
РЕМОНТ И СОДЕРЖАНИЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Научная статья

УДК 624.21(470.61)

EDN: MOMYNG



**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОДОЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПЛИТ
АЭРОДРОМНЫХ ПОКРЫТИЙ**

Владимир Аркадьевич Попов¹✉
Ирина Вадимовна Демьянушко²
Александр Андреевич Аверкиев³

¹ФАУ «РОСДОРНИИ», Москва, Россия

²Московский автомобильно-дорожный государственный
технический университет (МАДИ), Москва, Россия

³Федеральное агентство воздушного транспорта
(Росавиация), Москва, Россия

¹PopovVA@rosdornii.ru ✉

***Аннотация:** В статье представлен научный анализ возникновения потери продольной устойчивости цементобетонных аэродромных покрытий на основе системных натурных наблюдений и компьютерного моделирования с использованием метода конечных элементов. Даны практические рекомендации по обнаружению признаков возможного возникновения коробления плит аэродромных покрытий и проведению соответствующих профилактических мероприятий.*

***Ключевые слова:** жесткие аэродромные покрытия, продольная устойчивость плит, коробление покрытий, метод конечных элементов.*

Для цитирования: Попов В.А., Демьянушко И.В., Аверкиев А.А. Исследование продольной устойчивости плит аэродромных покрытий // Дороги и мосты. 2024. № 51/1. С. 53-69.

ROAD REPAIR AND MAINTENANCE

Original article

STUDY OF LONGITUDINAL STABILITY
OF AIRFIELD PAVEMENT SLABS

Vladimir A. Popov¹✉
Irina V. Demianyshko²
Aleksandr A. Averkiev³

¹FAI «ROSDORNII», Moscow, Russia

²Moscow Automobile State Technical University (MADI),
Moscow, Russia

³Federal Air Transport Agency (Rosaviatsia), Moscow, Russia

¹PopovVA@rosdornii.ru✉

Abstract: *The article deals with the scientific analysis of loss of longitudinal stability of cement concrete airfield pavements based on systematic field observations and computer modeling using the finite element method. Practical recommendations for detecting signs of possible curling of airfield pavement slabs and taking appropriate preventive measures are given.*

Keywords: *rigid airfield pavements, longitudinal stability of slabs, curling of pavements, finite element method.*

For citation: Popov V.A., Demianyshko I.V., Averkiev A.A. Study of longitudinal stability of airfield pavement slabs // Roads and Bridges. 2024; (51/1): 53-69. (In Russ.)

На цементобетонных покрытиях аэродромов со сроком службы от 3-5 лет и более в Российской Федерации и в зарубежных странах в летний период повышенных температур отмечаются случаи потери продольной устойчивости плит аэродромных покрытий. В документах по стандартизации Российской Федерации¹, а также в США² в классификации дефектов жестких аэродромных покрытий, такой дефект называется короблением.

¹ СП 491.1325800.2020. Аэродромы. Правила обследования технического состояния / Минстрой России. – М. – 2020. – 57 с.

² ASTM D 5340-12. Standard Test Method for Airport Pavement Condition Index Surveys. 2018. – 55 с.

Недооценка опасности появления этого дефекта, недостаточный опыт персонала аэродромных служб или невнимательное отношение специалистов к обнаружению и адекватной оценке симптомов возможного образования коробления бетонных плит, могут привести к закрытию аэродромов на значительный период времени или авиационным происшествиям.

Внезапное взбугривание покрытий является объектом исследований ученых и специалистов. Совершенствованию системного подхода к продлению эксплуатационного ресурса аэродромных конструкций посвящены работы [1-9], новые технологии восстановления работоспособности покрытий изложены в [10]. Описание повреждений аэродромных покрытий в соответствии с американским стандартом ASTM D 5340-12 приводится в [11-13].

Опасность коробления плит аэродромных покрытий для эксплуатации аэродрома состоит во внезапном нарушении ровности покрытия, взрывном характере подъема плит или их частей с образованием сколов, бетонных фрагментов, появление на покрытии крупноразмерных продуктов разрушения бетона.



Рис. 1. Коробление плит аэродромного покрытия

В соответствии с СП 491.1325800.2020, коробление – это подъем края плиты (фрагмента плиты) в районе поперечного шва, сопровождающийся разрушением, скалыванием, выкрашиванием кромки плиты в зоне шва.



Рис. 2. Разрушение прикромочной зоны шва

Причина потери продольной устойчивости (коробления) покрытия – температурное перенапряжение в плитах из-за отсутствия или засорения швов расширения.

Описание факторов, влияющих на потерю продольной устойчивости цементобетонных плит аэродромных покрытий, дано в работах [1-4]. Вместе с тем, чтобы провести научно обоснованный анализ механизма коробления цементобетонных плит аэродромных покрытий, выявить закономерности, необходимы системные натурные наблюдения и компьютерное моделирование с использованием метода конечных элементов (МКЭ)³ [14-15].

Новые аэродромные покрытия в первые годы эксплуатации, при условии правильно рассчитанного расстояния между швами расширения и их ширины, даже при экстремально высоких температурах не теряют своей продольной устойчивости. Швы расширения, находящиеся в работоспособном состоянии, выполняют свою функцию: при повышенных температурах смыкаются, воспринимая расширение плит; при пониженных температурах их ширина увеличивается. Напряжения, возникающие от воздействия друг на друга соседних плит при их расширении от нагре-

³ ОДМ 218.3.051-2015. Рекомендации по определению напряженно-деформированного состояния многослойных дорожных одежд / Федеральное дорожное агентство (Росавтодор). – М. – 2015. – 155 с.

вания, в этом случае направлены вдоль оси, без эксцентриситета, а значит, при нулевом плече не создают момента силы, который может вызвать подъем плиты.

По причине отсутствия эксцентриситета не происходит коробления плит даже при полностью сомкнутых швах расширения. Вместе с тем, сомкнутые швы расширения – это очень тревожный симптом, связанный с опасностью локального разрушения плит и коробления.

В результате неравномерного нагрева верхняя часть плиты расширяется в большей степени, чем нижняя. Увеличивающиеся напряжения от действующих на плиты продольных сжимающих усилий при неравномерном нагреве приводят к выпуклому изгибу плит (рис. 3, 4). Это явление также сигнализирует о возрастающей опасности возникновения внезапного коробления покрытия.



Рис. 3. Выпуклый изгиб плиты

На рис. 4 вдоль линии разметки виден выгиб плит по всей длине пути руления воздушных судов, образовавшийся в результате напряжений, возникших в цементобетонных покрытиях из-за температурного расширения плит.

Следует отметить, что при моделировании, расчете и анализе напряженно-деформированного состояния жестких аэродромных покрытий при воздействии на них высоких положительных температур в раз-

ных эксплуатационных режимах высокую эффективность показало применение параметрических конечно-элементных (КЭ) моделей комплекса MARK-MENTAT.



Рис. 4. Выпуклый изгиб плит покрытия

КЭ-модель учитывает размеры плит и температурных швов, свойства материалов и геометрические параметры слоев конструкции, типы контактов, граничные условия, установленные зависимости, закономерности и др. Параметрическая форма КЭ-модели позволяет автоматизировать процессы преобразования одной КЭ-модели в другую с измененными параметрами и густотой КЭ-сетки, при этом использовать имеющиеся возможности библиотек мультидисциплинарного КЭ-комплекса для упрощения расчетов.

Результаты расчетов, представленные в работах [14-16] на действие экстремально высоких температур в сочетании с отсутствием возможности горизонтальных перемещений плит, т.е. уже с сомкнутыми швами расширения, представлены на **рис. 5**.

Очевидно, что расчетные значения перемещений плиты покрытия, полученные с помощью параметрической конечно-элементной модели конструкций жесткого аэродромного покрытия (**рис. 5**), достаточно хорошо согласуются с результатами натуральных наблюдений (**рис. 3, 4**).

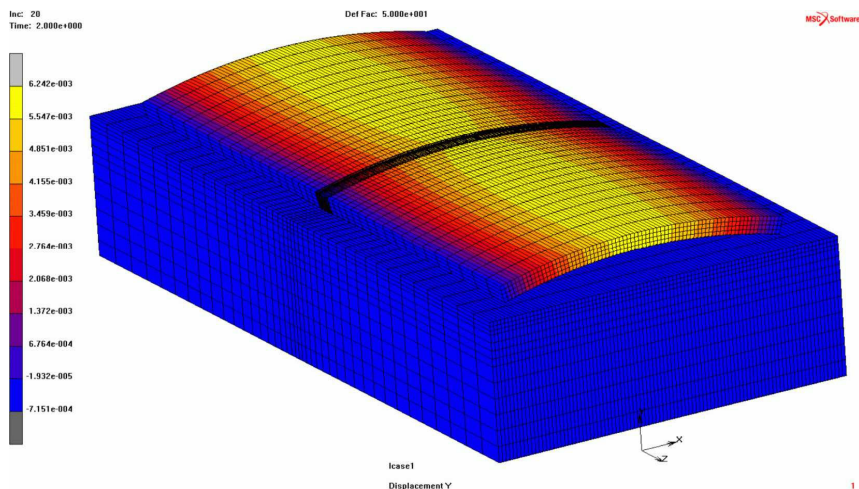


Рис. 5. Вертикальные перемещения плит покрытия при нагреве в летний период (пятидесятикратное увеличение перемещения)

Если деформационные швы разгерметизированы и засорены инертными материалами (**рис. 6**), они перестают компенсировать температурные расширения плит, а это, в свою очередь, вызывает повреждения плит в виде трещин и сколов. При этом передача продольных усилий от плиты к плите будет происходить не по всему торцу плит, распределяясь равномерно, а концентрироваться в местах заполнения швов продуктами разрушения бетона, что и приведет к сколообразованию.



Рис. 6. Расклинивание шва

Сколы в нижней части плиты повлекут смещение продольных сжимающих сил в верхнюю часть плиты, выше ее осевой плоскости, а образование сколов в верхней части плиты, обусловит смещение вектора равнодействующих продольных сил в нижнюю половину плиты. В этом случае у сжимающей силы возникает плечо, равное смещению от осевой плоскости плиты, а следовательно, возникает крутящий момент, стремящийся нарушить продольную устойчивость плиты.

Наиболее опасные условия характерны для плит, у которых в одном из поперечных швов образовались сколы в нижней части, а в другом – возникли сколы в верхней части плиты. Вероятность коробления в этом случае максимальная.

Рассмотрим случай сколообразования в пришовной зоне цементобетонной плиты, что способствовало образованию эксцентриситета (рис. 7) и соответствующего момента относительно точки x (1):

$$M_1 = F \left(h_{nl} - \frac{h_1}{2} \right), \quad (1)$$

которому противодействует момент:

$$M_2 = F \frac{h_2}{2}. \quad (2)$$

Суммарный момент равен:

$$M_0 = M_1 + M_2. \quad (3)$$

Момент от собственного веса плиты относительно точки вращения равен:

$$M_3 = \frac{PL_{пл}}{2}, \quad (4)$$

где

P – равномерно распределенная нагрузка от плиты ($P = mg$);

m – масса плиты;

g – ускорение свободного падения.

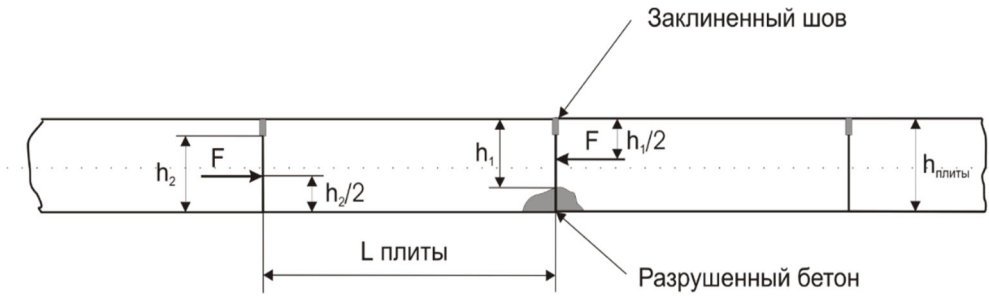


Рис. 7. Образование эксцентриситета

Очевидно, что при разрушении бетонной плиты в нижней зоне в период эксплуатации постепенно снижается ее устойчивость. При нарушении неравенства (5) наступает момент коробления покрытия:

$$M_0 \leq M_3 \quad (5)$$

Из формул (3) и (4) также очевидно, что масса плиты имеет значение для обеспечения ее устойчивости.

Вместе с тем, в результате роста напряжений, вызванных увеличением сжимающих усилий от соседних плит, возможно превышение предела прочности бетона на сжатие и возникновение продольных трещин внутри плиты (рис. 8). Впоследствии верхний слой такой плиты будет представлять собой отдельный слой, характеризующийся конкретными геометрическими параметрами, в том числе и толщиной.



Рис. 8. Образование внутренних трещин, разделяющих плиту на слои

В этом случае вероятность коробления будет значительно выше, так как толщина этого слоя будет меньше толщины плиты, а чем меньше собственный вес плиты, тем меньше момент, препятствующий короблению. На **рис. 1** отчетливо видно, что коробление произошло в верхней части расслоившихся плит.

Контролируемые параметры при мониторинге признаков коробления цементобетонных плит можно системно сгруппировать следующим образом:

1. Климатические параметры:
 - температура воздуха – $t_{возд.}$;
 - температура поверхности покрытия – $t_{покр.}$;
 - сила ветра – w ;
 - продолжительность высоких температур – T .
2. Геометрические параметры плит:
 - толщина плиты – $h_{пл}$;
 - длина плиты – $l_{пл}$.
3. Параметры швов расширения:
 - ширина швов расширения – $b_{ш}$;
 - расстояние между швами расширения – $L_{шр}$.
4. Состояние торцов плит:
 - площадь сколов – $S_{ск}$;
 - смещение равнодействующей сжимающей силы (эксцентриситет) – $e_{сж}$.

Анализ формул (1-5), описывающих механизм возникновения коробления бетонных аэродромных покрытий, позволяет отметить также и другие зависимости:

1. Очевидно, что у плит с большими значениями величин $h_{пл}$ и $l_{пл}$ собственный вес больше, чем у малоразмерных, и, в связи с этим, вероятность коробления меньше. В том случае, если на плите появилась поперечная силовая (сквозная) трещина, то необходимо принять во внимание, что таким образом плита разделяется на фрагменты, длина которых равна расстоянию от шва до трещины, т.е. длина $l_{пл}$ сокращается. Практическая значимость этого вывода заключается в том, что в процессе эксплуатации цементобетонного покрытия, испытывающего экстремальные температурные воздействия, необходимо своевременно диагностировать фрагментацию плит в результате образования сквозных поперечных трещин, что повышает вероятность коробления. Путем компьютерного моделирования с использованием метода конечных элементов выполнены расчеты предельной степени разрушения торцевой плоскости плиты для

разных длин плит в момент потери продольной устойчивости (рис. 9), результаты которых приведены в работах [14].

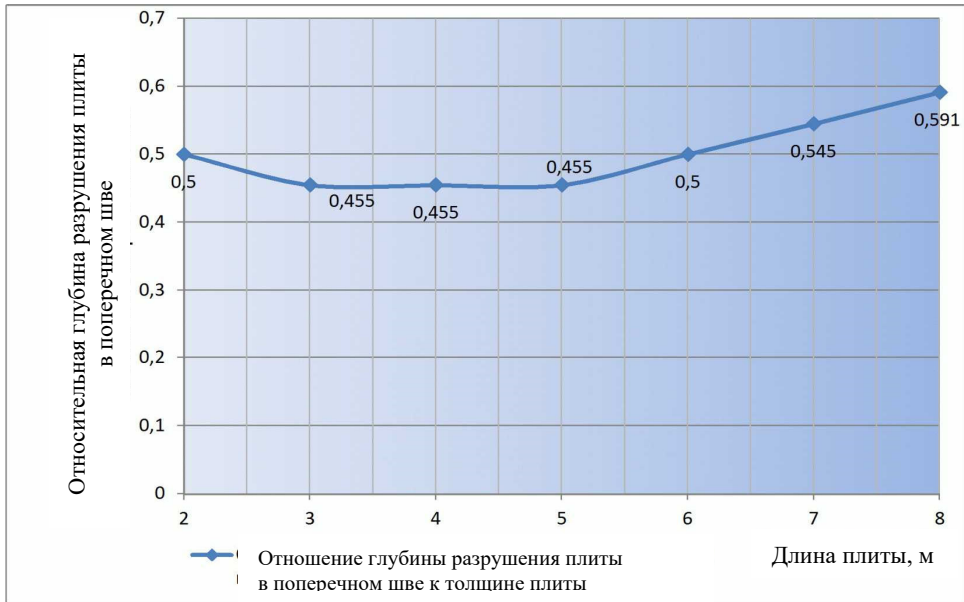


Рис. 9. Зависимость между длиной плиты и минимальным ее ослаблением в поперечном шве, при котором происходит потеря продольной устойчивости

2. Выпуклый изгиб плит аэродромного покрытия (рис. 3, 4) свидетельствует о сжимающих напряжениях, возникших в цементобетонных покрытиях из-за температурного расширения плит, которые могут привести к образованию внутренней слоистой системы (рис. 7). Вследствие этого уменьшится сдерживающий фактор – момент от собственного веса плиты, так как толщина фрагмента плиты $h_{пл}$ будет меньше, тем самым значительно увеличивается опасность коробления. С практической точки зрения это означает, что при обнаружении сомкнутых швов расширения и создании условия для роста сжимающих напряжений, приводящих к выпуклому изгибу плит, необходимо оперативно выполнить нарезку компенсационных швов расширения, чтобы устранить температурные напряжения.

3. Образование сколов в пришовной зоне как в подошве плиты, так и на ее поверхности приводит к образованию эксцентриситета равнодействующей сжимающей силы $e_{сж}$. Чем больше площадь разрушенной шовной плоскости $S_{ск}$, тем больше плечо силы $e_{сж}$ и численное значение

крутящего момента, соответственно возрастает опасность коробления. Для исключения рисков коробления плит необходимо оперативно устранять сколы кромок швов.

В работе [14] приведен график, построенный на основе результатов расчетов с применением КЭ-модели жесткого покрытия при стационарном температурном воздействии. Данный график показывает изменение степени разрушения торцевой плоскости $s_{ск}$ плит в момент коробления в зависимости от их толщины (рис. 10).

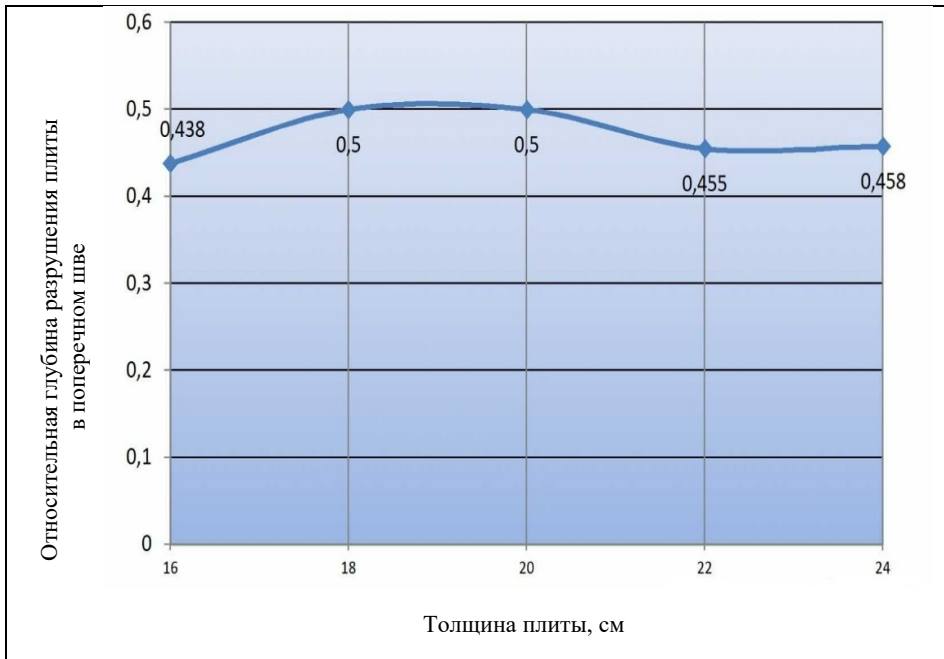


Рис. 10. Зависимость между толщиной плиты и относительной глубиной ее разрушения при потере продольной устойчивости

Для термостатирования плит аэродромного покрытия (стабилизации деформационных процессов, соответствующих изменению температуры) требуется время, зависящее от толщины плиты $h_{пл}$, продолжительности нагрева (T), наличия охлаждающих факторов, например, ветра и воды, теплопередачи от верхнего слоя покрытия к нижним слоям.

Напряжения вследствие температурных колебаний можно определить по формуле:

$$\sigma = L_{уп} \times \lambda \times \Delta t \times \beta , \quad (6)$$

$$\sigma = L_{шр} \times \lambda \times \Delta t \times \beta , \quad (6)$$

где

λ – коэффициент линейного расширения бетона;

Δt – изменение температуры;

β – коэффициент, учитывающий сжимаемость податливой прокладки.

Изменение температуры важно учитывать как приращение температуры при укладке бетона ($t_{укл.}$) к температуре в рассматриваемый период ($t_{покp.}$):

$$\Delta t = t_{покp.} - t_{укл.} . \quad (7)$$

Несмотря на то, что коробление цементобетонных плит происходит внезапно, своевременный мониторинг, наряду с четким выявлением первичных признаков и оперативным проведением текущих ремонтных мероприятий на основе специальных технологий, гарантирует обеспечение продольной устойчивости цементобетонных плит и эксплуатацию аэродромных покрытий в соответствии с требованиями нормативно-технической документации.

В целях диагностирования признаков возможного возникновения коробления плит аэродромных покрытий можно сформулировать следующие практические рекомендации:

- предлагается осуществлять особый контроль работы швов жестких покрытий в период высоких температур. Важно увеличить количество осмотров искусственных покрытий. При необходимости скорректировать расписание взлетно-посадочных операций для обеспечения проведения осмотров;

- при осмотрах регистрировать размер швов расширения, контролировать процесс уменьшения их ширины;

- не допускать разгерметизации и расклинивания швов расширения;

- отмечать случаи выдавливания мастики из швов расширения и оценивать степень сужения швов; не допускать образования наплывов мастики на поверхности покрытия;

- при смыкании швов расширения нарезать компенсационные швы;

- регулярно ремонтировать прикромочные зоны плит;

- своевременно обнаруживать образование уступов кромок плит;

рассмотреть возможность установки систем автоматической регистрации изменения ширины швов расширения, а также датчиков измерения температуры поверхности бетона, передающих данные в онлайн режиме.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Виноградов А.П. Эксплуатационный ресурс аэродромных покрытий / А.П. Виноградов. – Диагностика, ремонт, реконструкция и строительство аэродромных покрытий. – М.: ЗАО «Светлица». – 2015. – С. 51-62.
2. Управление состоянием аэродромных покрытий / Под общ. ред. В.Н. Иванова. – М.: Воздушный транспорт, 2010. – 124 с.
3. Виноградов А.П. // Продление эксплуатационного ресурса покрытий автомобильных дорог и аэродромов / А.П. Виноградов, В.Н. Иванов, Г.Н. Козлов, Л.Н. Козлов, В.Л. Куликов, В.А. Попов. – М.: Ирмаст-Холдинг, 2001. – 170 с.
4. Попов В.А. Долговечность эксплуатируемых бетонных покрытий аэродромов / В.А. Попов. – М.: Техполиграфцентр, 2007. – 192 с.
5. Суладзе М.Д. Эксплуатационно-техническое состояние жестких аэродромных покрытий / М.Д. Суладзе, В.К. Федулов. – М.: Наука, 2019. – 102 с.
6. Андронов В.Д. Надежность бетонных покрытий аэродромов после выполнения ремонтных работ / В.Д. Андронов // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2021. – № 2 (65). – С. 56-60.
7. Alte-Teigeler R., Recknagel C., Sondermann E. Kommentare zu den Regelungen fuer Fugen in Verkehrsflaechen // Strasse und Autobahn. – 2005. – No 11. – P. 1-32.
8. Федулов В.К. Исследование влияния ремонтных вставок на изменение напряженного состояния жестких искусственных покрытий дорог и аэродромов / В.К. Федулов, Л.Ю. Артемова, М.Д. Суладзе // Промышленное и гражданское строительство. – 2015. – № 2. – С. 59-62.
9. Радовский Б.С. Проблема повышения долговечности дорожных одежд и методы ее решения в США. Продление срока службы дорожных покрытий / Б.С. Радовский // Дорожная техника. – № 6. – 2006. – С. 108-118.
10. Лещицкая Т.П. Современные методы ремонта аэродромных покрытий / Т.П. Лещицкая, В.А. Попов. – МАДИ: – М., 1999. – 129 с.

11. Кульчицкий В.А. Аэродромные покрытия. Современный взгляд / В.А. Кульчицкий, В.А. Макагонов, Н.Б. Васильев, А.Н. Чеков, Н.И. Романков – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 528 с.
12. Степушин А.П. Оценка эксплуатационно-технического состояния аэродромных покрытий: учеб. пособие / А.П. Степушин. – М.: МАДИ (ГТУ). – 2008. – 112 с.
13. Степушин А.П. Расширение и реконструкция аэродромов / А.П. Степушин. – М.: МАДИ (ГТУ), 2004. – 209 с.
14. Демьянушко И.В. Продольная устойчивость жесткого дорожного покрытия при температурном воздействии / И.В. Демьянушко, В.А. Попов, В.М. Стаин, А.В. Стаин // Транспортное строительство. – 2012. – № 5. – С. 4-7.
15. Демьянушко И.В. Конечно-элементные модели для расчета плиты жесткого дорожного покрытия / И.В. Демьянушко, В.П. Носов, В.М. Стаин, А.В. Стаин // Транспортное строительство. – 2012. – № 4. – С. 7-10.

REFERENCES

1. Vinogradov A.P. *Ekspluatacionnyj resurs aerodromnyh pokrytij* / A.P. Vinogradov. – *Diagnostika, remont, rekonstrukcija i stroitel'stvo aerodromnyh pokrytij*. – М.: ЗАО «Svetlica». – 2015. – S. 51-62.
2. *Upravlenie sostojaniem aerodromnyh pokrytij* / Pod obshchej redakciej V.N. Ivanova. – М.: *Vozdushnyj transport*, 2010. – 124 s.
3. Vinogradov A.P. // *Prodlenie ekspluatacionnogo resursa pokrytij avtomobil'nyh dorog i aerodromov* / A.P. Vinogradov, V.N. Ivanov, G.N. Kozlov, L.N. Kozlov, V.L. Kulikov, V.A. Popov. – М.: *Irmast-Holding*, 2001. – 170 s.
4. Popov V.A. *Dolgovechnost' ekspluatiruemyh betonnyh pokrytij aerodromov* / V.A. Popov. – М.: *Tekhpolicgrafcentr*, 2007. – 192 s.
5. Suladze M.D. *Ekspluatacionno-tehnicheskoe sostojanie zhestkih aerodromnyh pokrytij* / M.D. Suladze, V.K. Fedulov. – М.: *Nauka*, 2019. – 102 s.
6. Andronov V.D. *Nadezhnost' betonnyh pokrytij aerodromov posle vypolneniya remontnyh rabot* / V.D. Andronov // *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)*. – 2021. – № 2 (65). – S. 56-60.
7. Alte-Teigeler R., Recknagel C., Sondermann E. *Kommentare zu den Regelungen fuer Fugen in Verkehrsflaechen* // *Strasse und Autobahn*. – 2005. – No 11. – P. 1-32.

8. Fedulov V.K. Issledovanie vliyaniya remontnykh vstavok na izmenenie napryazhennogo sostoyaniya zhestkih iskusstvennykh pokrytij dorog i aerodromov / V.K. Fedulov, L.Yu. Artemova, M.D. Suladze // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2015. – № 2. – S. 59-62.
 9. Radovskij B.S. Problema povysheniya dolgovechnosti dorozhnykh odezhd i metody ee resheniya v USA. Prodlenie sroka sluzhby dorozhnykh pokrytij / B.S. Radovskij // Dorozhnaya tekhnika. – № 6. – 2006. – S. 108-118.
 10. Leshchickaya T.P., Popov V.A. Sovremennye metody remonta aerodromnykh pokrytij / T.P. Leshchickaya, V.A. Popov. – MADI: – M., 1999. – 129 s.
 11. Kul'chickij V.A. Aerodromnye pokrytiya. Sovremennyy vzglyad / V.A. Kul'chickij, V.A. Makagonov, N.B. Vasil'ev, A.N. Chekov, N.I. Romankov – M.: FIZMATLIT, 2002. – 528 s.
 12. Stepushin A.P. Ocenka ekspluatacionno-tekhnicheskogo sostoyaniya aerodromnykh pokrytij: ucheb. posobie / A.P. Stepushin. – M.: MADI (GTU). – 2008. – 112 s.
 13. Stepushin A.P. Rasshirenje i rekonstrukciya aerodromov / A.P. Stepushin. – M.: MADI (GTU), 2004. – 209 s.
 14. Dem'yanushko I.V. Prodol'naya ustojchivost' zhestkogo dorozhnogo pokrytiya pri temperaturnom vozdejstvii / I.V. Dem'yanushko, V.A. Popov, V.M. Stain, A.V. Stain // Transportnoe stroitel'stvo. – 2012. – № 5. – S. 4-7.
 15. Dem'yanushko I.V. Konechno-elementnye modeli dlya rascheta plity zhestkogo dorozhnogo pokrytiya / I.V. Dem'yanushko, V.P. Nosov, V.M. Stain, A.V. Stain // Transportnoe stroitel'stvo. – 2012. – № 4. – S. 7-10.
-

Информация об авторах

В.А. Попов – кандидат технических наук, ФАУ «РОСДОРНИИ», Москва, Россия

И.В. Демьянушко – доктор технических наук, профессор, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

А.А. Аверкиев – начальник управления аэропортовой деятельности, Федеральное агентство воздушного транспорта (Росавиация), Москва, Россия

Information about the authors

V.A. Popov – Ph. D. (Tech.), FAI «ROSDORNII», Moscow, Russia

I.V. Demianyshko – Doctor of Engineering, Professor, Moscow Automobile state technical university (MADI), Moscow, Russia

A.A. Averkiev – Head of the Airport Operations Department, the Federal Air Transport Agency (Rosaviatsia), Moscow, Russia

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Рецензент: д-р техн. наук, профессор Э.М. Добров, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ).

Статья поступила в редакцию 12.03.2024. Одобрена после рецензирования 15.04.2024. Принята к публикации 24.04.2024.

The article was submitted 12.03.2024. Approved after reviewing 15.04.2024. Accepted for publication 24.04.2024.