

УДК 629.735.015:681.3

## Особенности определения наземных нагрузок на ВС при движении по ВПП с помощью математического моделирования

Н.Б. Бехтина

Аннотация: Существует дефицит данных повторяемости наземных нагрузок по сравнению с нагрузками от порывов ветра и маневренными нагрузками на воздушное судно (ВС) в полете. Наиболее продуктивным методом исследования данной проблемы является система математического моделирования (ММ) динамики полета ВС на этапах взлета и посадки, разработанная на кафедре АКПЛА МГТУГА.

Ключевые слова: наземные нагрузки; математическое моделирование; безопасность полетов; сложные метеоусловия.

### Введение

Первопричиной усталостных разрушений являются повторные нагрузки, действующие на воздушное судно (ВС) при его эксплуатации. Основные факторы, влияющие на нагруженность ВС при эксплуатации, представлены на рис.1 [1].



Рис. 1

Наземные нагрузки при движении по взлетно - посадочной полосе (ВПП) и рулежным дорожкам (РД) определяются силами взаимодействия опор шасси и поверхности ВПП и РД и

зависят от скорости движения ВС, состояния покрытия, характеристик амортизации шасси, работы антиюзовой автоматики, характеристик пневматика.

Величина и интенсивность динамического обжатия пневматика в основном зависят от величины и характера нарастания вертикальной перегрузки. Однако ввиду того, что к вертикальному компоненту перегрузки добавляются значительные по величине продольный и поперечный компоненты, направление результирующей нагрузки проходит под некоторым углом к оси симметрии колеса и вертикали. В результате чего имеют место сложные деформации пневматика (обжатие его по вертикали, смещение вбок и продольное смещение в плоскости симметрии колеса). Кроме того, на характер обжатия пневматика влияют центробежные силы его вращающихся масс.

Вертикальная скорость приземления является наиболее важным параметром, определяющим вертикальную перегрузку. На величину вертикальной скорости при приземлении существенное влияние оказывают внешние условия посадки: видимость взлетно-посадочной полосы, боковой ветер, местный уклон ВПП в месте приземления и т.д. Таким образом, процесс наземного нагружения ВС носит динамический характер.

В общем случае разброс повторяемости наземных нагрузок для всех транспортных самолетов на режиме приземления может достигать 15 - 20 раз [1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12].

Разработанная на кафедре АКПЛА (МГТУ ГА) система математического моделирования динамики полета (СММ ДП) открывает широкие возможности для получения дополнительной информации о наземных нагрузках на ВС при движении по ВПП [12,13].

### **Система математического моделирования динамики полета летательного аппарата (СММ ДП ЛА)**

Математическая модель (ММ) любого ВС, составленная с помощью СММ ДП ЛА (рис.2), использует полную систему уравнений движения, полученную из основных теорем динамики твердого тела и кинематических соотношений при следующих допущениях:

- самолет рассматривается как абсолютно твердое тело (явления аэроупругости отражаются, как это практикуется в авиационной промышленности, с помощью дополнительных составляющих в аэродинамических характеристиках);
- конфигурация самолета имеет плоскость симметрии, но центр массы может располагаться на небольшом расстоянии от этой плоскости;
- моменты инерции самолета могут изменяться в процессе полета в зависимости от остатка топлива;

– из-за малости не учитываются кориолисовы и центробежные силы, связанные с вращением земли, что позволяет считать инерциальной систему координат, связанную с центром масс ВС;

– ускорение свободного падения полагается постоянным;

– шасси представляется подвижной массой, находящейся под действием нелинейных упругих (газовые амортизаторы, пружины, рессоры, пневматики) и диссипативных (жидкостные амортизаторы, трение) сил;

– сила тяги каждого двигателя представляется вектором переменной длины (с учетом приемистости и выбега), но постоянного направления;

– органы управления – "самолетного" типа (РУД, закрылки, предкрылки, регулируемый стабилизатор, элероны, руль направления, руль высоты, одна управляемая стойка шасси, тормоза колес, тормозные щитки, спойлеры и интерцепторы).

В СММ ДП ЛА для интегрирования системы дифференциальных уравнений движения с заданными начальными условиями – решения задачи Коши – выбран численный метод Рунге-Кутты 2 порядка с автоматическим выбором шага. Он имеет все преимущества методов этого типа – вычислительную устойчивость, возможность отслеживать погрешность и менять шаг интегрирования.

Для обеспечения необходимого уровня адекватности СММ была уточнена и расширена в части описания взаимодействия колес шасси с ВПП в продольном и поперечном направлениях в зависимости от метеоусловий, геометрического профиля и состояния покрытия [12, 13].

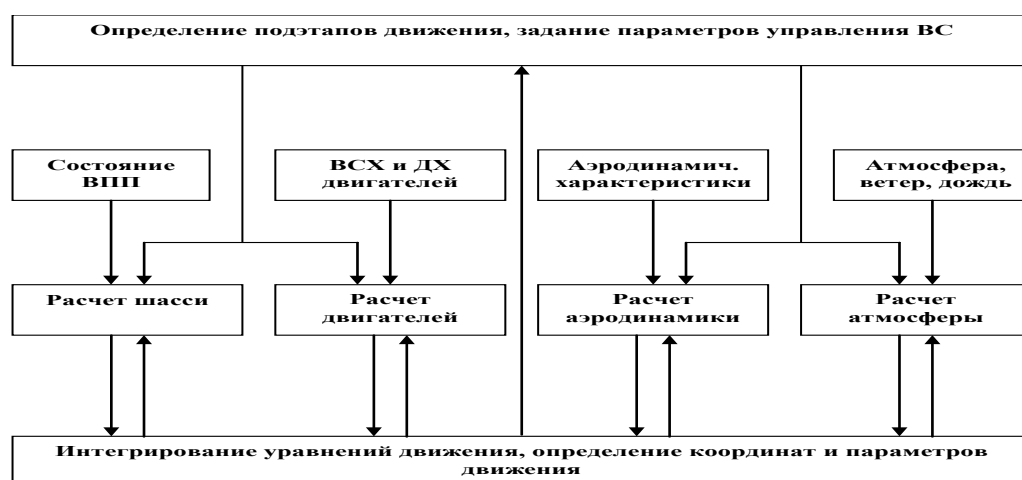


Рис. 2

В итоге полная система дифференциальных уравнений динамики ВС, принятая в СММ ДП ЛА, в координатной форме имеет вид:

$$\frac{dV_{kx}}{dt} = \omega_z V_{ky} - \omega_y V_{kz} + \frac{P_x - X + F_{\text{шx}}}{m} - g \sin \vartheta, \quad (1)$$

$$\frac{dV_{ky}}{dt} = \omega_x V_{kz} - \omega_z V_{kx} + \frac{P_y - Y + F_{\text{шы}}}{m} - g \cos \vartheta \sin \gamma, \quad (2)$$

$$\frac{dV_{kz}}{dt} = \omega_y V_{kx} - \omega_x V_{ky} + \frac{P_z - Z + F_{\text{шz}}}{m} + g \cos \vartheta \cos \gamma, \quad (3)$$

$$\frac{d\omega_x}{dt} = \frac{\omega_y \omega_z (I_y^2 - I_y I_z + I_{xy}^2) - I_{xy} \omega_x \omega_z (I_y - I_z + I_x) + I_y E_x + I_{xy} E_y}{I_x I_y - I_{xy}^2}, \quad (4)$$

$$\frac{d\omega_y}{dt} = \frac{I_{xy} \omega_y \omega_z (I_y - I_z + I_x) - \omega_x \omega_z (I_x^2 - I_x I_z + I_{xy}^2) + I_x E_y + I_{xy} E_x}{I_x I_y - I_{xy}^2}, \quad (5)$$

$$\frac{d\omega_z}{dt} = \frac{\omega_x \omega_y (I_x - I_y) + I_{xy} (\omega_x^2 - \omega_y^2) + E_z}{I_z}, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dt} = & V_{kx} \cos \vartheta \cos \psi + V_{ky} (\sin \gamma \sin \psi - \sin \vartheta \cos \gamma \cos \psi) + \\ & + V_{kz} (\cos \gamma \sin \psi + \sin \vartheta \sin \gamma \cos \psi), \end{aligned} \quad (7)$$

$$\frac{dH}{dt} = V_{kx} \sin \vartheta + V_{ky} \cos \vartheta \cos \gamma - V_{kz} \cos \vartheta \sin \gamma, \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{dZ}{dt} = & -V_{kx} \cos \vartheta \sin \psi + V_{ky} (\sin \gamma \cos \psi + \sin \vartheta \cos \gamma \sin \psi) + \\ & + V_{kz} (\cos \gamma \cos \psi + \sin \vartheta \sin \gamma \sin \psi), \end{aligned} \quad (9)$$

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \omega_y \sin \gamma + \omega_z \cos \gamma, \quad (10)$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{\omega_x - \sin \vartheta (\omega_y \cos \gamma - \omega_z \sin \gamma)}{\cos \vartheta}, \quad (11)$$

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{\omega_y \cos \gamma - \omega_z \sin \gamma}{\cos \vartheta}, \quad (12)$$

$$\frac{dm}{dt} = - \sum_i^{n_{\text{ДВ}}} C_{ei} P_i, \quad (13)$$

где все переменные в связанной системе координат:  $V_{kx}, V_{ky}, V_{kz}$  – координаты вектора земной скорости;  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  – координаты вектора угловой скорости вращения ВС;  $P_x, P_y, P_z$  – координаты вектора суммарной тяги двигателей;  $X, Y, Z$  – аэродинамические

продольная, нормальная и поперечная силы;  $F_{шх}, F_{шы}, F_{шz}$  – координаты вектора суммарной силы от шасси;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $\vartheta, \gamma, \psi$  – углы тангажа, крена и рыскания;  $I_x, I_y, I_z, I_{xy}$  – моменты инерции ВС;  $E_x, E_y, E_z$  – координаты вектора суммарного момента, отнесенного к массе ВС;  $L, H, z$  – дальность, высота и боковое смещение ВС;  $C_{ei}, P_i$  – удельный секундный расход топлива и абсолютная величина тяги  $i$ -го двигателя,  $n_{дв}$  – число двигателей на ЛА.

## ММ взаимодействия пневматика шасси с ВПП

### Продольный коэффициент сцепления

$$\mu_{ПР} = M_{ПР}(\mu_{ВПП}, P_{ПН}) \left[ \sqrt{M_{ПР}(\mu_{ВПП}, P_{ПН}) - \mu_0} + (1 - \sqrt{M_{ПР}(\mu_{ВПП}, P_{ПН}) - \mu_0}) e^{-a(V-40)} \right] - b, \quad (14)$$

$$a = \begin{cases} 0,000057 + 0,000304 \cdot e^{-\frac{(P_{ПН}^2 - 34,8)^2}{627}} & \text{для сухой и мокрой ВПП,} \\ 0,000057 + 0,000304 \cdot e^{-\frac{(P_{ПН}^2 - 62,2)^2}{1160}} & \text{для ВПП со слоем снега,} \end{cases}$$

"Минимодель" аппроксимации коэффициента  $b$  может быть принята в виде:

$$b = \begin{cases} -0,25 \cdot (0,1 \cdot P_{ПН} - 0,16)^2 + 0,395 & \text{для сухой ВПП,} \\ 0,458 \cdot (0,1 \cdot P_{ПН} - 1,045)^2 + 0,119 & \text{для мокрой ВПП,} \\ 0,29 \cdot (0,1 \cdot P_{ПН} - 0,67)^2 + 0,201 & \text{для ВПП со слоем снега,} \end{cases}$$

### Поперечный коэффициент сцепления колеса с ВПП

$$\mu_{z0} \equiv \frac{P_z}{P_y} = \frac{P_z}{P_N} \cdot \frac{P_N}{P_y} = A \frac{P_y}{P_N} \cdot \exp \left[ -B \left( \frac{P_y}{P_N} \right)^C \right] \cdot \frac{P_N}{P_y} = A \exp \left[ -B \left( \frac{P_y}{P_N} \right)^C \right], \quad (15)$$

$$1. A_m = 1, B_m = \frac{0,427 + 2,547e^{-0,173 \cdot \delta}}{\delta^{0,01}};$$

$$2. \mu_{zm} = A_m \exp \left[ -B_m \left( \frac{P_y}{P_N} \right)^{C_m} \right];$$

$$3. A_{\delta} = 0,665, B_{\delta} = \frac{0,082 + 2,644e^{-0,256 \cdot \delta}}{\delta^{0,01}};$$

$$4. \mu_{z\delta} = A_{\delta} \exp \left[ -B_{\delta} \left( \frac{P_y}{P_N} \right)^{C_{\delta}} \right];$$

На рис. 3 - 5 представлен пример моделирования движения по ВПП самолета ТУ-204

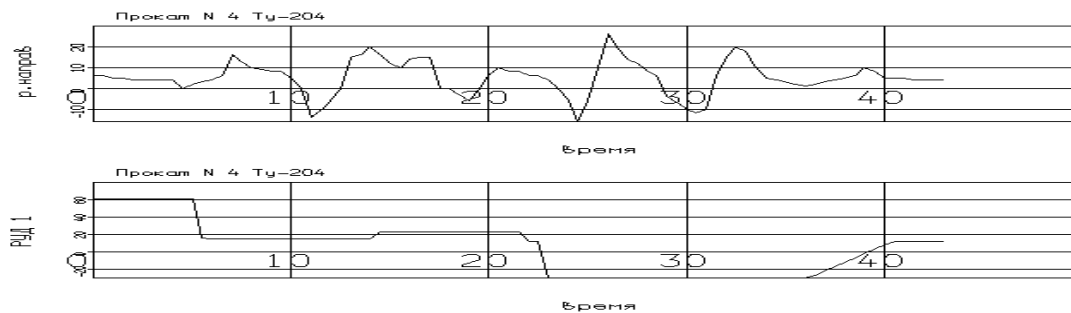


Рис. 3

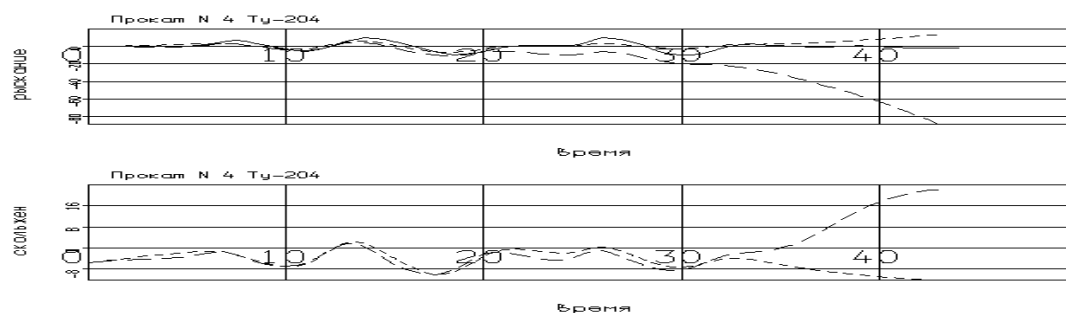


Рис. 4

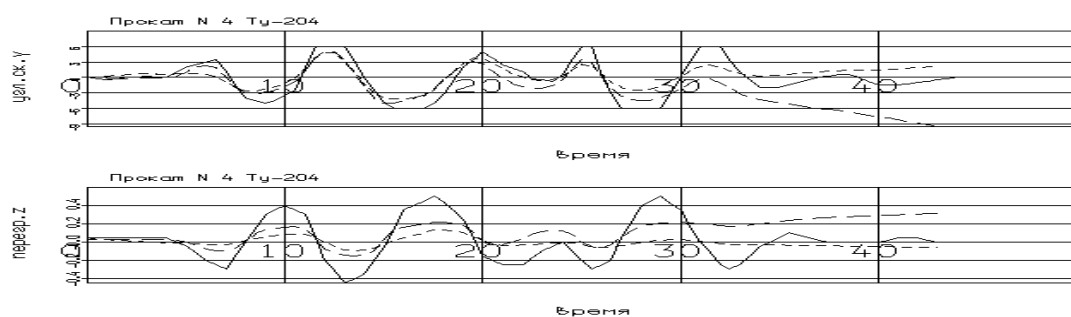


Рис. 5

### Обсуждение результатов

Математическое моделирование движения ВС на основе СММ ДП ЛА позволяет:

1. определять наземные нагрузки, возникающие при движении ВС по ВПП в зависимости от влияния различных факторов (скорости ВС, метеоусловий, состояния покрытия ВПП, работы антиюзовой автоматики, давления в пневматике и т.д.);

2. обеспечивает экономию ресурсов за счет сокращения объема ЛИ;

3. проводить исследования специалистам различных направлений: в области проектирования перспективных ВС, эксплуатации существующего парка самолетов, а также проектирования и эксплуатации аэродромов.

### Библиографический список

1. А.Н. Арепьев, М.С. Громов, В.С. Шапкин Вопросы эксплуатационной живучести авиаконструкций. –Воздушный транспорт, М., 2002. - 424с.

2. Блохин В.И., Белинский И.А., Ципранович И.В., Билеуш А.И. Аэродромы гражданской авиации. –Воздушный транспорт, М., 1996. -400с.
3. Виноградов А.П. Оценка эксплуатационно-технического состояния цементобетонных покрытий аэродромов. Тр. ГосНИИГА, вып.237 «Аэродромные сооружения, механизация производственных процессов аэропортов». –М., ГосНИИГА,1984, с. 11-13.
4. Изыскание и проектирование аэродромов: Учебник для вузов /Глушков Г.И., Бабков В.Ф., Городецкий М.И., Смирнов Транспорт, М., 1981.—616с.
5. Седергрэн Г.Р. Дренаж дорожных одежд и аэродромных покрытий: Пер. с англ. М., Транспорт, 1981. -280 с.
6. Смирнов Э.Н., Соколов В.С., Баловнев И.И. Организация планирования и методы ремонта аэродромных покрытий. М., Транспорт. 1978. 232 с.
7. СНиП 2.05.08-85.Аэродромы / Госстрой СССР. М., ЦИТП Госстроя СССР, 1985.-59с.
8. Чудаков Е.А. Качение автомобильного колеса. Изд-во АН СССР,1948. 200с.
9. Белинский И.А. Организация и технология работ по зимнему содержанию аэродромов ГА РИО КИИГА Киев, 1978. 70с.
10. Белинский И.А., Смородов Ю.А., Соколов В.С. Зимнее содержание аэродромов М.: Транспорт 1982 – 192с.
11. Татаринов В.В. Определение спектрального состава неровностей аэродромных покрытий с учетом их динамического воздействия на воздушное судно. «Проектирование аэродромов и эксплуатационная оценка прочности сооружений» Сборник научных трудов МАДИ, издание МАДИ, 1985. – с. 73 – 80.
12. Кубланов М.С. Об адекватности математических моделей и задаче идентификации//Научный вестник МГТУГА, серия Аэромеханика и прочность, №138,2009, с.101-106
13. Бехтина Н.Б., Кубланов М.С.Проблемы математического моделирования движения тяжелых транспортных самолетов по скоростным рулежным дорожкам // Научный Вестник МГТУ ГА, серия Аэромеханика и прочность. №172, 2011, с.7-11.

#### **Сведения об авторе**

Бехтина Наталия Борисовна; доцент МГТУ ГА; к.т.н.; тел.: 89162165469;  
e-mail [NBMIIGA@yandex.ru](mailto:NBMIIGA@yandex.ru)