УДК 625.717.2.032.3 DOI: 10.33622/0869-7019.2020.12.30-33

Особенность расчета на прочность жестких покрытий аэродромов

Владимир Владимирович ТАТАРИНОВ, кандидат технических наук, доцент, e-mail: tatarinov@madi.ru

Андрей Викторович ФОМИН, кандидат технических наук, e-mail: a.fomin@madi.ru

Екатерина Александровна МАКАРОВА, аспирантка, e-mail: makarova-e-a@mail.ru

ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», 125319 Москва, Ленинградский просп., 64

Аннотация. *Расчет на прочность жестких аэродромных покрытий выполняется по предельным состояниям. В этой связи расчетной моделью покрытия является тонкая пластина на упругом основании, а опора самолета рассматривается как комбинация распределенной нагрузки и сосредоточенных сил. В статье приведены результаты исследования влияния параметров самолетной тележки основной опоры на результаты прочностного расчета жестких аэродромных покрытий. Установлено, что при расчете жестких покрытий гражданских аэродромов на прочность проявляется особенность, не известная ранее. Она заключается в том, что может быть найдено значение толщины слоя покрытия, теоретически удовлетворяющее предельному состоянию, но недопустимое практически. Данная особенность характерна для самолетов с шестиколесной тележкой (для самолетов с четырех- и двухколесной тележкой эта специфика не отмечена). Выполнены и проанализированы расчеты бетонного покрытия при воздействии самолета с шестиколесной опорой. Исследования показали, что существующий метод расчета жестких аэродромных покрытий на прочность имеет существенный недостаток, характерный для самолетов с рассмотренной опорой. Применение действующей методики прочностного расчета для таких самолетов может привести к неверным результатам, поэтому она нуждается в корректировке.*

Ключевые слова: *жесткое покрытие аэродрома, расчет на прочность по предельным состояниям, изгибающий момент, самолеты с шестиколесной опорой, сосредоточенная сила, пластина на упругом основании.*

SPECIAL FEATURE OF CALCULATING THE STRENGTH OF RIGID AIRFIELD PAVEMENTS

Vladimir V. TATARINOV, e-mail: tatarinov@madi.ru

Andrey V. FOMIN, e-mail: a.fomin@madi.ru

Ekaterina A. MAKAROVA, e-mail: makarova-e-a@mail.ru

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), 64, Leningradsky prospekt, Moscow 125319, Russian Federation

Abstract. *Calculation of the strength of rigid airfield pavements is performed according to the limit states. The design model of the pavement is a thin plate on an elastic foundation, and the aircraft landing gear is considered as a combination of distributed load and concentrated forces. The article presents the results of the study of the influence of the parameters of the main support aircraft gear on the results of strength calculation of rigid airfield pavements. It is established that when calculating the strength of hard pavements of civil airfields, a previously unknown feature appears. It consists in the fact that the value of the pavement layer thickness can be found that theoretically satisfies the limit state, but is practically unacceptable. This feature is typical for aircraft with a six-wheeled gear, for aircraft with a four-and two-wheeled gear, this feature is not marked. Calculations of the concrete surface under the influence of the aircraft with a six-wheeled gear were performed and analyzed. As a result of the study, it was found that the existing method for calculating the strength of rigid airfield pavements has a significant drawback characteristic for aircrafts with the gear considered. The application of the current strength calculation method for such aircraft may lead to incorrect results therefore, it needs to be corrected.*

Key words: *rigid airfield pavement, strength calculation by limit states, bending moment, aircrafts with six-wheeled gear, concentrated force, plate on elastic base.*

© ТАТАРИНОВ В. В., ФОМИН А. В., МАКАРОВА Е. А., 2020

Процедура расчета на прочность аэродромных покрытий в Российской Федерации регламентирована СП 121.13330. 2019 «СНиП 32-03-96 Аэродромы». Согласно данному нормативному документу расчет аэродромных покрытий рекомендовано выполнять по предельным состояниям, в основу которых положены значения внутренних усилий — изгибающих моментов *m*, возникающих в расчетном сечении от колеса самолетной опоры. Наиболее распространенными вариантами жестких аэродромных покрытий являются цементобетонные и армобетонные, обладающие значительной прочностью и не требующие дополнительных затрат на их возведение по сравнению с железобетонными покрытиями.

Предельное состояние для бетонных и армобетонных покрытий принимается по прочности и

может быть записано для двух вариантов покрытия:

- однослойного

$$m_u \geqslant m_d; \quad (1)$$

- двухслойного

$$\begin{cases} m_{u,\sup} \geqslant m_{d,\sup} \\ m_{u,\inf} \geqslant m_{d,\inf} \end{cases}, \quad (2)$$

где m_u и m_d — соответственно предельный и расчетный изгибающие моменты на единицу ширины сечения плиты покрытия, МН·м/м; $m_{u,\sup}$ и $m_{d,\sup}$ — то же, для верхнего слоя, МН·м/м; $m_{u,\inf}$ и $m_{d,\inf}$ — то же, для нижнего слоя, МН·м/м.

Согласно рекомендациям СП 121.13330 расчет на прочность аэродромных покрытий заключается в нахождении толщины слоев конструкции покрытия, при которых будет обеспечено условие (1) или (2). Минимальная толщина слоя покрытия принимается 0,16 м.

Основной этап расчета на прочность жестких покрытий аэродрома — определение величины изгибающего момента, вызываемого действием всех колес основной опоры самолета в расчетном сечении плиты. Математической моделью жесткого покрытия принято считать тонкую однородную и неограниченную в плане пластину на упругом основании Винклера. Теоретические основы расчета таких пластин достаточно хорошо изучены и приведены, например, в работах [1—8].

СП 121.13330 рекомендует рассчитывать изгибающие моменты от пневматиков колес основной опоры самолета методом суперпозиции, при котором изгибающие моменты от действия колеса, совпадающего с расчетным сечением, и колес за его пределами определяются по различным расчетным схемам. Колесо, совпадающее с расчетным сечением, рассматривается как распределенная нагрузка, а остальные колеса — как сосредоточенные силы.

Проведенные исследования метода прочностного расчета бетонных и армобетонных покрытий при различных конфигурациях самолетной опоры привели к совершенно неожиданному результату.

Цель работы — совершенствование действующей методики расчета на прочность жестких аэродромных покрытий, направленное на учет конфигурации опоры современных и перспективных гражданских самолетов.

При расчете тонких бесконечных пластин на упругом основании Винклера следует рассмотреть две расчетные схемы:

- осесимметричное нагружение распределенной нагрузкой, центр приложения которой совпадает с центром бесконечной пластины;
- кососимметричное нагружение сосредоточенной силой, центр приложения которой не совпадает с центром бесконечной пластины.

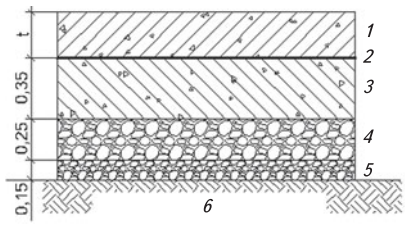
Дифференциальное уравнение изгиба пластины на упругом основании Винклера в системе безразмерных приведенных декартовых координат $\xi = x/l$, $\eta = y/l$ рассчитанных по упругой характеристике плиты l, имеет следующий вид:

$$(\nabla^4 + 1)W(\xi, \eta) = \frac{q(\xi, \eta)}{K_{se}}, \quad (3)$$

где $\nabla^4 = \left(\frac{\partial^2}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2}{\partial \eta^2}\right)^2$ — оператор дифференцирования; $W(\xi, \eta)$ — функция прогиба срединной поверхности плиты, м; $q(\xi, \eta)$ — распределенная нагрузка, МН/м²; K_{se} — коэффициент постели упругого основания.

Дифференциальное уравнение изгиба такой пластины при осесимметричном нагружении под действием нагрузки, распределенной по круговому отпечатку, существенно упрощается:

$$(\Delta^4 + 1)W(\rho) = \frac{q(\rho)}{K_{se}}, \quad (4)$$



1 — цементобетон (Btb 4); 2 — разделитель (ППА); 3 — цементобетон (Btb 12,5); 4 — щебень (расклинцовка), K_{se} = 450 МН/м³; 5 — щебень, K_{se} = 270 МН/м³; 6 — суглинок, K_{se} = 50 МН/м³

Рис. 1. ***Конструктивный разрез бетонного покрытия***

где $\Delta^4 = \left(\frac{\partial^2}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial \rho}\right)^2$ — оператор дифференцирования; $W(\rho)$ — функция прогиба срединной поверхности плиты, м, под нагрузкой $q(\rho)$, МН/м²; $\rho = r/l$ — приведенный полярный радиус центра нагруженной площадки.

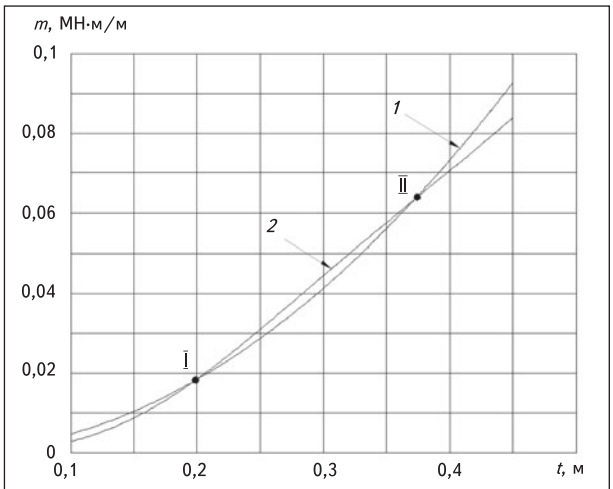
Дифференциальные уравнения (3) и (4) имеют множество вариантов решений, полученных различными методами в работах [1, 2, 4, 7, 8]. В СП 121.13330 приведены таблицы решений дифференциальных уравнений (3) и (4) для единичной нагрузки, которые позволяют выполнять расчет величины m_d для всех слоев проектируемого покрытия.

В процессе исследования был произведен расчет на прочность бетонного однослойного покрытия под нагрузку от самолета В—777. Конструктивный разрез проектируемого варианта покрытия представлен на *рис. 1*. Основание для бетонного покрытия принято комбинированное многослойное из низкомарочного бетона и щебня, выполняющего прочностные и дренирующие функции.

Расчет данного варианта покрытия на прочность выполнен по предельному состоянию (1) с использованием математических пакетов Maple [9] и Matlab [10]. В результате расчета были определены два значения толщины слоя

бетона t, удовлетворяющих условию (1). Для t = 0,198 м m_d и m_u составляют 0,018 МН·м/м, а для t = 0,372 м – 0,6327 МН·м/м. Графики изгибающих моментов приведены на *рис. 2*.

Анализ результатов расчета показывает, что первое решение задачи (точка I), при t = 0,198 м, может удовлетворять условию прочности (1) только теоретически *(см. рис. 2)*. Практика проектирования жестких покрытий под тяжелые самолеты свидетельствует о том, что покрытие такой незначительной толщины не обеспечивает несущую способность для самолета В–777 и, следовательно, не может быть принята во внимание. Второе решение (точка II) полностью соответствует требованиям к конструкциям покрытий *(см. рис. 2)*. Появление недопустимого решения объясняется особенностью конструкции шасси самолета В-777. Данный самолет имеет шестиколесную тележку опоры с колеей, превышающей базу. Исследования метода прочностного расчета, проведенные ранее, в основном рассматривали опоры четырех- и двухколесные, для которых такая точка решения задачи находится в области недопустимых толщин (менее 0,16 м). Единственным самолетом СССР с шестиколесной тележкой был Ту–154, но он не являлся расчетным, так как имел сравнительно небольшой взлетный вес. В настоящее время шестиколесную тележку имеет также самолет-гигант А–380, следовательно, данный недостаток метода расчета игнорировать нельзя.



1 и 2 – соответственно предельный и расчетный изгибающие моменты; I и II – первое и второе решение задачи

Рис. 2. ***Графики изгибающих моментов***

Вывод

Существующая методика прочностного расчета жестких аэродромных покрытий имеет важную особенность, которая заключается в том, что при расчете покрытия на нагрузку от самолета с шестиколесной опорой возможно получение неверного решения. Безусловно, это можно считать недостатком метода, требующего корректировки.

Для исправления указанного недостатка необходимы дополнительные исследования и расчеты, учитывающие многовариантность жестких покрытий и особенностей конструкций самолетных тележек современных и перспективных гражданских тяжелых и сверхтяжелых самолетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Коренев Б. Г., Черниговская Е. И.* Расчет плит на упругом основании. М. : Госстройиздат, 1962. 356 с.
2. *Коренев Б. Г.* Задачи теории теплопроводности и термоупругости. Решения в Бесселевых функциях. М. : Наука, 1980. 400 с.
3. *Татаринов В. В., Фомин А. В.* Расчет прогибов плиты аэродромного покрытия с учетом размера отпечатка авиашины // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2017. № 4(14). С. 4.
4. *Гаврилов В. С., Денисова Н. А., Калинин А. В.* Функции Бесселя в задачах математической физики. Нижний Новгород : Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2014. 40 с.
5. *Tatarinov V. V., Makarova E. A.* Rigid arfield pavement design [Жесткая конструкция аэродромного покрытия] // Science Journal of Transportation. 2015. No. 6. Pp. 45–47.
6. *Татаринов В. В.,* Хиеу Ван Нгуен. Оценка коэффициента динамичности аэродромного покрытия аэропорта «Камрань» (Вьетнам) // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2016. № 3(46). С. 98–103.
7. *Садовой В. Д.* Дифференциальное уравнение Бесселя. М. : МАДИ, 2019.100 с.
8. *Тимошенко С. П., Войновский-Кригер С.* Пластинки оболочки. М. : Наука, 1966. 636 с.
9. *Голоскоков Д. П.* Уравнения математической физики. Решение задач в системе Maple. СПб : Питер, 2004. 539 с.
10. *Семенов А. С., Якушев И. А., Егоров А. Н.* Математическое моделирование технических систем в среде MATLAB // Современные наукоемкие технологии. 2017. № 8. С. 56–64.

R E F E R E N C E S

1. Korenev B. G., Chernigovskaya E. I. *Raschet plit na uprugom osnovanii* [Calculation of plates on an elastic base]. Moscow, Gosstroiizdat Publ., 1962. 356 p. (In Russian).
2. Korenev B. G. *Zadachi teorii teploprovodnosti i termouprugosti. Resheniya v besselevykh funktsiyakh* [Problems of the theory of thermal conductivity and thermoelasticity. Solutions in Bessel functions]. Moscow, Nauka Publ., 1980. 400 p. (In Russian).
3. Tatarinov V. V., Fomin A. V. Calculation of deflections of the airfield pavement plate taking into account the size of the aircraft footprint. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*, 2017, no. 4(14), p. 4. (In Russian).
4. Gavrilov V. S., Denisova N. A., Kalinin A. V. *Funktsii Besselya v zadachakh matematicheskoi fiziki* [Bessel functions in mathematical physics problems]. Nizhnii Novgorod, Nizhegorodskiy gosuniversitet Publ., 2014, 40 p. (In Russian).
5. Tatarinov V. V., Makarova E. A. Rigid airfield pavement design. *Science Journal of Transportation*, no. 6, 2015, pp. 45–47.
6. Tatarinov V. V., Khieu Van Nguen. Estimation of the coefficient of dynamism of the airfield coverage of Cam Ranh airport (Vietnam). *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)*, 2016, no. 3(46), pp. 98–103. (In Russian).
7. Sadovoi V. D. *Differentsial'noe uravnenie Besselya* [Bessel's differential equation]. Moscow, MADI, 2019. 100 p. (In Russian).
8. Timoshenko S. P., Voinovskii-Kriger S. *Plastinki obolochki* [Shell plates]. Moscow, Nauka Publ., 1966, 636 p. (In Russian).
9. Goloskokov D. P. *Uravneniya matematicheskoy fiziki. Reshenie zadach v sisteme Maple* [Equations of mathematical physics. The decision in Maple system tasks]. St. Petersburg, Piter Publ., 2004. 539 p. (In Russian).
10. Semyonov A. S., Yakushev I. A., Egorov A. N. Mathematical modeling of technical systems in the MATLAB environment. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, 2017, no. 8, pp. 56–64. (In Russian).

Для цитирования: *Татаринов В. В., Фомин А. В., Макарова Е. А.* Особенности расчета на прочность жестких покрытий аэродромов // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 12. С. 30–33. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.12.30-33.

For citation: Tatarinov V. V., Fomin A. V., Makarova E. A. Special Feature of Calculating the Strength of Rigid Airfield Pavements. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2020, no. 12, pp. 30–33. (In Russian). DOI: 10.33622/0869-7019.2020.12.30-33.