

УДК 629.735.015:681.3

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ ТРАНСПОРТНЫХ САМОЛЕТОВ НА ПОСАДКЕ

Н.Б. БЕХТИНА, Н.А. СМЕТАНИНА

Как известно, при движении летательного аппарата (ЛА) давление на покрытие ИВПП и РД не остается постоянным. Одним из факторов, оказывающих значительное влияние на возникновение выкатывания ВС за пределы взлетно-посадочных полос (ВПП), является пониженный коэффициент сцепления. В работе исследуются теоретические и экспериментальные способы определения коэффициента сцепления и предлагается математическая модель, учитывающая основные факторы, влияющие на его величину. Глиссирование колес – наиболее неблагоприятный случай движения ВС на посадке, который возникает на мокрых или покрытых слякотью ВПП, сила продольного и бокового сцепления при этом уменьшается практически до нуля. Исследованиями установлено, что на возникновение динамического глиссирования наибольшее влияние оказывают: глубина слоя слякоти и ее плотность, давление в шинах шасси, рисунок и степень износа протектора, а также структура поверхности покрытия ВПП. При моделировании важно добиться достоверного описания работы пневматика, так как увеличение скорости демпфирования проявляет релаксационные свойства резины – отставание изменения деформации от изменения нагрузки (необходимо учитывать нелинейные и гистерезисные свойства). Предлагается способ оценки вышеизложенных явлений на основе исследования взаимодействия пневматика шасси с покрытием ИВПП при помощи системы математического моделирования динамики полета летательного аппарата (СММ ДП ЛА). В статье предложена методика аналитического описания движения ВС при посадке на ВПП, покрытую слякотью.

Ключевые слова: математическое моделирование, состояние взлетно-посадочной полосы, движение по полосе, пневматик шасси.

Известно, что выкатывания самолета являются одним из наиболее распространенных видов предпосылок к авиационным происшествиям. Случаи выкатывания, как правило, обусловлены следующими факторами или их неблагоприятным сочетанием:

- наличие на ВПП воды, снега, слякоти, льда или инея;
- неблагоприятными метеорологическими условиями;
- боковым или попутным ветром, порывами или сдвигом ветра;
- особенностями конструкции самолета, влияющими на его путевую управляемость.

Для определения факторов, приведших к выкатыванию самолета, используются записи бортовых самописцев, кроки движения самолета в процессе выкатывания, данные по метеоусловиям, по состоянию ВПП и т. д.

При наличии на ВПП слоя осадков толщиной более 3–5 мм поправка на увеличение длины пробега принимается по графикам РЛЭ (руководство по летной эксплуатации) пересчета посадочной дистанции на такие условия состояния ВПП, при этом коэффициент сцепления не учитывается. Если же таких графиков в РЛЭ рассматриваемого самолета нет, то такой расчет выполняется по коэффициенту сцепления, замеренному аэродромными службами.

Состояние поверхности ВПП характеризуется величиной нормативного коэффициента сцепления μ , определяющего условия торможения самолетов. Кроме коэффициента сцепления состояние ВПП дополнительно характеризуется наличием на поверхности покрытий атмосферных осадков в виде снега, слякоти и воды.

С целью реализации предельных величин коэффициента сцепления и предотвращения возникновения юза современные самолеты оснащаются специальными автоматическими системами торможения.

Горизонтальные силы трения пневматиков о поверхность ВПП определяются по формуле

$$T_i = \mu F_i^{\text{ПН}}, \quad (1)$$

где μ – коэффициент сцепления колес, являющийся функцией относительной приведенной окружной скорости колеса.

$$V_i = 1 - \frac{V_{\text{юкр}}}{V_{\text{пос}}} = 1 - \frac{\omega_i(R_k - 0,33\delta_i^{\text{пн}})}{V_{\text{пос}}}, \quad (2)$$

где $V_{\text{пос}}$ – посадочная скорость, R_k – радиус колеса, $\delta_i^{\text{пн}}$ – обжатие ω_i угловая скорость i -го колеса.

В [1–7] рассмотрены проблемы, возникающие в процессе точного определения состояния поверхности ВПП и соответственно истинного значения силы трения и коэффициента сцепления.

При движении самолета по поверхности ИВПП (искусственная взлетно-посадочная полоса) или ГВПП (грунтовая взлетно-посадочная полоса), покрытой слоем рыхлого снега, пневматики испытывают дополнительное сопротивление качению, которое возникает как результат противодействия снега передаче на него сдвигающих и сжимающих (сминающих) нагрузок. Величина этого сопротивления (как и при любом другом состоянии поверхности аэродромного покрытия) характеризуется коэффициентом сопротивления качению

$$f = \frac{F_{\text{сопр}}}{P}, \quad (3)$$

где $F_{\text{сопр}}$ – сила сопротивления перекатыванию незаторможенного колеса, кгс;
 P – вертикальная нагрузка на колесо, кгс.

Наличие на покрытиях рыхлого сухого снега приводит к значительному возрастанию сопротивления качению колес самолета (в зависимости от толщины слоя снега коэффициент f может достигать значений 0,20, что в 10 раз превосходит среднюю величину f для сухих бетонных и асфальтобетонных покрытий).

Движение (качение) колес самолетов по уплотненным снеговым покрытиям имеет свои особенности, связанные с процессом колееобразования. Сущность этого процесса состоит в том, что под воздействием подвижной колесной нагрузки (определенной величины) в уплотненном снегу возникает напряженное состояние, в результате которого внутренняя связность снега нарушается, и он получает необратимые деформации – происходит осадка снега в виде колеи.

При образовании колеи колеса испытывают встречное сопротивление со стороны уплотненного снега, которое в случае посадки самолета способствует уменьшению дистанции торможения колес на пробеге. Указанное сопротивление зависит главным образом от прочности снега: чем она выше, тем меньше глубина образующихся колеи; сопротивление движению колес могут быть настолько велики, что возникает опасность капотирования самолета, особенно не имеющего носовой опоры шасси.

Практика показывает, что наиболее интенсивное колееобразование на снеговых покрытиях наблюдается в зонах приземления самолетов, на участках торможения при пробеге и на РД (рулевые дорожки), а также в местах разворотов самолетов с минимальным радиусом поворота.

Резкое уменьшение коэффициента μ наблюдается при наличии на покрытиях воды (талой, дождевой), слякоти или снега, которые действуют как смазка. Значения μ в этом случае снижаются до 0,4–0,3, что серьезно отражается на безопасности выполнения взлетно-посадочных операций самолетов.

Значительно ухудшаются также характеристики управляемости самолета при движении по ВПП, особенно опасен в этом случае сильный боковой ветер, который может вызвать скатывание самолетов на БПБ (боковая полоса безопасности). Поэтому в зависимости от состояния поверхности покрытий и коэффициента сцепления боковую составляющую скорости ветра при взлете и посадке самолетов принято ограничивать.

Рассмотрим качение колеса по твердому основанию со слоем жидкого грунта, воды или уплотненного снега, который не считается несущим, – при малых скоростях колесо продавливает его до нижнего твердого основания.

Физическую сущность появления дополнительного сопротивления качению колеса от жидкого грунта, воды или уплотненного снега (свежевыпавшего или оттаявшего снега) можно считать идентичной [7].

Сопротивление качению колеса от смятия передней частью колеса слоя грунта характеризует дополнительное сопротивление на малых скоростях. Назовем его статической составляющей сопротивления качению колеса $F_{ст}$. С увеличением скорости эта составляющая практически не изменяется. Определяется она максимальной величиной напряжения сдвига или смятия, при котором происходит разрушение слоя грунта (снега) и начинается движение колеса.

Для свежевыпавшего снега и слякоти эта составляющая не является определяющей, и поэтому можно для практических расчетов принять среднее значение напряжения по высоте слоя. Сопротивление качению колеса определяется интегрированием выражения

$$F_{ст} = \sigma_{ст} D \sqrt{d H_{сл} - H_{сл}^2} \int_{\alpha=0}^{\alpha=\alpha_1} \left(1 - \frac{\alpha^2}{\alpha_1^2}\right) \sin \alpha d\alpha. \quad (4)$$

После интегрирования и некоторых преобразований имеем:

$$F_{ст} = \sigma_{ст} D^2 \sqrt{\frac{d}{D} H_{сл} - H_{сл}^2} (1 - \sqrt{1 - H_{сл}}), \quad (5)$$

где $\sigma_{ст}$ – напряжение смятия слоя; D – внешний диаметр колеса; d – ширина колеса (диаметр поперечного сечения пневматика); $H_{сл}$ – толщина слоя; α_1 – угол, соответствующий $H_{сл}$; α_0 – угол, соответствующий $H_{сл} = 0$.

При расчете $F_{ст}$ необходимо учитывать, что сопротивление создают только передние колеса в ряду. При прочности снега $\sigma < 1,2P$, где P – давление в пневматике, можно считать, что колесо продавливает слой снега с учетом его сжатия до плотности $\gamma = 1,0 \text{ г/см}^3$ на глубину $H_{кол} = (1 - \gamma_{сл})H_{сл}$, где $H_{сл}$ – вся толщина снежного покрова; $H_{к}$ – глубина колеи, $\gamma_{сл}$ – плотность снега, г/см^3 .

Для слоя воды или слякоти (водонасыщенного снега) можно считать $H_{к} = H_{сл}$, т. е. грунт не сжимается, а раздается в стороны, и колесо продавливает верхний слой твердого основания. Дополнительное сопротивление качению грунта, обусловленное соударением частиц снега (грунта) или воды о колеса может быть найдено из закона изменения количества движения. Составляющая коэффициента сопротивления качению колеса как отношение этой силы к вертикальной нагрузке на колесо может быть выражена

$$f_{тр} = \frac{1,43\gamma V^2}{(\log Re)^{2,58}} \frac{\gamma}{g} V^2 D d. \quad (6)$$

При качении авиационного колеса по твердому основанию можно считать деформацию односторонней – деформируется только колесо. Поэтому представляется возможным определить зависимость коэффициента сопротивления свободного качения колеса от его основных параметров. Обжатие колеса на прочном грунте, когда грунт не деформируется, а деформируется только колесо, должно равняться обжатию на бетоне.

Со стороны бетона при обжатии колеса под действием вертикальной нагрузки действует избыточное удельное давление, превышающее на 20 % давление воздуха в шине [2, 3]. Коэффициент 0,2 характеризует несущую способность корда колеса, которая увеличивается с увели-

чением давления воздуха за счет увеличения слоев корда и увеличения устойчивости стенок при их обжати. Прочность грунта, при котором будет такая же величина обжатия колеса, как на бетоне, можно найти из выражения

$$\sigma_H - 1,2p = 1,2p, \text{ тогда } \sigma_H = 2,4p, \quad (7)$$

где σ – прочность грунта;
 p – давление воздуха в пневматике.

При $\sigma_H = 2,4p$ глубина колеи практически отсутствует, деформируется только колесо. При прочности грунта менее $0,6p$ деформируется только грунт. В диапазоне значений $0,6p - 2,4p$ происходит деформация колеса и грунта. Физическая сущность возникновения силы сопротивления свободного качения колеса по сухому бетону и сухому прочному ровному грунту практически одинакова.

Под силой сопротивления свободного качения колеса понимается тангенциальная составляющая равнодействующей всех сил, действующих на него в месте контакта с поверхностью. Эксперименты [4, 5, 7] показали, что при качении колеса с постоянной вертикальной нагрузкой (постоянным обжатием) сила сопротивления качению колеса с ростом скорости сначала остается постоянной, а затем, начиная с критической скорости, при которой деформированная часть пневматика не успевает распрямиться до повторного входа в зону контактной поверхности, резко возрастает.

Увеличение силы сопротивления качению колеса с ростом скорости объясняется влиянием гистерезиса [7] и динамического удара передней части зоны контакта протектора о твердое основание, поэтому можно представить силу сопротивления качению колеса по твердому основанию суммой двух составляющих

$$F_{\text{то}} = F_0 + F_{0 \text{ дин}}, \quad (8)$$

где F_0 – составляющая силы, зависящая от гистерезиса материала протектора;
 $F_{0 \text{ дин}}$ – составляющая силы, зависящая от скорости движения.

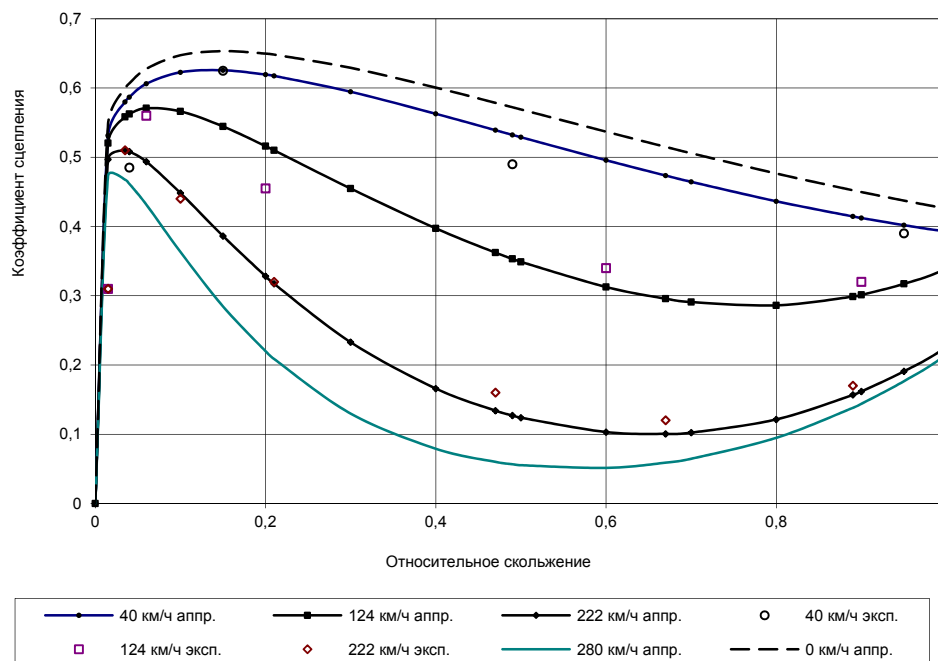
На контактную поверхность со стороны колеса действуют вертикальные силы давления воздуха, давления каркаса покрышки и тангенциальная сила реакции опоры, а горизонтальная сила от оси колеса уравнивается тангенциальной составляющей реакции опоры.

Колесо при обжати деформируется. Для того чтобы произошло качение колеса, необходимо переднюю часть контактной поверхности поджать, а заднюю часть – разжать. Материалы покрышек являются упруго-пластическими.

При малых скоростях движения влиянием эффекта пластичности можно пренебречь, так как с увеличением скорости одновременно с увеличением силы сопротивления качению от влияния пластичности материала происходит ее уменьшение за счет влияния центробежных сил материала протектора, которые как бы увеличивают давление воздуха и уменьшают обжатие колеса. Увеличение давления на контактную поверхность от центробежных сил составляет

$$P_{\text{уб}} = \frac{\gamma_{\text{рез}} \delta V^2}{q\rho}, \quad (9)$$

где $\gamma_{\text{рез}}$ – удельный вес резины; δ – толщина протектора; ρ – радиус кривизны элемента покрышки; V – скорость движения колес. На рисунке представлены результаты аппроксимации.



Аппроксимация экспериментальных зависимостей коэффициента сцепления для влажного бетона от скорости движения воздушного судна

ВЫВОДЫ

Данный анализ составляющих дополнительных сил, препятствующих качению колеса, позволит выполнять теоретические расчеты посадочной дистанции, приводить полученные экспериментальные или расчетные величины длины разбега к различным параметрам, характеризующим состояние ВПП: прочность и плотность грунта (снега), толщину слоя снега (воды или слякоти), размеров колеса (внешний диаметр, ширина колеса).

Сравнение зависимостей коэффициента сцепления $\mu_{\text{пр}}$ от скорости для различных состояний поверхности ВПП показывает, что значения предельных коэффициентов сцепления на мокрой ВПП уменьшаются по сравнению со значениями на сухой ВПП в среднем в 1,5–2 раза.

Представляется целесообразным использовать накопленный обширный опыт исследований [6, 7] поведения самолетов в сложных метеоусловиях на пробеге с помощью системы математического моделирования динамики полета, разработанной на кафедре АКПЛА МГТУ ГА с целью выработки конкретных рекомендаций по эксплуатации пассажирских самолетов на различных типах покрытия ВПП в сложных метеоусловиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чудаков Е.А. Качение автомобильного колеса. Труды АН СССР. М., 1948.
2. Зверев И.И., Коконин С.С. Проектирование авиационных колес и тормозных систем. М.: Машиностроение, 1973.
3. Червяков Н.Л., Княшко В.С. Сопротивление свободному качению колеса от слоя жидкого грунта, воды или неуплотненного снега // Вопросы аэродинамики, динамики полета и летной эксплуатации гражданских летательных аппаратов. Труды ГосНИИ ГА. Выпуск 165. М., 1979. С. 21–28.
4. Червяков Н.Л. Свободное качение колеса по сухой грунтовой ВПП с прочным грунтом // Вопросы аэродинамики, динамики полета и летной эксплуатации гражданских летательных аппаратов. Труды ГосНИИ ГА. Выпуск 165. М., 1979. С. 95–101.
5. Белинский И.А., Самородов Ю.А., Соколов В.С. Зимнее содержание аэродромов. М.: Транспорт, 1982. 193 с.

6. **Кубланов М.С.** Математическое моделирование задач летной эксплуатации воздушных судов на взлете и посадке: монография. М.: РИО МГТУ ГА, 2013. 270 с.

7. **Часовников В.Г.** Исследование глиссирования колес самолетов на мокрых аэродромных покрытиях. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. СПб.: ОЛАГА. 1972.

MATHEMATICAL SIMULATION OF THE MOTION OF HEAVY TRANSPORT PLANES AT LANDING

Behtina N.B., Smetanina N.A.

It is known that when the aircraft is moving the pressure on the runway and taxiway surfaces does not remain constant. One of the factors influencing starting aircraft rolling-off the runway is the low friction coefficient. The article analyses theoretical and experimental ways of defining the friction coefficient and it suggests a mathematical model taking into account the main factors influencing its magnitude. The wheel hydroplaning is the most unfavorable case of aircraft landing that takes place on wet and slush covered runways with longitudinal and lateral adherence decreasing practically to zero. It was discovered in the research that the dynamic wheel hydroplaning is mostly affected by the following factors: the depth of the slush, its density, pressure in the wheels, degree of protector wear as well as the structure of runway surface. When modeling it is important to get to a true description of pneumatics as increase of damping speed reveals relaxation rubber properties where deformation changing is lagging behind load changing (it is necessary to take into account the non-linear and hysteresis properties). The article offers a method of assessing of the above mentioned phenomena on the basis of studying the interaction of undercarriage pneumatics with the runway surface with the help of using the system of mathematical modeling of aircraft flight dynamics. The article suggests methods of analytic describing aircraft moving on landing on the runway covered with slush.

Key words: mathematical modeling problems, runway condition, aircraft moving on runway, pneumatic chassis.

REFERENCES

1. **Chudacov E.A.** Kachenie avtomobilnogo kolesa. The Works of AS of USSR. Moscow, 1946.

2. **Zverev I.I., Kokonin S.S.** Proektirovanie aviacionnix koles i tormoznix cicem. Moscow: Mashinostroenie, 1973.

3. **Cherviyakov N.L., Kiyashko V.C.** Soprotivlenie svobodnomu kacheniu kolesa ot sloya jidkogo grunta, vodi ili neplotnennogo snega. Voprosi aerodinamiki, dinamiki poleta i letnoyi ekspluatacii grajdanskih letatelnix apparatov. The Works of GosNIIGA. Issue 165. Moscow, 1979. P. 21–28.

4. **Cherviyakov N.L.** Svobodnoe kachenie kolesa po suhoj gruntovoj VPP s prochnim gruntom. Voprosi aerodinamiki, dinamiki poleta i letnoyi ekspluatacii grajdanskih letatelnix apparatov. The Works of GosNIIGA. Issue 165. Moscow, 1979. P. 95–101.

5. **Belinskij I.A., Samorodov U.A., Sokolov V.S.** Zimnee sodержanie aerodromov. Moscow: Transport, 1982. 193 p.

6. **Kublanov M.S.** Matematicheskoe modelirovanie zadach letnoi ekspluatacii vozduchnih sudov na vzlete i posadke: monografiia. M.: MSTUCA publishing house, 2013. 270 p.

7. **Chasovnikov V.G.** Issledovanie glissirovania koles samoletov na mokrih aerodromnih pokritiyah. Dissertaciya na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tehniceskikh nauk. SPb.: OLAGA, 1972.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Бехтина Наталия Борисовна, кандидат технических наук, доцент кафедры аэродинамики, конструкции и прочности ЛА МГТУ ГА, электронный адрес: nbmiiga@yandex.ru.

Сметанина Надежда Алексеевна, аспирантка кафедры аэродинамики, конструкции и прочности ЛА МГТУГА.