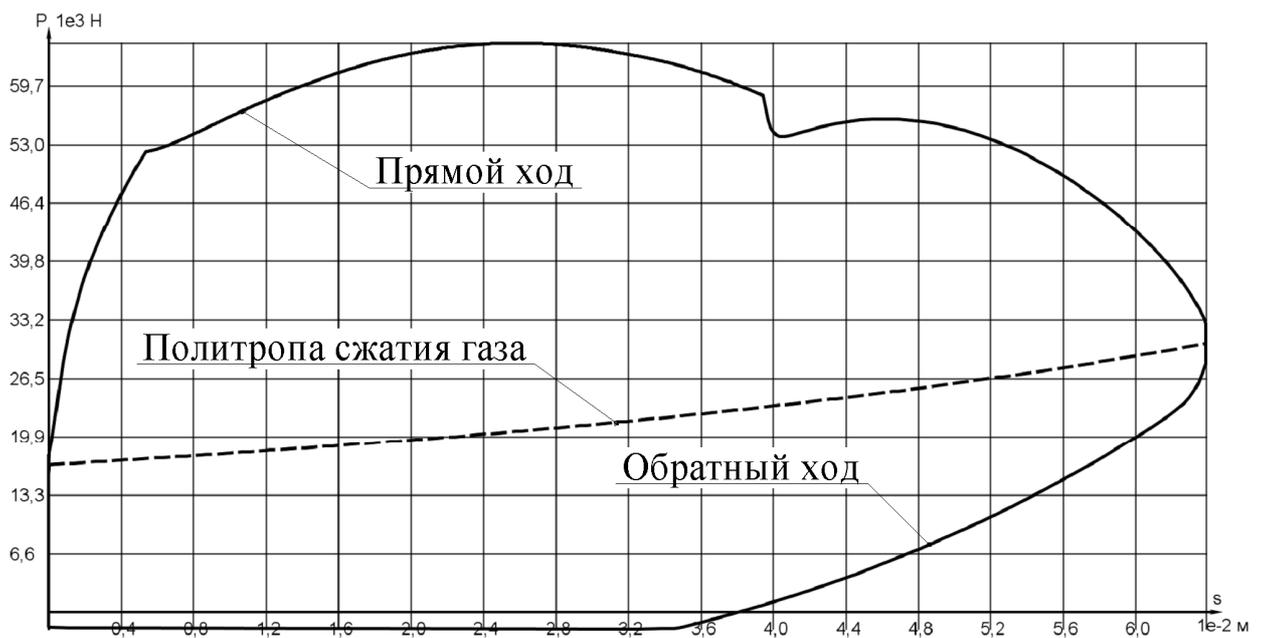


Рис. 7 Диаграмма осевого усилия в амортизаторе и политропа сжатия газа по ходу штока.

Необходимые для расчётов размеры стойки шасси и амортизатора были взяты из чертежей технического описания, там же приведены давление зарядки воздушной

камеры и объём жидкости, заливаемой в амортизатор и характеристики пневматика колеса. Шаг численного интегрирования составлял 0,005 мс.

На рис. 6 представлена зависимость вертикального усилия, действующего на колесо от времени. На рис. 7 приведена зависимость усилия в штоке амортизатора от обжатия амортизатора, а также политропа сжатия газа в первой камере амортизатора. Рассчитанные по предложенной методике диаграммы обжатия основной опоры шасси вертолѐта Ка-62 хорошо согласуются с результатами расчѐтов, выполненных в ОАО «Авиаагрегат», являющемся разработчиком данной опоры шасси. Гистерезис энергии составил 82 %, а суммарное время прямого и обратного хода штока амортизатора 0,54 с. Следующим этапом данной работы предполагается сравнение результатов проектировочного расчѐта с экспериментом, подготовка к которому проводится в настоящее время. Следует отметить, что предлагаемая методика хорошо зарекомендовала себя при сравнении результатов расчѐта с данными, полученными в ходе копровых испытаний основной стойки шасси самолѐта Ту-204СМ.

## **5. Заключение**

Представленная методика расчѐта жидкостно-газовой амортизации шасси ЛА, реализованная на языке программирования «Java», отличается от использовавшихся ранее методов расчѐта с помощью уравнений Лагранжа второго рода, прежде всего универсальностью. При изменении системы твёрдых тел нет необходимости заново переписывать уравнения движения в обобщенных координатах (а заодно и определять эти координаты, исключая «лишние» с помощью уравнений связей).

Изменяется лишь размерность системы, а вид уравнений неизменен. Такой универсальный подход более алгоритмичен и прост при численной реализации. Интегрирование системы уравнений затруднений не представляет, особенно если разыскивать не скорости тел, а их импульсы (массы твёрдых тел могут различаться на порядки). Созданная программа расчёта имеет простой и удобный интерфейс, что позволяет быстро её перенастраивать под другие задачи. Достоинства предлагаемой методики расчёта очевидны, что позволяет рекомендовать её для решения широкого круга задач динамики систем твёрдых тел.

### **Библиографический список**

1. Ветчинкин В.П. Динамика полета / М.: Гууз нктп, 1933. — 33 с.
2. Агладзе Г. Конструирование и расчёт масляных амортизаторов шасси самолетов: Технические заметки ЦАГИ / М.: БНИИ ЦАГИ, 1935. — № 59. — 47 с.
3. Ветчинкин, В.П. Материалы по расчёту и проектированию упруго-гидравлической амортизации шасси самолета: Труды ЦАГИ / М.: БНТ ЦАГИ, 1946. — № 592. — 104 с.
4. Белоус А.А. Методы расчёта масляно-пневматической амортизации: Труды ЦАГИ / М.: БНТ ЦАГИ, 1947. — Вып.622. — 104 с.
5. Дмитриева М.В. Расчёт амортизации шасси телескопического типа: Труды ЦАГИ / М.: БНТ ЦАГИ, 1967. — Вып.1064. — 38 с.
6. Дмитриева М.В. Расчёт амортизации шасси с рычажной подвеской колёс: Труды ЦАГИ / М.: БНТ ЦАГИ, 1971. — Вып. 1394. — 48 с.

7. Белоус А.А. Амортизация полурычажного шасси самолёта: Труды ЦАГИ / А.А. Белоус, М.В. Дмитриева / М.: БНТ ЦАГИ, 1969. — Вып.1177. — 43 с.
8. Белокопытов В.А. Метод расчёта динамического нагружения при посадке самолета с крылом малого удлинения по заданным силам на шасси: Труды ЦАГИ / В.А. Белокопытов Ю.А. Стучалкин. — М.: БНИ ЦАГИ, 1966. — Вып.1023. — 41 с.
9. Oleopneumatic Shock Strut Dynamic Analysis and It's Real-Time Simulation / M.K. Wahi // J. of Aircraft. — 1976. — Vol.13. № 4. — p.303 — 309.
10. Oil Compressibility and Polytropic Air Compression an Analysis for Oleopneumatic Shock Struts / M.K. Wahi // J. of Aircraft. — 1976. — Vol.13. № 7. — p.299 — 305.
11. Hall H. Some Theoretical Research of Characteristics for Landing Gear With Oleo Shock Absorber / ARC Current Papers. — London, 1967. — 30 p.
12. Allen R.R. Hydromechanical Dynamics of Aircraft Landing Gear // J. of Fluid Control. — 1981. — Vol.13. № 4. — p.57 — 78.
13. Работа двухкамерного гидравлического амортизатора / Мелик-Заде Н.А. // Машиноведение. — М., 1971. — №2. — С. 44-50.
14. Гантмахер Ф.Р. Лекции по аналитической механике / М.: Изд-во «Наука», 1966. — 300 с.
15. Linear-Time Dynamics using Lagrange Multipliers / D. Baraff // COMPUTER GRAPHICS Proceedings, Annual Conference Series, 1996, — С. 137–146.
16. The Linear Complementarity Problem / R.W. Cottle, J.S. Pang, R.E. Stone // Academic Press, Inc., 1992.

17.Подружин Е.Г. Расчет жидкостно-газовой амортизации шасси самолета / Е.Г. Подружин, Г.И. Расторгуев. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. — 63 с.