

ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИК ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЕТОВ И НОРМИРОВАНИЯ НЕРОВНОСТЕЙ АЭРОДРОМНОГО ПОКРЫТИЯ

Рухлинский В.М.

*Межгосударственный авиационный комитет,
Россия, г. Москва, ул. Большая Ордынка, дом.13
icaomak@mak.ru,*

Большедворская Л.Г.

*Московский государственный технический университет гражданской авиации, Россия,
г. Москва, Кронштадтский бульвар, д.20
l.bolshedvorskaya@mstuca.aero,*

Хаустов А.А.

*АО «Авиакомпания «Россия»
Российская Федерация, г. Санкт – Петербург, ул. Пилотов, дом 18
a.khaustov@rossiya-airlines.com*

Аннотация: В статье представлены результаты анализа существующих математических моделей оценки изменения неровностей аэродромного покрытия. В качестве математической модели оценки и нормирования неровностей аэродромных покрытий аэродромов Крайнего Севера предложена нечеткая модель риска, позволяющая учитывать возможность наступления неблагоприятных событий для безопасности полетов.

Ключевые слова: математические модели, неровность аэродромного покрытия, нормирование аэродромного покрытия.

Введение

Неровность покрытия поверхности, совместно с несущей способностью и коэффициентом сцепления взлетно-посадочной полосы (ВПП) являются важными аспектами обеспечения БП. Аэродромные покрытия должны быть гладкими и свободными от любого рода неровностей, которые могут повлиять на безопасную эксплуатацию воздушных судов (ВС) [1]. Неровности поверхности аэродромного покрытия имеют критическое значение для обеспечения безопасной эксплуатации ВС при выполнении взлетов и посадок, увеличению тормозного пути на посадке и/или при прерванном взлете, привести к выкатыванию ВС за пределы ВПП, а также увеличивает риск разрыва пневматика.

В ранее проведенных исследованиях и полученных выводах попытки нормирования уровня неровности поверхностей аэродромных покрытий учитывали лишь усталостную повреждаемость отдельных зон конструкции транспортных самолетов. Методы оценки изменения неровностей искусственных покрытий аэродромов Крайнего Севера, позволяющие осуществлять степень их комплексного воздействия на ВС, эксплуатирующиеся в районах аэродромов с экстремальными климатическими условиями в настоящее время практически отсутствуют.

В связи с этим актуальной задачей является выбор и обоснование математических моделей (ММ) для проведения оценки влияния возникновения неровностей аэродромного покрытия на ресурсные характеристики ВС нового поколения посредством сбора данных о состоянии взлетно-посадочной полосы (ВПП) аэродромов, расположенных в различных климатических зонах. Именно этим обусловлена цель данного исследования и решаемых задач для ее достижения.

1 Формулировка цели

Существующие математические модели (ММ) оценки изменения неровностей аэродромного покрытия Крайнего Севера и схожих по климату регионов севера Европы и Северной Америки по функциональному назначению можно разделить на две группы:

- модели для оценки изолированных неровностей;
- модели для оценка усредненного уровня неровности.

На этом основании можно составить классификацию существующих ММ оценки изменения неровностей поверхности аэродромных покрытий, которая представлена на рисунке 1.



Рис. 1. Классификация ММ изменения неровностей аэродромного покрытия

В формате проводимого исследования заслуживает внимания метод оценки неровностей компании Боинг. Оригинальность метода оценки неровностей компании Боинг заключается в анализе соотношения высоты и длины профиля.

Физический смысл применения метода оценки неровности Боинга (Boeing Bumb method) заключается в построении виртуального отрезка между двумя точками на графике продольного профиля высоты ВПП и измерении расстояния от данной прямой до поверхности ВПП [2; 3].

В данном методе в качестве «высоты неровности» понимается максимальное по модулю расстояние от построенного отрезка до поверхности ВПП. Под «длиной неровности» понимается кратчайшее расстояние от ближайшего конца отрезка до точки отрезка, для которой измеряется неровность.

Исследования, проведенные Боинг за период с 1975 по 1994 годы, показали, что «длины неровностей», превышающих 120 метров, не оказывают существенного влияния на динамическую реакцию ВС [3]. Поэтому в методе оценки неровности Боинг рассматриваются отрезки длиной неровностей до 120 метров.

Минимальная длина отрезка напрямую зависит от интервала измерения данных о профиле поверхности покрытия ВПП. Стандарты ФАУ США для практического применения метода оценки неровности Боинг рекомендуют расстояние между точками выборки принимать равными 0.25 м [4]. Точность оценки неровностей аэродромного покрытия зависит от интервала измерения профиля поверхности ВПП и количества отрезков, которые могут быть определены из следующего соотношения:

$$N_s = \frac{l_{max}}{s} - 1 \quad (1)$$

где l_{max} – максимальная длина отрезка, s – интервал измерения.

Таким образом расчетное количество отрезков по стандартам ФАУ может составить

$$N_s = \frac{120}{0.25} - 1 = 479$$

Для любой заданной точки выборки метод оценки неровности Боинг позволяет задать отрезок такой, что начало и конец отрезков могут совпасть с заданной точкой выборки. Боинг разработал данные критерии, основываясь на опыте эксплуатации ВС для отдельных неровностей, характеризующих общее состояние поверхности ВПП. Для любого из возможных вариантов метод позволяет определить высоту и длину неровности согласно следующему алгоритму:

- высота неровности определяется величиной максимального вертикального расстояния от построенного отрезка до точки выборки вдоль профиля ВПП для всех возможных значений внутри данного отрезка;
- длина неровности определяется посредством оценки минимального расстояния от высоты неровности до начала отрезка или от конца отрезка до высоты неровности.

Недостатком данного метода является то, что рассчитанные критерии не отражают влияния неровностей на эксплуатационные характеристики ВС. Кроме этого, при реализации метода необходимо оценить каждую комбинацию высоты неровности и длины неровности, что является задачей сложной и весьма трудоемкой. Поскольку в настоящее время альтернативы для оценки изолированных неровностей поверхности аэродромного покрытия не существует, требуется проведение исследования с целью выбора и обоснования методик для проведения расчетов и нормирования неровностей аэродромного покрытия.

2 Теоретическое исследование

Существует несколько методов оценки изменения неровности поверхности аэродромных покрытий, одним из которых является модель обобщенной характеристики неровности R . Обобщенная характеристика ровности аэродромного покрытия (R) представляет собой число, выражающее воздействие неровностей аэродромного покрытия на конструкцию ВС при его движении по этому покрытию [5].

Теоретические основы применения индекса R изложены в работе [6], расчет которого выполняется на основе соотношения:

$$R = 6.28 - \frac{4.62 \cdot C}{0.21^{k-2}}, \quad (2)$$

где C и k – постоянные коэффициенты, характеризующие уровень и форму спектральной плотности неровностей.

Применимость данного метода обоснована в условиях, когда математическая обработка высотных отметок с определением функции спектральной плотности неровностей R приводит к осреднению совокупности неровностей (длин волн от 1 до 80 м) по всей длине ВПП. Недостатком метода является то, что по данному индексу невозможно получить конкретную информацию о допустимости уровня неровностей с конкретными длинами волн.

Учитывая противоречивость результатов, получаемых по формуле (2) вплоть до отрицательных значений, в последнее время для определения показателя R используют функций спектральной плотности неровностей, выражаемую зависимостью вида [7;8]:

$$S(F) = \frac{C}{F^k} \quad (3)$$

где C – коэффициент мощности спектра;

k – показатель степени;

F – пространственная частота длин волн неровностей (1/м).

Расчет значения индекса R можно выполнить по алгоритму, приведенному в [27].

К дополнительным недостаткам применения индекса R можно отнести то, что он позволяет получить интегральную оценку ровности и не позволяет выявить дефектные участки поверхности аэродромного покрытия.

Другим методом оценки индекса неровности является обобщением индекс ВВІ. Значение индекса ВВІ определяется согласно следующему алгоритму:

- для выбранной точки выборки из профиля определяются высота r_v и длина r_d неровностей для всех длин отрезков;
- для каждой длины отрезков l_i определяется уровень допустимости высоты неровности (верхний уровень «допустимого» диапазона) \tilde{r}_v для рассчитанной длины неровности r_d .

ФАУ разработало следующие ММ для нижних и верхних граничных значений для диапазонов допустимости.

Нижнее граничное значение (верхнее граничное значение «допустимого» диапазона):

$$H = 1.713187 + 0.800872 \cdot L - 0.031265 \cdot L^2 + 0.000549 \cdot L^3 \quad (\text{для } L < 20 \text{ м.}), \quad (4)$$

$$H = 6.4 + 0.16 \cdot L \quad (\text{для } 20 \text{ м.} < L < 60 \text{ м.}),$$

здесь H – высота неровности (см), L – длина неровности (м.).

Верхнее граничное значение:

$$\begin{aligned}
 H &= 2.747222 + 1.433399 \cdot L - 0.183730 \cdot L^2 + 0.013426 \cdot L^3 \text{ (для } L < 5 \text{ м.)}, \\
 H &= 2.7590 + 1.085822 \cdot L - 0.053024 \cdot L^2 + 0.001077 \cdot L^3 \text{ (для } 5 \text{ м.} < L < 20 \text{ м.)}, \\
 H &= 7.775 + 0.20375 \cdot L \text{ (для } 20 \text{ м.} < L < 60 \text{ м.)}.
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Для отрезков каждой длины определяется отношение граничного значения высоты неровности к рассчитанной высоте неровности:

$$\text{Ratio} = \frac{r_B}{\tilde{r}_B}
 \tag{6}$$

Значение индекса ВБИ определяется как наибольшее значение Ratio для выбранного набора точек. В том случае, если рассчитанное значение индекса менее 1.0, неровность относят к допустимому диапазону. В том случае, если рассчитанное значение индекса превышает значение 1.0, то неровность поверхности аэродромного покрытия относят к повышенному или недопустимому диапазонам. На рисунке 2 представлена зависимость ВБИ от длин неровностей.

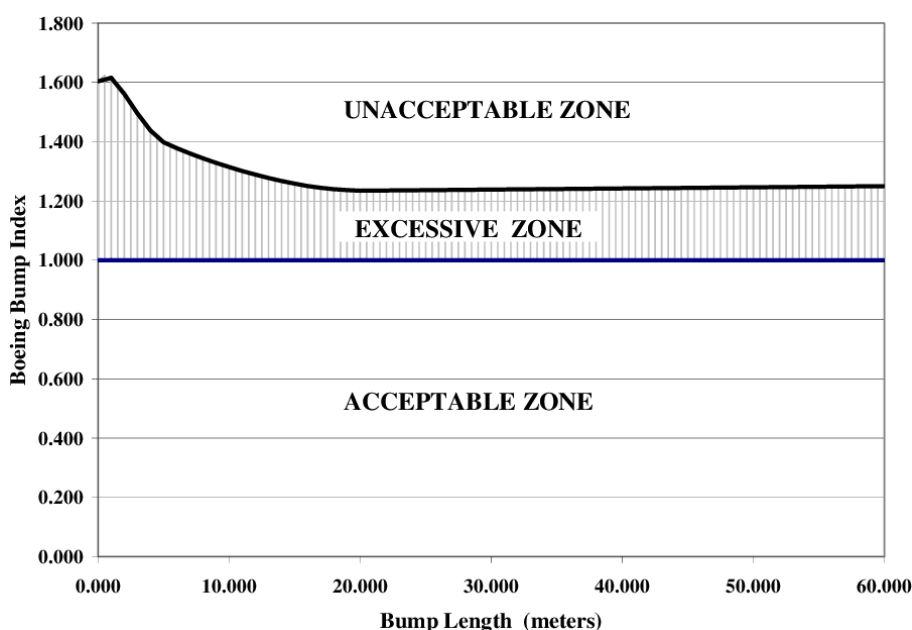


Рис. 2. Критерии допустимости неровности для индекса ВБИ

К достоинствам метода оценки индекса ВБИ относится его широкое применение благодаря тому, что ФАУ разработало и разместило в свободном доступе программное обеспечение ProFAA для расчета значения индекса ВБИ [8]. К недостаткам метода можно отнести то, что с помощью индекса ВБИ можно получить лишь усредненный уровень неровности покрытия.

Дополнительную характеристику профиля поверхности аэродромного покрытия можно получить, применив модель оценки среднеквадратичного отклонения вертикального ускорения RMSVA. Значение показателя RMSVA рассчитывается на основании следующего математического выражения [10]:

$$\text{RMSVA}_b = \sqrt{\frac{\sum_{i=k+1}^{i=n-k} VA_i^2}{n - 2 \cdot k}}
 \tag{7}$$

где вертикальное ускорение VA определяется соотношением:

$$VA_i = \frac{y_{i+k} + y_{i-k} + 2 \cdot y_i}{b^2}
 \tag{8}$$

RMSVA_b - среднеквадратичное отклонение вертикального ускорения (мм/м^2), рассчитываемое для базовой длины b ;

VA_i – вертикальное ускорение (мм/м^2) в i -й точке профиля;

n – количество точек (отметок) профиля;

i – индекс, обозначающий i -ю точку профиля, $i = \overline{1, n}$;

b – базовая длина (м.), используемая для расчета $RMSVA_b$ (в [18] в качестве предпочтительного значение предложено 1.5 м);

y_i – высота профиля (мм) в i -й точки профиля;

$k = \frac{b}{dx}$, где dx – расстояние между точками профиля (м.).

К достоинствам метода оценки RMSVA можно отнести простоту расчетов, которые необходимо выполнить для получения значения интересующей характеристики.

К недостаткам применения ММ можно отнести ее искусственность, а также отсутствие в работах, описывающих данную модель, обоснования возможности ее применения для оценки разрушительного воздействия неровностей аэродромного покрытия на ВС, движущихся по поверхности аэродромного покрытия при выполнении взлета или посадки на ВПП.

Частично эта проблема решается посредством применения модели оценки рисков выхода пилотажных параметров за эксплуатационные ограничения, разработанный в Военно-воздушной инженерной академии (ВВИА) им. проф. Н.Е. Жуковского в 70-х - 80-х годах и направленной на вычисление вероятностей отклонений параметров ВС. Данный подход лег в основу методики оценки рисков для безопасности полетов, обусловленных выходом за эксплуатационные ограничения пилотажных параметров в полете, применяемый многими авиакомпаниями Российской Федерации.

В рамках метода под оценкой риска понимается общий процесс, охватывающий идентификацию риска, анализ риска и сравнительную оценку риска выхода за эксплуатационные ограничения пилотажных параметров в полете или при наземной эксплуатации. Под количественной оценкой понимается процесс расчета значений вероятности события, связанного с выходом за ограничения, представленные в руководстве по летной эксплуатации.

Оценка рисков выхода пилотажных параметров за эксплуатационные ограничения при наземных режимах эксплуатации по параметрам вертикальной перегрузки как один из критериев пригодности покрытия ВПП предложен в работах авторов ГосНИИ ГА [11,12], согласно которого значения анализируемого параметра пилотирования располагаются в убывающем порядке, образуя вариационный ряд:

$$x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_j \leq \dots \leq x_n, j = \overline{1, n}. \quad (9)$$

Каждому значению $x_j \in X, j = \overline{1, n}$ соответствует эмпирическая функция распределения $P_j^*(x_j)$:

$$P_j^*(x_j) = \frac{j}{n+1}. \quad (10)$$

Эта оценка относится к классической функции распределения: $F(x_j) = P_j = e^{-e^{-y}}$, т.е. вероятности того, что случайная величина x_j примет значение, не превышающее $x_{i \text{ орг}}$, следовательно:

$$y_j = -\ln(-\ln(P_j^*(x_j))). \quad (11)$$

Для множества пар (x_j, y_j) получаем линейную регрессионную модель вида:

$$y_j = b_0 \cdot x_j + b_1, \quad (12)$$

где b_0 – выравнивающая постоянная, соответствующая точке пересечения кривой регрессии с осью абсцисс, b_1 – параметр регрессии.

Значения параметров b_0 и b_1 вычисляются методом наименьших квадратов из решения следующей системы нормальных линейных уравнений:

$$\sum_{j=1}^n y_j = b_0 \sum_{j=1}^n x_j + b_1 n \quad (13)$$

$$\sum_{j=1}^n x_j y_j = b_0 \sum_{j=1}^n x_j^2 + b_1 \sum_{j=1}^n x_j, \quad (14)$$

Используя вычисленные значения коэффициентов b_0 и b_1 , вычисляется значение $x_{\text{орг}}$:

$$x_{\text{орг}} = f(y_{\text{орг}}) = \frac{y_{\text{орг}} - b_1}{b_0} \quad (15)$$

Используя значение $x_{огр}$, вычисляется оценка вероятности допустимых эксплуатационных ограничений параметра пилотирования x_t с учетом n полетов:

$$P_{i\text{огр}} = e^{-e^{-x_{огр}}} \quad (16)$$

Вычисляется вероятность превышения эксплуатационных ограничений пилотажных параметров при наземных режимах эксплуатации:

$$P_{пр\text{огр}} = 1 - e^{-e^{-x_{огр}}}. \quad (17)$$

Описанный подход может быть применим в рамках Системы управления безопасностью полетов эксплуатанта ВС, располагающего необходимыми исходными данными, соответствующие параметрам пилотирования. Для решения задачи расчетов и нормирования неровностей аэродромного покрытия со стороны оператора аэродрома, применение данного подхода может быть затруднительно ввиду отсутствия исходных данных, необходимых для проведения расчетов.

В рамках проводимого исследования представляет интерес модель оценки риска в зависимости от состояния покрытия ВПП, направленная на оценку величины риска повреждения покрытия и возникновения авиационного инцидента в зависимости от состояния ВПП.

В данной модели в качестве неблагоприятного последствия рассматривается авиационный инцидент, заключающийся в выполнении полетов на ВПП, которая не отвечает установленным требованиям, и предлагается причинно-следственная схема возникновения авиационного происшествия (АП).

Согласно предложенного подхода, риск возникновения авиационного инцидента (происшествия) численно равен вероятности события, заключающегося в том, что полеты ВС будут совершаться с ВПП, покрытие которой не соответствует требованиям. В части, касающейся неровности поверхности покрытия ВПП авторами сформировано требование R более 2.0.

Кроме этого, авторы подчеркивают, что износ может быть описан функцией распределения вероятности рискового события $\varphi(t)$, нормальное распределение которого зависит от срока эксплуатации покрытия, а экспоненциальные – не зависят и могут применяться для описания случайных отказов.

Для анализа изменения показателя ровности R во времени авторы переходят от индекса RCI к показателю ровности R (рис. 3).

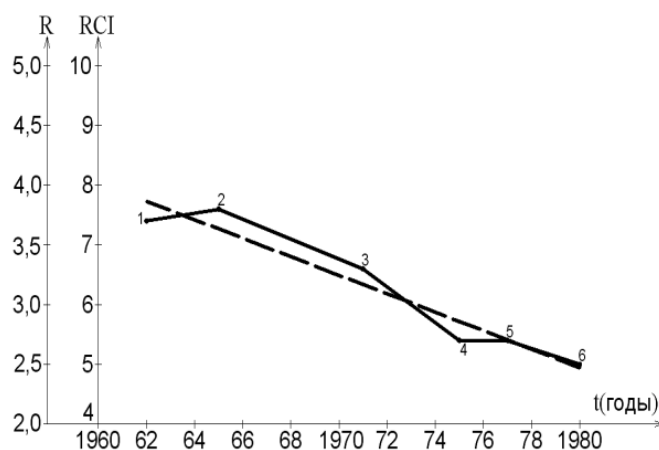


Рис. 3. График ровности поверхности ВПП аэропорта

По точкам, приведенным на графике, определяется уравнение регрессии:

$$R = 3.9 - 0.07 \cdot t.$$

Используя уравнение регрессии, исходя из предположения о модели износа, строится график изменения $P_{а.и.}(t)$ во времени для показателя ровности покрытия R (рис.4).

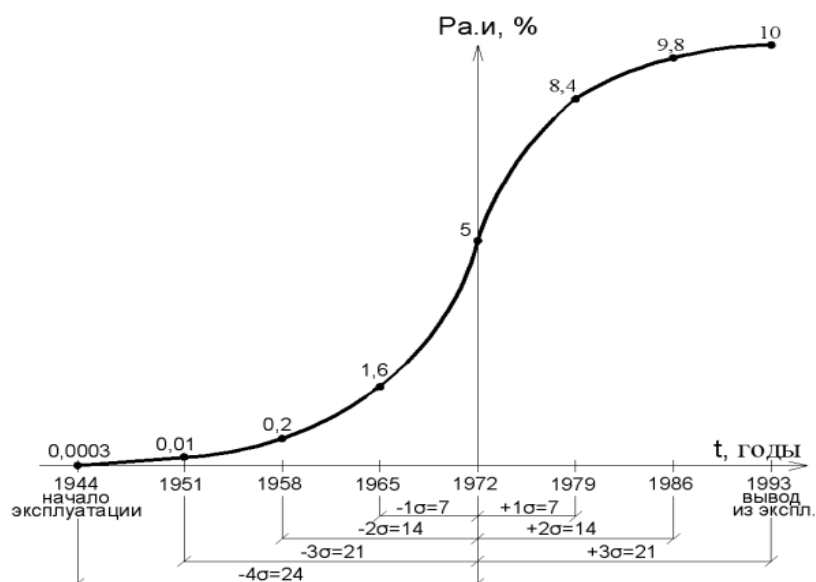


Рис. 4. График $P_{a.и.}(t)$ по фактору R для ВПП аэропорта

По мнению авторов, на основании построенного графика можно прогнозировать срок службы покрытия и определять риск возникновения авиационного инцидента по фактору ровности покрытия в любой год эксплуатации.

К недостаткам данной модели можно отнести некорректное толкование положений ПРАПИ-98 в части, касающейся отнесения выполнения полетов на ВПП, которая не отвечает установленным требованиям к авиационным инцидентам. Авторами модели не корректно используется модель износа, так как речь идет об износном отказе, а не об износе дорожных или аэродромных покрытий. Данные недостатки делают обсуждаемую модель бесполезной для эксплуатанта аэродромов и ВС.

Чтобы избежать выявленных недостатков при разработке математических моделей, выбираемая методика проведения расчетов и нормирования неровностей аэродромного покрытия должна объединить:

- модель оценки изолированных неровностей;
- модель оценки усредненного уровня неровности профиля.

В качестве метода оценки изолированных неровностей необходимо использовать индекс ВВИ и обобщающий метод оценки единичной неровности Боинг. Для этого в качестве характеристики усредненного уровня неровности покрытия рассматриваемой аэродромной поверхности необходимо учитывать не среднее значение частных значений индекса ВВИ для различных участков, а совокупный получаемый набор значений.

Индексы IRI, RMSVA не могут быть применимы для проведения расчетов и нормирования неровностей аэродромного покрытия.

В связи с этим, в качестве ММ для оценки усредненного уровня неровности профиля предлагается использовать адаптированную риск-ориентированную модель расчета значения индекса R , посредством совместного использования индекса R и вектора частных значений индекса ВВИ с использованием риск-ориентированного подхода, на основании которого вводятся следующие категории:

- R – рисковое событие одиночное или цепочка событий ($L_R \sim R$);
- Σ_0 – условие реализации;
- μ_1 – мера риска первого рода (неопределенность появления негативного результата) в виде показателя случайности или неопределенности возникновения рискового события;
- μ_2 – мера риска второго рода за счет системных ошибок;
- \tilde{H}_R – мера последствий или ущерба.

Величина риска \tilde{R} как физической категории или его оценка может определяться следующим образом [13]:

$$\tilde{R} = \langle \mu_1, \mu_2, \tilde{H}_R | \Sigma_0 \rangle \quad (18)$$

Для решения поставленной задачи в дополнение к результатам оценки неровностей можно добавить оценку наступления неблагоприятных для БП событий вследствие эксплуатации рассматриваемой аэродромной поверхности ВС. В связи с этим зададим терм-множество лингвистической переменной x_{ac} :

$$T_{ac} = \{ \text{"Часто"}, \text{"Иногда"}, \text{"Весьма редко"}, \\ \text{"Маловероятно"}, \text{"Крайне маловероятно"} \}$$

Тогда уравнение (18) можно переписать в виде:

$$\tilde{R} = F_{\text{Мамдани}}(\mu_r, \mu_{r_{av}}, \mu_{ac} | \Sigma_{0_i}) \quad (19)$$

где $\mu_r, \mu_{r_{av}}, \mu_{ac}$ – нечеткие меры соответствующих лингвистических переменных;

Σ_{0_i} – условия эксплуатации аэродрома (класс, количество операций взлет/посадки, типа ВС, климатические особенности и пр.);

$F_{\text{Мамдани}}$ – модель нечеткого вывода Мамдани [14].

Заключение

Полученные результаты проведенного исследования применимости существующих ММ оценки неровностей аэродромного покрытия с учетом их комплексного воздействия на самолеты, эксплуатирующиеся в условиях Крайнего Севера, позволили убедиться в актуальности решения задачи разработки рекомендаций учета воздействия неблагоприятных климатических факторов на состояние неровностей аэродромного покрытия. В результате исследования установлено:

1. В настоящее время практически отсутствуют адаптированные модели для проведения оценки изменения неровностей искусственных покрытий аэродромов Крайнего Севера, позволяющие осуществлять степень их комплексного воздействия на самолеты (ВС), эксплуатирующиеся в районах аэродромов с экстремальными климатическими условиями.

2. Выявлены недостатки в ранее проводимых исследованиях, ограничивающиеся попытками нормирования уровня неровности поверхностей аэродромных покрытий путем определения усталостной повреждаемости отдельных зон конструкции транспортных самолетов нового поколения.

3. Исследование применимости модели оценки неровности Боинга, физический смысл которой заключается в построении виртуального отрезка между точками на графике продольного профиля высоты ВПП и измерении расстояния от данной прямой до поверхности ВПП, позволило установить зависимость минимальной длины отрезка от шага интервала измерения и установить минимальное количество точек для измерения профиля поверхности ВПП.

4. В качестве ММ оценки и нормирования неровностей аэродромных покрытий аэродромов Крайнего Севера предложена нечеткая модель риска, позволяющая учитывать: результаты оценки максимальной изолированной неровности; результаты оценки усредненного уровня неровности профиля поверхности аэродромных покрытий; возможность наступления неблагоприятных событий для БП вследствие эксплуатации рассматриваемой аэродромной поверхности ВС.

5. Целесообразность проведения дальнейшего исследования обусловлена необходимостью апробации ММ и проведение расчетов для оценки неровности поверхности аэродромных покрытий с учетом:

- научной обоснованности применения метода;
- практического опыта реального применения метода для оценки неровностей поверхности аэродромных покрытий в условиях Крайнего Севера или схожих по климату регионов севера Европы и Северной Америки (США и Канада);
- применения метода при эксплуатации аэродромов, расположенных в районах Крайнего Севера;
- возможностью применения метода в качестве показателя эффективности обеспечения БП в рамках СУБП эксплуатанта аэродрома.

Литература

1. NLR-TP-2009-190 Evaluation Methods for longitudinal evenness of runway pavements. NLR, June 2009. – 23 pp.
2. FAA AC 50/5380-9 Guidelines and Procedures for Measuring Airfield Pavement Roughness. 9. – 22 pp.
3. Roughness Measurement, Quantification, and Application - Boeing Method,” Document No. D6-81746, Boeing, November 1995. – 44 pp.
4. FAA AC 50/5380-9 Guidelines and Procedures for Measuring Airfield Pavement Roughness. 9. – 22 pp.
4. Нормы годности к эксплуатации гражданских аэродромов. Новосибирск, 2002. – 138 с.
5. Филиппов В.П. Методы обеспечения безопасной эксплуатации самолетов гражданской авиации по условиям прочности на наземных этапах полета : диссертация ... доктора технических наук. М.: МГТУ ГА, 2015 - 268 с.
6. Андронов В.Д. Разработка стратегии поддержания эксплуатационно-технического состояния аэродромных покрытий: диссертация ... кандидата технических наук. М.: 2012. - 170 с.
7. The Federal Aviation Administration’s Computer Program for Roughness Index Analysis User’s Manual” (Draft). 9. – 13 pp.
8. Sayers, M.W. On the Calculation of IRI from Longitudinal Profile. Transportation Research Record 1501, Transportation Research Board, 1995, pp. 1–12.
9. Advisory Circular (AC) No. 302-023 Measurement and Evaluation of Runway Roughness. Transport Canada, 2016. - 14 p.
10. Филиппов В.П., Орлов Е.Ф., Караев К.З., Якобсон И.В. Оценка вероятности превышения параметрами нагруженности конструкции самолета предельно допустимых для наземных режимов эксплуатации уровней как один из критериев пригодности покрытия ВПП // Надежность, прочность и безопасность эксплуатации воздушных судов. Сборник научных трудов. Выпуск 297. М.: ГосНИИГА, 1991.–стр 41-45.
11. Караев К.З., Филиппов В.П. Статистические методы анализа нагруженности самолётных конструкций для оценки воздействия неровностей аэродромных покрытий // Надежность, прочность, диагностика и безопасность эксплуатации воздушных судов. Сборник научных трудов. Выпуск 302. М.: ГосНИИГА, 1991. – стр. 23 – 31.
12. Куклев Е.А., Смуров М. Ю., Байрамов А. Б. Моделирование систем и процессов. Математические и комбинированные модели технико-экономических комплексов в гражданской авиации. СПб.: СПб ГУГА, 2015 - 166 с.
13. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами Matlab. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.