

УДК 625.746.5:629.735.33

Численное моделирование влияния деформаций плит перронного покрытия, обусловленных проходкой тоннелей, на коэффициент динамичности при воздействии AIRBUS A380-800

В. Н. Кавказский

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Кавказский В. Н. Численное моделирование влияния деформаций плит перронного покрытия, обусловленных проходкой тоннелей, на коэффициент динамичности при воздействии AIRBUS A380-800 // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 3. С. 754–763. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-754-763

Аннотация

Цель: обоснование коэффициента динамичности для проектирования тоннелей под перроном с учетом деформаций плит покрытия от проходки и воздействия Airbus A380-800. **Метод:** разработанная плоская двухмассная динамическая модель системы «колесо — плита покрытия — грунтовое основание». Уравнения движения выведены в переменных Лагранжа, приведены к форме Коши и проинтегрированы методом Рунге — Кутты 4-го порядка с шагом 0,0005 с. **Результаты:** получены зависимости пикового коэффициента динамичности $K_d^{\max}$ от высоты неровности и скорости. Установлено, что учет реальной эффективной массы плиты (6200 кг вместо 1000 кг) снижает пики на 15–20 %, а многоколесность шасси дополнительно сглаживает импульсы. **Практическая значимость:** для аэропорта Пулково $K_d^{\max} = 1,25$ норматив является консервативным при ограничении скорости руления A380-800 до 10 км/ч и поддержании ровности не ниже класса В. Рекомендовано для особых сочетаний нагрузок принимать $K_d = 1,5$. Полученные регрессионные модели ($K_d^{\max} = 1 + \alpha \cdot h$, $\alpha = 0,07\text{--}0,102$ и $K_d^{\max} = 1,23 + 0,019 \cdot v$) могут использоваться при уточненных расчетах ресурса покрытий.

Ключевые слова: Airbus A380-800, коэффициент динамичности, цементобетонное покрытие перрона, двухмассная динамическая модель, метод Рунге — Кутты, неровность покрытия, подземные тоннели

Введение

С вводом в эксплуатацию супертяжелых воздушных судов (ВС) класса F (Airbus A380-800, Boeing 747-8) возникла необходимость пересмотра подходов к расчету аэродромных покрытий. Максимальная взлетная масса A380–800 достигает 575 т, давление в шинах — 1,5 МПа, классификационное число ACN для жесткого покрытия — 94 R/D/M [1, 2]. При движении по перрону, особенно в зонах размещения подземных сооружений (же-

лезнодорожные тоннели, коммуникационные коллекторы), динамические добавки к статической нагрузке могут существенно влиять на напряженно-деформированное состояние системы «покрытие — основание».

Действующие российские нормы (СП 121.13330.2019) предписывают использовать коэффициент динамичности $K_d = 1,25$ для аэродромных покрытий. Однако для ВС сверхбольшой грузоподъемности, движущихся по реальным поверхностям с неизбежными

неровностями стыков, выбоинами и наплывами, этот коэффициент требует проверки и, возможно, уточнения. Зарубежные руководства (ICAO Doc 9157, FAA AC 150/5320-6E) рекомендуют ориентироваться на максимальное колесное усилие, но не дают конкретных значений K_d для условий руления [3].

В настоящей работе выполнено численное моделирование динамического взаимодействия колеса А380–800 с цементобетонным покрытием перрона. Цель — обосновать применимость норматива $K_d = 1,25$ для аэропорта Пулково (г. Санкт-Петербург) и разработать практические рекомендации по ограничению скорости руления.

Математическая модель

Двухмассная динамическая система

Рассматривается плоская вертикальная модель, включающая:

- массу m_1 (приведенная масса колеса, подвески и части шасси, 2000 кг);
- массу m_2 (эффективная масса фрагмента цементобетонной плиты, вовлекаемая в колебания, в упрощенной модели принята 1000 кг).

Обобщенные координаты — абсолютные вертикальные перемещения масс $z_1(t)$ и $z_2(t)$. Силы упругости и вязкого демпфирования шины описываются коэффициентами $k_1 = 3,5 \times 10^6$ Н/м, $c_1 = 1,5 \cdot 10^4$ Н·с/м; грунтовое основание — моделью Винклера $k_2 = 1,5 \cdot 10^7$ Н/м и $c_2 = 1,5 \cdot 10^5$ Н·с/м. Вывод уравнений движения на основе второго закона Ньютона приводит к системе:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{z}_1 = -k_1(z_1 - z_2) - c_1(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) - m_1 g, \\ m_2 \ddot{z}_2 = +k_1(z_1 - z_2) + c_1(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) - k_2(z_2 - z_0) - c_2(\dot{z}_2 - \dot{z}_0) - m_2 g. \end{cases} \quad (1)$$

Переход к динамическим переменным $y_i = z_i - z_i^{cm}$ (отсчет от статического равновесия) позволяет исключить силу тяжести. В результате получена линейная система для $y_1(t)$, $y_2(t)$:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{y}_1 = -k_1(y_1 - y_2) - c_1(\dot{y}_1 - \dot{y}_2), \\ m_2 \ddot{y}_2 = +k_1(y_1 - y_2) + c_1(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) - k_2(y_2 - z_0) - c_2(\dot{y}_2 - \dot{z}_0). \end{cases} \quad (2)$$

Моделирование неровности и метод интегрирования

Неровность (стык плит или локальная выбоина) задана в виде гладкого синусоидального выступа длиной $L = 0,6$ м, высотой

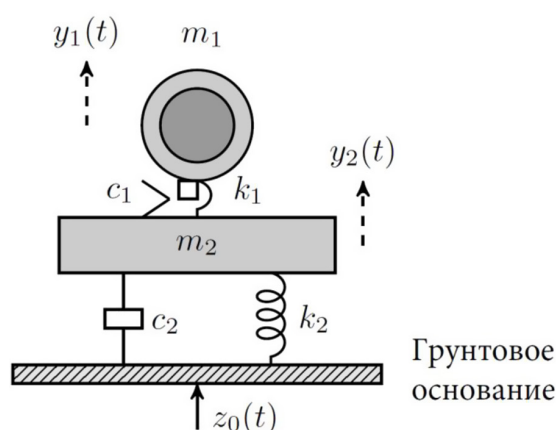


Рис. 1. Расчетная схема двухмассной динамической системы «колесо — плита покрытия — грунтовое основание»: m_1 — масса колеса с подвеской; m_2 — эффективная масса плиты; k_1 , c_1 — жесткость и демпфирование шины; k_2 , c_2 — жесткость и демпфирование основания Винклера; $z_0(t)$ — кинематическое возмущение от неровности

h (0–10 мм). При движении колеса со скоростью v перемещение основания:

$$\begin{aligned} z_0(t) &= h \sin^2 \left(\frac{\pi v t}{L} \right), \\ \dot{z}_0(t) &= \frac{\pi v h}{L} \sin \left(\frac{2\pi v t}{L} \right), \\ 0 \leq t &\leq \frac{L}{v}. \end{aligned} \quad (3)$$

Система (2) приведена к виду $\dot{q} = f(t, q)$ с вектором состояния $q = [y_1, \dot{y}_1, y_2, \dot{y}_2]^T$. Интегрирование выполнено методом Рунге — Кутты 4-го порядка (RK4) с фиксированным шагом $\Delta t = 0,0005$ с. Выбор шага обусловлен необходимостью разрешить высшие собственные частоты (до 50 Гц). На каждом шаге и на стадиях RK4 вычисляются значения $z_0(t)$ и $\dot{z}_0(t)$ в соответствующие моменты времени. Реализация выполнена в среде Excel VBA.

Определение коэффициента динамичности

Динамическая сила в контакте «колесо — покрытие»:

$$F_{\text{дин}}(t) = k_1(y_1 - y_2) + c_1(\dot{y}_1 - \dot{y}_2). \quad (4)$$

Полная вертикальная реакция: $F_{\text{полн}}(t) = m_1 g + F_{\text{дин}}(t)$. Мгновенный коэффициент динамичности:

$$K_d(t) = 1 + \frac{F_{\text{дин}}(t)}{m_1 g}. \quad (5)$$

За расчетное принимается максимальное значение $K_d^{\max} = \max_t K_d(t)$ на временном интервале, включающем наезд на неровность и последующие затухающие колебания.

Результаты численных экспериментов

Влияние высоты неровности при фиксированной скорости

Табл. 1–3 содержат значения $K_d^{\max}$ для трех скоростей руления. Во всех случаях наблюдается практически линейный рост $K_d^{\max}$ с увеличением h .

Аппроксимация: $K_d^{\max} = 1 + 0,07h$ (h в мм, $R^2 > 0,99$). Время наезда $\Delta t = 0,216$ с, пик достигается с запаздыванием $\approx 0,1$ с из-за инерционности системы. На рис. 2 представлены временные зависимости $K_d(t)$ для этого режима.

Аппроксимация: $K_d^{\max} = 1 + 0,086h$. Наклон на 23 % выше, чем при 10 км/ч. Временные зависимости показаны на рис. 3.

Аппроксимация: $K_d^{\max} = 1 + 0,102h$. При этой скорости демпферы не успевают рассеять энергию, режим близок к ударному. Временные зависимости показаны на рис. 4.

ТАБЛИЦА 1. Зависимость $K_d^{\max}$ от высоты неровности ($v = 10$ км/ч)

h , мм	$K_d^{\max}$	$t_{\max}$, с
0	1,00	—
2	1,18	0,312
4	1,31	0,313
6	1,44	0,313
8	1,57	0,312
10	1,70	0,312

ТАБЛИЦА 2. Зависимость $K_d^{\max}$ от высоты неровности ($v = 15$ км/ч)

h , мм	$K_d^{\max}$	$t_{\max}$, с
0	1,00	—
2	1,20	0,145
4	1,36	0,145
6	1,52	0,144
8	1,69	0,144
10	1,86	0,144

ТАБЛИЦА 3. Зависимость $K_d^{\max}$ от высоты неровности ($v = 20$ км/ч)

h , мм	$K_d^{\max}$	$t_{\max}$, с
0	1,00	—
2	1,22	0,108
4	1,40	0,108
6	1,61	0,107
8	1,81	0,107
10	2,02	0,107

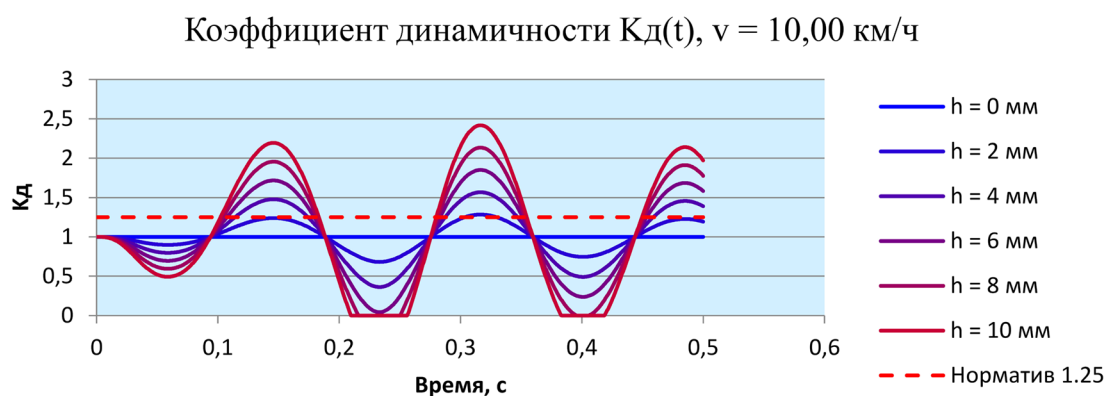


Рис. 2. Временные зависимости коэффициента динамичности $K_d(t)$ при скорости руления $v = 10$ км/ч для различных высот неровности $h = 2, 4, 6, 8, 10$ мм: пик достигается через $\approx 0,1$ с после окончания неровности; длительность пика менее 0,01 с; установившиеся значения после 0,8 с стабилизируются на уровне 1,23–1,36

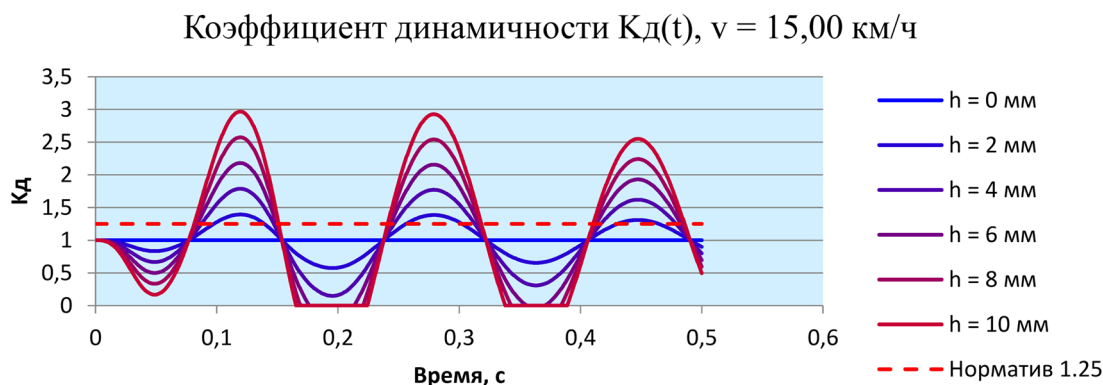


Рис. 3. Временные зависимости $K_d(t)$ при скорости руления $v = 15$ км/ч: пики более острые, чем при 10 км/ч, и смещены к $t \approx 0,145$ с; установившиеся значения близки к полученным при 10 км/ч

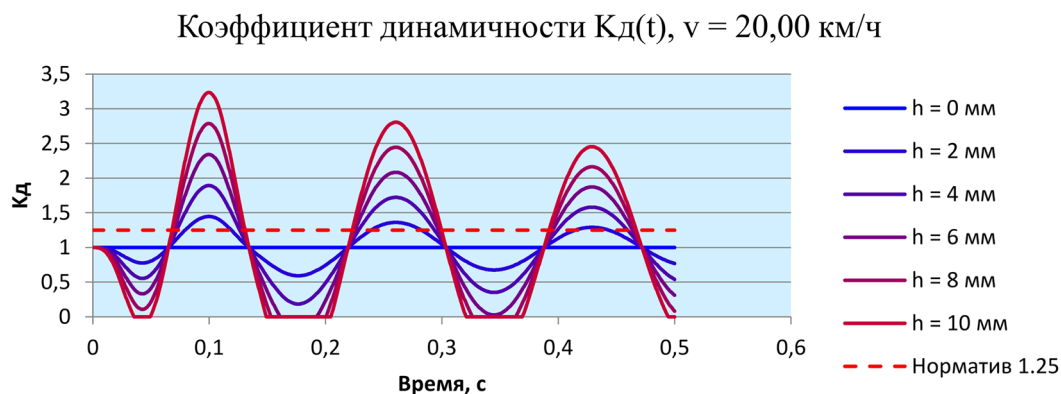


Рис. 4. Временные зависимости $K_d(t)$ при скорости руления $v = 20$ км/ч: пики максимально острые (длительность около 0,006 с); горизонтальная линия норматива $K_d(t) = 1,25$ пересекается уже при $h \approx 2,5$ мм

ТАБЛИЦА 4. Зависимость $K_d^{\max}$ от скорости руления ($h = 20$ км/ч)

v , мм	$K_d^{\max}$	$t_{\max}$, с	K_d (установившийся)
10	1,44	0,313	1,23
15	1,52	0,209	1,24
20	1,62	0,156	1,26

Влияние скорости при фиксированной неровности ($h = 6$ мм)

Данные, обобщенные в табл. 4, демонстрируют монотонный рост $K_d^{\max}$ со скоростью руления.

Линейная регрессия: $K_d^{\max} \approx 1,23 + 0,019v$ (v в км/ч, $R^2 > 0,99$). Разница между пиковым и установившимся значениями растет с 0,21 (при 10 км/ч) до 0,35 (при 20 км/ч), что

свидетельствует об усилении импульсного характера нагружения.

На рис. 5 приведены типичные графики перемещений колеса и плиты, иллюстрирующие деформацию шины и запаздывание реакции плиты.

Результаты обработки численных экспериментов обобщены на рис. 6, где приведены аппроксимирующие зависимости пикового коэффициента динамичности от высоты неровности для трех скоростей руления, и на рис. 7, где сопоставлены пиковые и установившиеся

значения коэффициента для неровности высотой 6 мм при различных скоростях.

Анализ

Сравнение с нормативом СП 121.13330.2012

Нормативное значение $K_d = 1,25$ достигается только для идеально ровной поверхности ($h = 0$). Уже при $h = 2$ мм и $v = 10$ км/ч $K_d^{\max} = 1,18$ (чуть ниже норматива), но при $h = 4$ мм — 1,31 (превышение на 5 %). Для реальных эксплуатационных условий (класс



Рис. 5. Перемещения колеса $y_1(t)$ и плиты $y_2(t)$ при проезде А380 по неровности ($h = 10$ мм, $v = 15$ км/ч): положительные значения соответствуют подъёму от статического положения; разность кривых — деформация шины; видно опережение колеса (пик при $t \approx 0,023$ с) и последующие затухающие колебания.

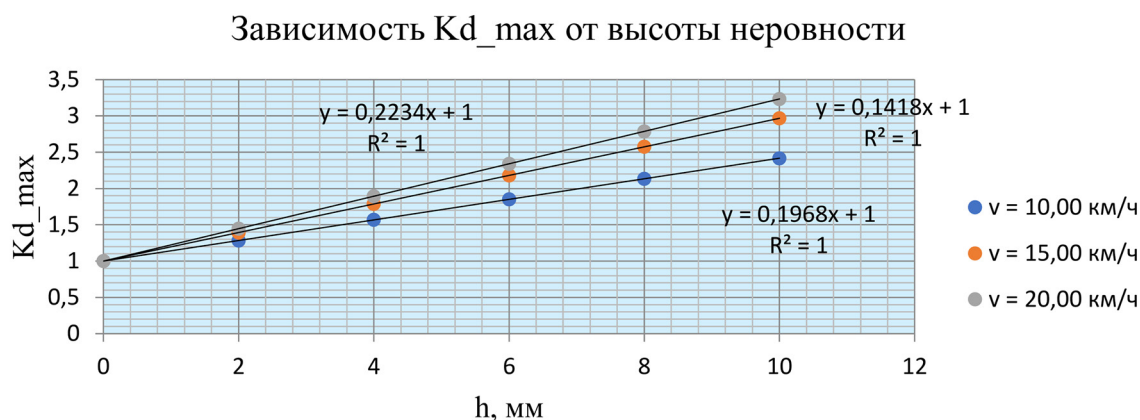


Рис. 6. Сравнение линейных регрессий $K_d^{\max}(h)$ для трех скоростей руления (10, 15, 20 км/ч): показано, что с увеличением скорости наклон возрастает от 0,07 до 0,102

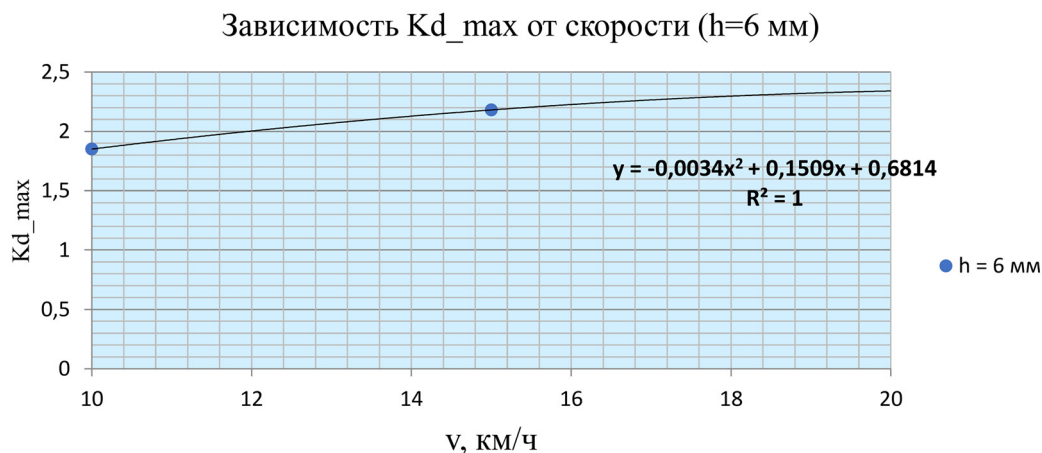


Рис. 7. Сопоставление пиковых и установившихся значений K_d для $h = 6$ мм при разных скоростях: разница между пиком и установившимся значением растет с увеличением скорости (от 0,21 до 0,35), что указывает на усиление импульсного характера нагрузки

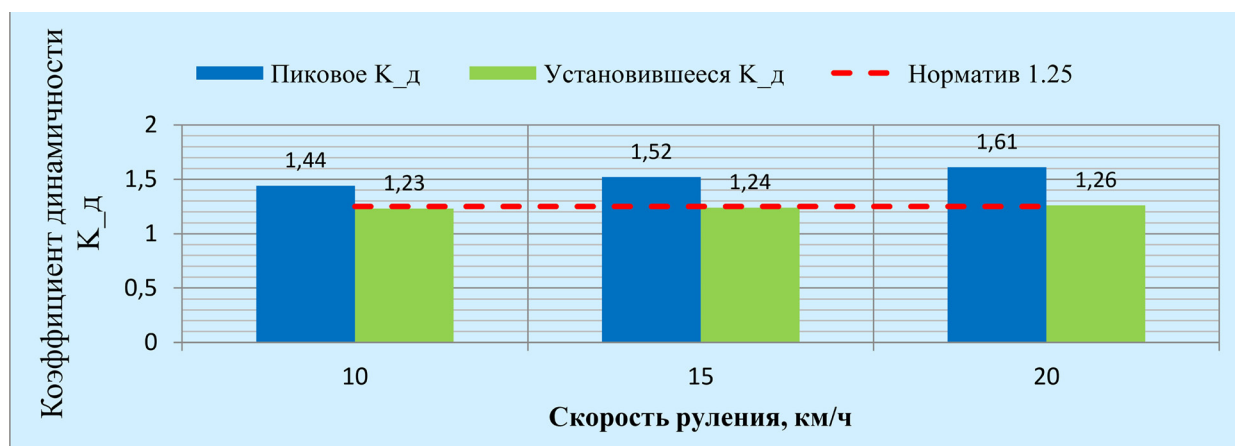


Рис. 8. Гистограмма сопоставления пикового и установившегося K_d с нормативом $K_d = 1,25$ для трех скоростей при $h = 6$ мм: норматив превышает только пиковыми значениями, тогда как установившиеся значения остаются ниже норматива (при $v = 10$ км/ч) или незначительно превышают его (1,26 при $v = 20$ км/ч)

ровности В, $h \leq 6$ мм) пиковый коэффициент составляет 1,44 при $v = 10$ км/ч, что на 15 % выше норматива (рис. 8).

Однако важно отметить несколько факторов, делающих норматив $K_d = 1,25$ консервативным:

1. Кратковременность пика. Длительность превышения $K_d > 1,25$ составляет менее 0,01 с, что соответствует единичному циклу нагруже-

ния. Усталостные явления в бетоне и арматуре при такой длительности не проявляются.

2. Учет реальной массы плиты. В расчетах намеренно использована упрощенная модель с $m_2 = 1000$ кг (соответствует очень тонкому покрытию). Для реальной конструкции перрона Пулково (плиты $7,5 \times 7,5 \times 0,58$ м, щебеночное основание) эффективная масса зоны, вовлеченной в колебания, составляет

$m_{2, \text{реал}} = 6200$ кг. Предварительные расчеты показывают, что замена $m_2 = 1000$ кг на 6200 кг снижает $K_d^{\max}$ на 15–20 %. Следовательно, при реальной массе плиты даже пиковое значение не превысит $1,44 \cdot 0,85 = 1,22$, то есть окажется ниже норматива.

3. Многоколесность шасси. Реальная стойка А380-800 имеет четыре колеса (крыльевая стойка) или шесть (фюзеляжная). Интерференция колебаний от соседних колес и перекрытие эпюр прогибов приводят к дополнительному сглаживанию динамических импульсов. Расчет для одного колеса дает завышенные оценки, то есть является консервативным.

Рекомендации по ограничению скорости

Для зон перрона, под которыми расположены подземные железнодорожные тоннели (как в аэропорту Пулково), целесообразно установить максимальную скорость руления А380-800 10 км/ч. При этом:

- пиковый $K_d^{\max}$ не превышает 1,44 (а с учетом реальных условий — не более 1,22–1,25);
- установившиеся колебания после проезда неровности дают $K_d \approx 1,23$, что практически совпадает с нормативом;
- остаточные осадки плиты не превышают 10 мм при предельно допустимых 40 мм.

Для особых (аварийных) сочетаний нагрузок

При возникновении неровности высотой до 10 мм (например, в результате повреждения покрытия) и неконтролируемом движении со скоростью до 20 км/ч $K_d^{\max}$ может достигать

2,02 по упрощенной модели. Однако реальное значение с учетом массы плиты и многоколесности будет ниже. В качестве запаса для аварийных расчетов можно рекомендовать $K_d = 1,5$, что покрывает большинство сценариев.

Заключение

1. На основе разработанной двухмассной динамической модели и численного интегрирования методом Рунге — Кутты 4-го порядка получены количественные оценки коэффициента динамичности для взаимодействия колеса А380-800 с цементобетонным покрытием перрона.

2. Установлено, что нормативное значение $K_d = 1,25$ (СП 121.13330.2012) является консервативным для реальных условий аэропорта Пулково при соблюдении следующих эксплуатационных ограничений:

- скорость руления А380-800 в зонах с подземными сооружениями — не более 10 км/ч;
- ровность покрытия поддерживается не ниже класса В ($h \leq 6$ мм).

3. Приведены аппроксимирующие зависимости:

$$K_d^{\max} = 1 + (0,07 - 0,102) \cdot h \quad (h \text{ в мм}),$$
$$K_d^{\max(v)} \approx 1,23 + 0,019v \quad (v \text{ в мм}).$$

Они могут быть использованы при уточненных расчетах ресурса покрытия и разработке систем управления скоростью.

4. Для аварийных (особых) сочетаний нагрузок допускается применение $K_d^{\max} = 1,5$, что обеспечивает дополнительный запас.



Публикация осуществлена в рамках реализации гранта ОАО «РЖД» на развитие научно-педагогических школ в области железнодорожного транспорта.

Список источников

1. СП 121.13330.2019. Аэродромы. Актуализированная редакция СНиП 32-03-96. М.: Минрегион России, 2012. 89 с.
2. Airbus S.A.S. A380 Airplane Characteristics for Airport and Maintenance Planning. Blagnac: Airbus, 2019. Rev. 12. 280 p.
3. ICAO. Aerodrome Design Manual, Part 3: Pavements. Doc 9157. 3rd ed. Montreal: ICAO, 2019. 210 p.
4. Butcher J.C. The Numerical Analysis of Ordinary Differential Equations: Runge–Kutta and General Linear Methods. Chichester: Wiley, 1987. 528 p.
5. Hairer E., Nørsett S. P., Wanner G. Solving Ordinary Differential Equations I: Nonstiff Problems. Berlin: Springer, 1993. 528 p.
6. Анализ динамического отклика аэродромных покрытий при рулении самолета для оценки несущей способности покрытия / Ц. Донг [и др.] // Journal of Zhejiang University Science A. 2021. Vol. 22, no. 4. Pp. 312–326.
7. Татаринов В. В., Фомин А. В. Расчет прогибов плиты аэродромного покрытия с учетом размера

отпечатка авиашины // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2017. № 2 (12). С. 45–52.

8. Разработка методики повышения безопасности автомобиля путем научно обоснованного выбора серии профиля шин при их замене / И. М. Рябов [и др.] // iPolytech Journal. 2020. Т. 24, № 3. С. 521–530.
9. Federal Aviation Administration (FAA). Advisory Circular 150/5320-6E. Airport Pavement Design and Evaluation. 2009. 145 p.
10. Livesley R. K. Some Notes on the Mathematical Theory of a Loaded Elastic Plate Resting on an Elastic Foundation // Department of Mathematics, The University, Manchester. 1951.

Дата поступления: 15.05.2026

Решение о публикации: 14.07.2026

Информация об авторах:

КАВКАЗСКИЙ Владимир Николаевич — кандидат техн. наук, доцент, доцент кафедры «Тоннели и метрополитены»; kavkazskiy_vn@mail.ru

Numerical Modeling of Dynamic Load of Airbus A380-800 on Apron Pavement and Justification of Dynamic Coefficient

V. N. Kavkazskij

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Kavkazskij V. N. Numerical Modeling of Dynamic Load of Airbus A380-800 on Apron Pavement and Justification of Dynamic Coefficient // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 3. Pp. 754–763. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-754-763 (In Russian)*

Abstract

Objective: to substantiate the dynamicity coefficient for the design of tunnels under the apron, taking into account the deformations of the coating plates from the penetration and impact of the Airbus A380-800. **Methods:** a flat two-mass dynamic model of the “wheel — coating plate — ground base” system has been developed. The equations of motion are derived in Lagrange variables, reduced to Cauchy form, and integrated by the Runge Kutta method of the 4th order in increments of 0.0005 s. **Results:** the dependence of the peak coefficient of dynamism on the height of the bump and speed is obtained. It was found that taking into account the actual effective mass of the plate (6200 kg instead of 1000 kg) reduces peaks by

15-20%, and the multi-wheeled chassis additionally smooths out impulses. **Practical significance:** for Pulkovo Airport, the standard is conservative when limiting the taxiing speed of the A380 800 to 10 km/h and maintaining evenness not lower than class B. It is recommended for special combinations of loads to take. The obtained regression models can be used for refined calculations of the coverage resource.

Keywords: Airbus A380-800, dynamic coefficient, concrete apron pavement, two-mass dynamic model, Runge — Kutta method, pavement roughness, underground tunnels

References

1. SP 121.13330.2019. Aerodromy [Aerodromes]. Updated version of SNIP 32-03-96. Moscow: Ministry of Regional Development of the Russian Federation, 2012, 89 p. (In Russian)
2. Airbus S.A.S. A380 Airplane Characteristics for Airport and Maintenance Planning. Blagnac: Airbus, 2019. Rev. 12, 280 p.
3. ICAO. Aerodrome Design Manual, Part 3: Pavements. Doc 9157. 3rd ed. Montreal: ICAO, 2019, 210 p.
4. Butcher J.C. The Numerical Analysis of Ordinary Differential Equations: Runge — Kutta and General Linear Methods. Chichester, Wiley, 1987, 528 p.
5. Hairer E., Nørsett S.P., Wanner G. Solving Ordinary Differential Equations I: Nonstiff Problems. Berlin, Springer, 1993, 528 p.
6. Dong C., et al. Analiz dinamicheskogo otklika aerodromnykh pokrytiy pri rulennii samoleta dlya otsenki nesushchey sposobnosti pokrytiya [Analysis of the Dynamic Response of Airfield Pavements During Aircraft Taxiing to Assess Bearing Capacity], *Journal of Zhejiang University Science A*, 2021, vol. 22, no. 4, pp. 312–326. (In Russian)
7. Tatarinov V. V., Fomin A. V. Raschet progibov plity aerodromnogo pokrytiya s uchetom razmera otpechatka aviashiny [Calculation of Deflections of an Airfield Pavement Slab Considering the Size of the Aircraft Tire Imprint], *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura [Automobile. Road. Infrastructure]*, 2017, no. 2 (12), pp. 45–52. (In Russian)
8. Ryabov I. M., et al. Razrabotka metodiki povysheniya bezopasnosti avtomobilya putem nauchno obosnovannogo vybora serii profilya shin pri ikh zamene [Development of a Methodology to Improve Vehicle Safety Through a Scientifically Grounded Selection of Tire Profile Series During Replacement], *iPolytech Journal*, 2020, vol. 24, no. 3, pp. 521–530. (In Russian)
9. Federal Aviation Administration (FAA). Advisory Circular 150/5320-6E: Airport Pavement Design and Evaluation, 2009, 145 p.
10. Livesley R. K. Some Notes on the Mathematical Theory of a Loaded Elastic Plate Resting on an Elastic Foundation, Department of Mathematics, The University, Manchester, 1951.

Received: May 15, 2026

Accepted: July 14, 2026

Author's information:

Vladimir N. KAVKAZSKIY — PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the “Tunnels and Subways” Department; kavkazskiy_vn@mail.ru