

УДК 625.717.2:625.84(083.74)

НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ НОВОГО ПРИНЦИПА РАЗДЕЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ВПП АЭРОДРОМОВ НА ХАРАКТЕРНЫЕ ГРУППЫ УЧАСТКОВ

Канд. техн. наук Э.С. Цопанов
(ФГУП ГПИ и НИИ ГА «Аэропроект»)
Контактная информация: tsopanov@aeroproject.ru

Статья касается анализа сложившейся ситуации эксплуатации аэродромных покрытий жесткого типа в действующих аэропортах. Описана проблема неравномерной прочности цементобетона на характерных участках покрытий взлетно-посадочной полосы (ВПП). На основе результатов проведенного анализа выполнена модернизация нормативной базы. Даны рекомендации специалистам по проектированию и эксплуатации аэродромных покрытий жесткого типа.

Ключевые слова: аэродромные покрытия жесткого типа, взлетно-посадочная полоса (ВПП), цементобетон, прочность, характерные участки.

1. ВВЕДЕНИЕ

До настоящего времени (до 2023 года) в области проектирования и эксплуатации аэродромных покрытий действовал норматив, определяющий разделение аэродромных покрытий жесткого типа на характерные участки [1]. Такое требование в нормативных документах было принято более 50 лет назад, когда на аэродромах эксплуатировались сравнительно легкие (по современным меркам) самолеты. Всего было установлено четыре типа характерных участков.

Однако значительные расхождения между реальной практикой и упомянутым выше нормативом специалистами-проектировщиками отмечались достаточно давно.

Согласно данным, получаемым в ходе обследования покрытий, такие повреждения, как трещины, сколы бетона, шелушение, распределены по площади взлетно-посадочной полосы (ВПП) неравномерно. Например, трещины концентрируются на центральных рядах, в то время как шелушение – на крайних боковых. Отмеченная неравномерность не учи-

тывается при проектировании, что вызывает преждевременный отказ покрытий.

На основе результатов научных исследований, с учетом накопленной информации по эксплуатации покрытий, специалистами ФГУП ГПИ и НИИ ГА «Аэропроект» была проведена работа по значительной корректировке основного нормативного документа СП 121.13330.2019 «Аэродромы»¹. Данной корректировкой предусмотрено изменение схемы деления аэродромных покрытий на группы участков, учитывающих отмеченную выше неравномерность повреждений на эксплуатируемых (и спроектированных по проектам) аэродромах.

2. Накопление повреждений (теоретические аспекты)

2.1. Оценка повреждений

Новый принцип разделения покрытий на характерные участки заключается в том, что эти участки определяются по объему и характеру повреждений, имея ввиду причинно-следственную связь между повреждениями силового или природно-климатического характера.

В соответствии с действующими правилами [2] обязательному учету подлежат три основных вида повреждений: трещины; сколы на кромках плит; шелушение бетона. В общем случае рассмотрим несколько частных функций, которые характеризуют накопление повреждений каждого вида: $F_1(x)$; $F_2(x)$; $F_3(t)$...

В работе [3] показано, что для повреждений усталостного характера (силовых трещин) функция $F_1(x)$ определяется выражением:

$$F_1(x) = \int_0^{\infty} f_1(x) dx, \quad (1)$$

где

$x = \lg n$, n – число нагружений;

$n = \varphi t$, φ – число нагружений в течение календарного года;

t – время (годы);

$f_1(x)$ — плотность распределения, определяемая средним значением $x_{ср}$ и средним квадратическим отклонением $\eta X_{ср}$.

¹ Приказ Минстроя России от 20.12.2022 № 1087/пр «Об утверждении Изменения № 1 к СП 121.13330.2019 «СНиП 32-03-96 Аэродромы».

Для нормального распределения имеем:

$$f_1(x) = \frac{1}{\eta_{x1}\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-x_{cp})^2}{2\eta_{x1}^2}} . \quad (2)$$

Другой вид повреждений – сколы на краях плит могут быть также вызваны усталостью бетона, так как они, как правило, проявляются при многократном нагружении, поэтому функция $F_2(x)$ может быть записана аналогичным выражением:

$$F_2(x) = \int_0^{\infty} f_2(x) dx ; \quad (3)$$

$$f_2(x) = \frac{1}{\eta_{x2}\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-x_{cp})^2}{2\eta_{x2}^2}} . \quad (4)$$

Третья функция согласно принятому выше определению не зависит от числа нагружений. Она определяется временем эксплуатации покрытия и характеризует накопление повреждений, которые носят случайный характер [3]. К таким повреждениям могут быть отнесены шелушение, раковины. Плотность распределения определяется экспоненциальным законом и описывается следующим выражением:

$$f_3(t) = \lambda e^{-\lambda t} , \quad (5)$$

где

λ – интенсивность образования повреждений.

В результате интегрирования получим:

$$F_3(t) = \int_0^t \lambda e^{-\lambda t} = 1 - e^{-\lambda t} . \quad (6)$$

Выполним вычисления по формуле (6) и построим график $F_3(x)$ для различных значений λ (рис. 1).

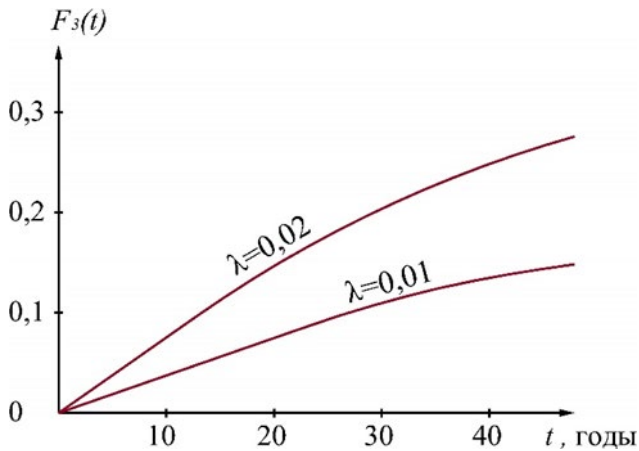


Рис. 1. Зависимость повреждений покрытия от времени его эксплуатации

Из этого графика следует, что функция $F_3(x)$ практически линейна в диапазоне от 0,0 до 0,3, и поэтому её можно представить в виде следующего выражения:

$$F_3(t) = kt, \quad (7)$$

где

k – коэффициент, определяемый по фактическим данным, полученным при обследовании конкретного покрытия.

Введем обозначения:

$$F_1(x) + F_2(x) = D(x); \quad (8)$$

$$F_3(t) = D(t). \quad (9)$$

Тогда с учетом коэффициентов весомости повреждений α можно записать:

$$D(x) + D(t) = \alpha_1 \int_0^{\infty} f_1(x) dx + \alpha_2 \int_0^{\infty} f_2(x) dx + \alpha_3(kt). \quad (10)$$

Оценка состояния покрытия с использованием пятибалльной шкалы может быть вычислена по следующему выражению:

$$S_k = 5,0 - [D(x) + D(t)] . \quad (11)$$

Для определения значений $D(x)$ можно воспользоваться стандартной таблицей функций Лапласа.

График, построенный по этой таблице (рис. 2, кривая СТ), свидетельствует о том, что при удалении от среднего значения на:

$$4\eta ,$$

где

η – среднее квадратическое отклонение,
величина $D(x) \cong 0,0$.

Поэтому можно записать:

$$M = 4\eta .$$

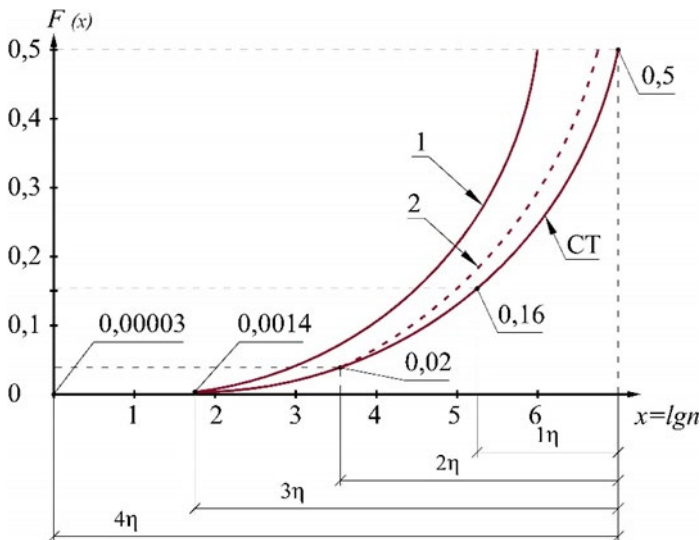


Рис. 2. Кривая СТ

При отсутствии данных обследований покрытия за последний период следует использовать номограмму, составленную из таких графиков для прогнозирования состояния покрытия. Потребуются данные только на момент оценки.

Для иллюстрации ниже приведен следующий пример.

Покрытие прослужило 10 лет ($t = 10$). Количество нагрузжений $n = 100000$. Зафиксированы повреждения: трещины – на двадцати процентах плит [$D(x) = 0,20$], сколы – на пятнадцати [$D(x) = 0,15$] и шелушение – на двух процентах плит [$D(t) = 0,02$]. Требуется оценить покрытие на пятнадцатый год эксплуатации. Выполним следующие расчеты:

1. Количество нагрузжений за 15 лет:

$$n_{15} = \frac{100000 \cdot 15}{10} = 150000.$$

2. На графике (рис. 2) находим кривую для точки с координатами: $n = 100000$; $D(x) = 0,2$. Эту кривую обозначим цифрой 1. Аналогично – для другой точки с координатами: $n = 100000$; $D(x) = 0,15$. Кривую обозначаем цифрой 2.

3. По найденным кривым имеем:

при $n = 150000 \rightarrow D(x) = 0,23$ (23%) – для трещин;

$D(x) = 0,17$ (17%) – для сколов;

4. Из формулы (7) имеем $D(t) = \frac{0,2 \cdot 15}{10} = 0,3$ (3 %).

5. Оценка состояния Sk на 15 год эксплуатации:

$$Sk(15) = 5,0 - (23 \cdot 0,05 + 17 \cdot 0,1 + 3 \cdot 0,03) = 2,06.$$

Для сравнения: Sk на 10 год:

$$Sk(10) = 5,0 - (20 \cdot 0,05 + 15 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,03) = 2,44.$$

Если покрытие не ремонтируется, то при $S_k \cong 2$ определится его срок службы. Продолжение эксплуатации возможно только после выполнения ремонтных работ, включая работы по замене плит. Оценивать такую возможность в реальных условиях объекта рекомендуется с помощью коэффициента ремонтпригодности:

$$K_p = \frac{t_n}{t_p}, \quad (12)$$

где

t_n – отрезок, необходимый для выполнения операций по ремонту или замене плиты;

t_p – продолжительность технологического перерыва между полетами самолетов, выделяемого для выполнения ремонта.

Очевидно, что численные значения коэффициента K_p находятся в следующих пределах: $0 < K_p < 1,0$.

При $K_p = 1,0$ произойдет отказ покрытия, так как ремонтные работы далее производить невозможно. Очевидно, что предпочтение следует отдавать ремонтным технологиям, которые характеризуются наименьшим значением t_n . Можно считать, что на настоящий момент величина t_n при замене плит составляет 7-8 ч. Следует отметить, что замена плит является наилучшим вариантом восстановления работоспособности покрытия [4]. Для сокращения времени t_n в Российской Федерации и за рубежом ведутся разработки новых технологий быстрой замены плит, которые показывают, что время t_n может быть сокращено до 3-4 ч, что позволит существенно повысить срок службы покрытий.

2.2. Вероятность повреждений

Вероятность повреждений (Q) за отрезок времени (t), может быть определена из следующего выражения:

$$Q_0(t) = Q_B(t) + Q_{И}(t) - Q_B(t) * Q_{И}(t) ,$$

где

индексы «в» и «и» указывают на внезапный и износный характер повреждений.

(13)

Оценкой вероятности Q является величина D , равная отношению количества повреждений плит $N_{П}$ к общему количеству плит на рассматриваемом участке N_0 :

$$\bar{Q} = D = \frac{N_{П}}{N_0} .$$

(14)

Например, если $\frac{N_{П}}{N_0} = 0,10$ (т.е. 1 %) для повреждений внезапного характера и $\frac{N_{П}}{N_0} = 0,20$ (т.е. 2 %) для износных повреждений, то величина $\bar{Q}_0(t)$ определяется следующим образом:

$$\bar{Q}_0(t) = 0,01 + 0,02 - 0,01 \cdot 0,02 = 0,03 - 0,0002 .$$

Для практических расчетов произведением ($0,01 \cdot 0,02 = 0,0002$) можно пренебречь из-за его малости. Тогда выражение (1) упрощается и принимает вид:

$$\bar{Q}_0(t) = \bar{Q}_B(t) + \bar{Q}_{И}(t) .$$

(15)

В этом выражении:

$$\bar{Q}_b(t) = 1 - e^{-\lambda t} ; \quad (16)$$

$$\bar{Q}_n(t) = \frac{\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_T^{T+t} e^{-\frac{(T-m)^2}{2\sigma^2}} \partial T}{\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_1^{\infty} e^{-\frac{(T-m)^2}{2\sigma^2}} \partial T} = \frac{N_{6П}}{N_{об}} , \quad (17)$$

где

$N_{6П}$ – количество плит без повреждений;

$N_{об}$ – общее количество плит.

Надежность покрытия с повреждениями рассчитывается из выражения:

$$R(t) = 1 - Q(t).$$

Для ВПП все участки покрытия независимо от их расположения являются равновесными. Их весомость в обеспечении безопасности взлетов, посадок самолетов одинакова. Поэтому можно принять, что эти участки соединены последовательно (**рис. 3**), их общая надежность будет равна произведению:

$$R_0(t) = R_1(t) * R_2(t) * R_3(t) * R_4(t) * R_5(t) * R_6(t) * R_7(t) = \prod_{i=1}^{i=7} R_i(t) . \quad (18)$$

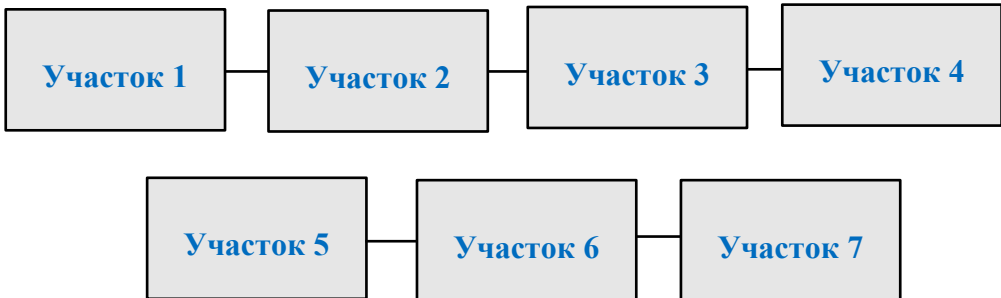


Рис. 3. Участки ВПП

Из выражения (18) следует, что выход из строя хотя бы одного участка приводит к «закрытию» ВПП для полётов.

На практике часто (почти всегда) дается общая оценка покрытия. Тем не менее эта оценка является некорректной. Например, на покрытии зафиксированы различные повреждения на участках (**табл. 1**).

Таблица 1

№ участка	Вид повреждения			D1+D2+D3	R = 1 - (D1 + D2 + D3)
	D1 (сколы)	D2 (трещины)	D3 (шелушение)		
1	0,02	0,04	0,01	0,07	0,93
2	0,03	0,05	0,04	0,12	0,88
3	0,05	0,07	0,03	0,15	0,85
4	0,09	0,01	0,06	0,16	0,84
5	0,01	0,01	0,05	0,07	0,93
6	0,01	0,03	0,03	0,07	0,93
7	0,02	0,05	0,04	0,11	0,89

По данным, приведенным в табл. 1, имеем:

- по формуле:

$$R = \prod_{i=1}^7 = 0,42 ;$$

- по формуле среднего арифметического:

$$R = \frac{\sum R_i}{n} = 0,89 .$$

Очевидно, можно отметить существенную разницу между значениями. Если по формуле средняя арифметическая надежность покрытия ВПП составляет $0,89 \approx 0,9$, что может быть признано как приемлемый вариант, то расчет по формуле (18) дает основание отнести оцениваемое покрытие к покрытию, на котором необходимо выполнить ремонтные работы.

Если учесть коэффициент весомости повреждений, который обычно используют при оценке эксплуатационно-технического состояния покрытий [5], то получим аналогичные выводы (табл. 2).

Таблица 2

№ участка	Вид повреждения			$D1 \cdot 0,1 + D2 \cdot 0,05 + D3 \cdot 0,03$	$R = 1 - (D1 \cdot 0,1 + D2 \cdot 0,05 + D3 \cdot 0,03)$
	$D1 \cdot 0,1$	$D2 \cdot 0,05$	$D3 \cdot 0,03$		
1	0,002	0,002	0,003	0,0043	0,9957
2	0,003	0,0025	0,0012	0,0067	0,9933
3	0,005	0,0035	0,0009	0,0094	0,9906
4	0,009	0,005	0,0018	0,0158	0,9842
5	0,001	0,005	0,0015	0,0075	0,9925
6	0,001	0,0015	0,0009	0,0034	0,9966
7	0,002	0,025	0,0012	0,0282	0,9718

Ниже приведем поясняющий пример.

Для расчета приняты следующие значения коэффициентов весомости: для $D1 - 0,1$; для $D2 - 0,05$; для $D3 - 0,03$.

В результате имеем:

– по формуле (18): $R = 0,93$;

– по формуле среднего арифметического: $R = 0,99$.

Убеждаемся, что величина $\frac{\sum R_i}{n}$ дает более высокие (но некорректные) результаты. Для решения нашей задачи следует пользоваться величиной:

$$R = \prod_{i=1}^7 R_i(t) . \quad (19)$$

Для быстрой оценки можно порекомендовать такой подход: выявляется поврежденный участок ВПП; определяется его расположение и размеры; выполняется расчет надежности покрытия по формуле (19). Полученное значение можно принять в качестве надежности покрытия по всей ВПП, так как, согласно выражению (19), это значение будет всегда наименьшим, учитывая, что надежность на всех участках покрытия всегда меньше или равна единице.

3. ВЫВОДЫ

На основании изложенного выше пришли к следующим выводам:

1. Обобщенная оценка покрытия может быть определена только на основе установленных статистических частных функций накопления изучаемых видов повреждений с выделением характерных участков.
2. Размеры и координаты характерных участков, а также значения коэффициентов весомости изучаемых повреждений, установленные с учетом выполненных научных исследований [6], внедрены в усовершенствованный нормативный документ [7] для дальнейшего использования при проектировании.

ЛИТЕРАТУРА

1. СП 121.13330.2019. Аэродромы / Минстрой России. – М., 2019. – 99 с.
2. Федеральные авиационные правила. Требования, предъявляемые к аэродромам, предназначенным для взлёта, посадки, руления и стоянки гражданских воздушных судов (ФАП №262) / Минтранс России. – 2015.
3. Половко А.М. Основы теории надежности / А.М. Половко, С.В. Гуров. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
4. Андропов В.Д. Разработка стратегии поддержания эксплуатационно-технического состояния аэродромного покрытия: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.11 / Андропов Вадим Дмитриевич. – Москва, 2012. – 170 с.
5. Степушин А.С. Оценки эксплуатационно-технического состояния аэродромного покрытия / А.С. Степушин. – МАДИ, 2008. – 111 с.

6. Цопанов Э.С. Совершенствование технических решений при проектировании аэродромных покрытий: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.11 / Цопанов Эдуард Святославович; [Место защиты: ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»]. – Москва, 2021. – 173 с.
7. Изменение № 1 к СП 121.13330.2019 "СНиП 32-03-96 Аэродромы», М., 2022. – Электрон. данные. – URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/upload/iblock/c97/Izm1-k-SP-121.pdf> (дата обращения: 23.03.2023).

L I T E R A T U R A

1. SP 121.13330.2019. Aerodromy / Minstroy Rossii. – М., 2019. – 99 с.
2. Federal'nye aviacionnye pravila. Trebovaniya, pred'yavlyaemye k aerodromam, prednaznachennym dlya vzlyota, posadki, ruleniya i stoyanki grazhdanskikh vozдушnyh sudov (FAP №262) / Mintrans Rossii. – 2015.
3. Polovko A.M. Osnovy teorii nadezhnosti / A.M. Polovko, S.V. Gurov. – Spb.: BHV-Peterburg, 2006. – 704 с.
4. Andropov V.D. Razrabotka strategii podderzhaniya ekspluatacionno-tehnicheskogo sostoyaniya aerodromnogo pokrytiya: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.23.11 / Andropov Vadim Dmirievich. – Moskva, 2012. – 170 с.
5. Stepushin A.S. Ocenki ekspluatacionno-tehnicheskogo sostoyaniya aerodromnogo pokrytiya / A.S. Stepushin. – MADI, 2008. – 111 с.
6. Tsopanov E.S. Sovershenstvovanie tekhnicheskikh reshenij pri proektirovani aerodromnyh pokrytij: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.23.11 / Tsopanov Eduard Svyatoslavovich; [Mesto zashchity: FGBOU VO «Moskovskij avtomobil'nodorozhnyj gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet (MADI)»]. – Moskva, 2021. – 173 с.
7. Изменение № 1 к СП 121.13330.2019 «СНиП 32-03-96 Аэродромы», М., 2022. – Электрон. данные. – URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/upload/iblock/c97/Izm1-k-SP-121.pdf> (дата обращения: 23.03.2023).

.....
**SCIENTIFIC JUSTIFICATION OF THE NEW PRINCIPLE OF
DIVIDING AIRFIELD RUNWAY PAVEMENTS INTO
CHARACTERISTIC GROUPS OF SECTIONS**

Ph. D. (Tech.) E.S. Tsopanov
(FGUP GPI and NII GA «Aeroproject»),
Contact information: tsopanov@aeroproject.ru

The article deals with the analysis of the current situation in the operation of rigid airfield pavements at existing airports. The problem of uneven strength of cement concrete on the runway pavements in characteristic sections is described. On the basis of the analysis results the modernization of the normative base has been carried out. The recommendations for specialists in designing and operation of rigid airfield pavements are given.

Key words: *rigid airfield pavements, runway, cement concrete, strength, characteristic sections.*

Рецензент: канд. техн. наук В.А. Попов (ФГУП «АГА(А)»).

Статья поступила в редакцию: 28.03.2023 г.