

УДК 625.717

DOI 10.51955/23121327_2022_1_6

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ НЕРОВНОСТЕЙ АЭРОДРОМНОГО ПОКРЫТИЯ АЭРОДРОМОВ КРАЙНЕГО СЕВЕРА И АРКТИКИ

*Виктор Михайлович Рухлинский,
orcid.org/0000-0002-7007-6612,*

*доктор технических наук, первый заместитель председателя комитета –
председатель Комиссии Межгосударственного авиационного комитета,
Межгосударственный авиационный комитет,
ул. Большая Ордынка, 13
Москва, 115035, Россия
icaomak@mak.ru*

*Людмила Геннадьевна Большедворская,
orcid.org/0000-0002-1425-7398,*

*доктор технических наук, профессор кафедры БПиЖД
Московский государственный технический университет гражданской авиации,
Кронштадтский бульвар, 20
Москва, 125993, Россия
l.bolshedvorskaya@mstuca.aero*

*Шамиль Фангалиевич Ганиев,
orcid.org/0000-0001-8488-2239,*

*кандидат технических наук, доцент кафедры БПиЖД
Московский государственный технический университет гражданской авиации,
Кронштадтский бульвар, д. 20
Москва, 125993, Россия
shamgan@mstuca.aero*

Аннотация. В представленной статье подчеркивается, что при управлении рисками для обеспечения безопасности полетов эксплуатанта большое значение приобретают факторы опасности, обусловленные возникновением неровностей взлетно-посадочной полосы аэродромов, расположенных в условиях с экстремальными климатическими условиями. В связи с этим, актуальность темы исследования обусловлена недостаточностью исследования существующих методик и алгоритмов оценки неровностей аэродромных покрытий с целью снижения их негативного воздействия на самолеты, эксплуатирующиеся в условиях Крайнего Севера и Арктики.

Ключевые слова: управление рисками, взлетно-посадочная полоса, неровность аэродромного покрытия.

ANALYSIS OF METHODS FOR EVALUATION OF THE IRREGULARITIES CHANGING OF THE AERODROME PAVEMENT IN THE FAR NORTH AND THE ARCTIC

*Viktor M. Rukhlinsky,
orcid.org/0000-0002-7007-6612,
Interstate Aviation Committee,
13, Bolshaya Ordynka
Moscow, 115135, Russia
icaomak@mak.ru*

*Lyudmila G. Bolshedvorskaya,
orcid.org/0000-0002-1425-7398,
Moscow State Technical University of Civil Aviation,
20, Kronstadt Boulevard
Moscow, 125993, Russia
l.bolshedvorskaya@mstuca.aero*

*Shamil F. Ganiev,
orcid.org/0000-0001-8488-2239,
Moscow State Technical University of Civil Aviation,
20, Kronstadt Boulevard
Moscow, 125993, Russia
shamgan@mstuca.aero*

Abstract. The present article emphasizes that when managing risks to ensure the safety of the operator's flights, hazard factors due to the occurrence of uneven runways of aerodromes located in conditions with extreme climatic conditions are of great importance. In this regard, the relevance of the research topic is due to the lack of research on existing methods and algorithms for assessing the roughness of airfield pavements in order to reduce their negative impact on aircraft operating in the Far North and the Arctic.

Key words: risk management, runway, airfield roughness.

Введение

Результаты ранее проведенных исследований показали, что изменение уровня неровностей аэродромного покрытия при эксплуатации воздушных судов (ВС) с аэродромов, находящихся в условиях Крайнего Севера и Арктики, свидетельствуют о необходимости проведения анализа изменений ресурсных характеристик и изменений ограничений летной годности ВС [Evaluation..., 2009; Андронов, 2012]. Возникающие неровности поверхности аэродромного покрытия под влиянием разрушающего воздействия климатических условий могут достигать крайне критического значения для небезопасной эксплуатации ВС [Филиппов и др., 1991; Караев и др., 1991]. Особую опасность и психологическую напряженность для экипажей приобретают режимы выполнения взлетов и посадок, поскольку увеличивается риск повреждения пневматика и, как следствие, возможность возникновения выкатывания ВС за пределы взлетно-посадочной полосы (ВПП). Этим обусловлены многочисленные неблагоприятные события последних лет (рис. 1, рис. 2).



Рисунок 1 – Структура событий по этапам полета



Рисунок 2 – Последствия разрушения пневматика [rikabu.ru]

Более 50% случаев разрушения пневматика возникает при посадке самолета и около 90% случаев связаны с процессом взлета (рис. 3).

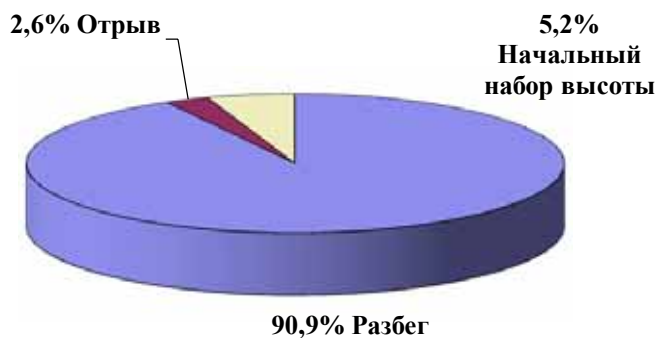


Рисунок 3 – Структура причин повреждения пневматика

В формате проводимого исследования особое внимание следует обратить на последствия, возникающие в результате разрушения пневматика (рис. 4).



Рисунок 4 – Структура повреждений ВС вследствие ударов обломков шин

Статистические данные свидетельствуют о неизменяющейся тенденции повреждаемости пневматика ВС, численность которых остается в среднем на уровне 7-10 случаев в год.

Тем не менее, проблема остается недостаточно изученной и требующей дополнительного исследования в области оценки повреждаемости элементов конструкции самолетов под влиянием возникновения неровности поверхностей аэродромных покрытий.

Методы оценки возникновения неровностей на ВПП аэродромов Крайнего Севера и Арктики, позволяющие осуществлять степень их комплексного воздействия на ВС, эксплуатирующиеся в районах аэродромов с экстремальными климатическими условиями, в настоящее время практически отсутствуют [Рухлинский и др, 2021].

Этим обусловлены актуальность, цель исследования и решение задач для ее достижения, одной из которых является задача обоснования методов оценки негативного влияния на ресурсные характеристики ВС изменения неровностей аэродромного покрытия аэродромов Крайнего Севера и Арктики.

Материалы и методы

Согласно Нормам летной годности, вероятность повреждения конструкции ВС обозначена двумя группами событий (табл. 1).

Следует подчеркнуть, что требования поддержания летной годности в равной степени относятся как к металлическим, так и к неметаллическим (композитным) конструкциям ВС. На этом основании возрастает вероятность повреждения конструкции воздушных судов камнями и обломками на взлетно-посадочной полосе.

Таблица 1 – Вероятности негативного воздействия на конструкцию ВС из-за неровностей аэродромного покрытия согласно Нормам летной годности

Событие	Вероятность	Классификация
Разрушение пневматика	$1,4 \cdot 10^{-5}$	Умеренно вероятное (близко к маловероятным)
Разлет нелокализованных обломков двигателя	$1,5 \cdot 10^{-6}$	Маловероятное

Это может произойти после наезда на камни или посторонние предметы колес основных и передних стоек шасси самолета. Удар, как правило, приходится на нижнюю поверхность обшивки фюзеляжа за стойкой, нижнюю поверхность и носок крыла, а также двигатель самолета.

Сам факт наличия камней на ВПП (исключение составляют грунтовые ВПП) является достаточно маловероятным. Однако, зона возможного попадания их в конструкцию должна быть определена, последствия такого попадания оценены, а сама зона должна быть включена в обязательные регулярные осмотры.

Как показывает опыт эксплуатации, для металлического крыла удары мелких камней из-под колес не являются критическими. Данные повреждения планера, как правило, очевидны и без труда выявляются техническими специалистами при проведении смотровых работ.

При посадке воздушного судна в случае не выпуска стоек шасси может произойти повреждение нижней части фюзеляжа самолета, а также крыла и двигателей при соответствующей компоновке. К тому же, при взлете и посадке воздушного судна были зафиксированы случаи ударов нижней хвостовой части фюзеляжа и касания земли крылом [Kuznetsov, 2015; Pohl et al., 2022].

Поэтому на следующем этапе исследования в работе проведен анализ достижений в области научных разработок и рекомендаций по оценке влияния неровностей состояния аэродромного покрытия на безопасность полетов воздушных судов.

Анализ и результаты

На основании основных положений Руководства по эксплуатации гражданских аэродромов практикуется технология поддержания состояния инфраструктуры, основным элементом которого является ВПП. Суть технологии заключается в том, что посредством систематического инспектирования и проведения детального осмотра аэродромного покрытия выявляются возникающие недостатки и организуется выполнение ремонтных или восстановительных работ. Этим достигается необходимый уровень качества летного поля, отвечающего требованиям безопасной эксплуатации воздушных судов в соответствии с несущей способностью, ровностью, прочностью, влагостойкостью и морозостойкостью аэродромного покрытия. Поскольку в процессе эксплуатации на аэродромное покрытие могут негативно воздействовать физические температурные и химические факторы, приводящие

в движение плиты, одной из актуальных задач является задача оценки прочности аэродромных покрытий.

На основании действующих Рекомендаций по проектированию и эксплуатации аэродромов оценка прочности искусственных покрытий должна осуществляться посредством сопоставления параметров, характеризующих фактическую прочность конструкции покрытия в зависимости от сезонности и реального силового воздействия нагрузки взлетно-посадочных устройств на эту конструкцию [Advisory Circular, 2016; Korpak et al., 2021].

Таким образом, оценка прочности и возникновение неровностей аэродромных покрытий требует получения статистических данных рассматриваемого аэродрома, включая характеристику параметров стыковочных соединений и материалов, используемых для проектирования и строительства ВПП.

Алгоритм эксплуатационной оценки прочности искусственных покрытий включает следующие этапы:

- выявление и оценка уровня неровностей, возникающих в покрытии в зависимости от эксплуатационных условий;
- расчет показателей, характеризующих запас прочности аэродромного покрытия;
- выявление опасных разрушений во взлетно-посадочной полосе;
- принятие решения об эксплуатации взлетно-посадочной полосы в зависимости от воздействия климатических условий Крайнего Севера и Арктики на запас прочности аэродромного покрытия.

Достоверность несущей способности аэродромного покрытия зависит от выбора и обоснования моделей, способных:

- проводить оценку технического состояния покрытий с учетом условий их эксплуатации;
- оценивать степень динамичности приложенных нагрузок на аэродромное покрытие;
- проводить оценку влияния температурного режима на несущую способность аэродромного покрытия;
- оценивать негативное воздействие работы реактивных двигателей на состояние бетонного покрытия.

Таким образом, математические модели и их применимость для оценки состояния аэродромного покрытия в зависимости от эксплуатационных условий, могут быть представлены в виде моделей, позволяющих получить оценки состояния изолированных неровностей и моделей оценки усредненного уровня неровности поверхности.

Весьма распространенным и практически применимым методом является оценка изолированных неровностей посредством анализа соотношения их высоты и длины посредством применения высокоточных нивелиров и специальных линеек с миллиметровой шкалой. Такой метод применяется при проектировании и строительстве аэродромов гражданской авиации

посредством установления и оценки показателей, отражающих допустимые значения максимального уклона участков искусственного покрытия взлетно-посадочной полосы.

Совокупность моделей оценки усредненного уровня неровностей поверхности направлена на анализ соотношения высоты и длины изменения профиля ВПП под воздействием эксплуатационных и климатических условий. Поэтому данная группа моделей представляет наибольший интерес в формате проводимого исследования.

В настоящее время компания Boeing использует на практике показатель (R) , который представляет собой количественное значение силы неблагоприятного воздействия неровностей ВПП на конструкцию ВС. Суть метода заключается в построении отрезка между двумя точками продольного профиля высоты и длины неровности на ВПП [Guidelines ..., s.a.; Roughness ..., 1995]. Многолетние исследования эксплуатации самолетов нового поколения позволили сделать вывод об отсутствии существенного влияния на их ресурсные характеристики длины неровностей, превышающих 120 метров [Sayers, 1995, p. 1-12]. Поэтому в методе оценки неровности Boeing рассматриваются отрезки длиной неровностей только менее 120 метров. Достоверность оценки негативного воздействия неровностей на эксплуатацию самолетов в условиях Крайнего Севера и Арктики будет зависеть от расстояния между точками выборки, которое согласно стандарту и рекомендациям FAU США не должно превышать 0,25 м.

Достоинством данного метода является возможность определения высоты и длины неровности при разных климатических условиях посредством получения совокупности измерительных точек выборки вдоль всего профиля ВПП, позволяющих получить оценку минимального расстояния от высоты неровности до начала отрезка или от конца отрезка до высоты неровности [Рухлинский и др., 2021].

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 [Рухлинский и др., 2021].

Учитывая противоречивость результатов, получаемых по формуле (2) вплоть до отрицательных значений, в последнее время для определения показателя R используют функцию спектральной плотности неровностей, выражаемую зависимостью вида [Рухлинский и др., 2021].

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 [Рухлинский, 2021], тем самым создавая отсутствие практической возможности получить количественные значения уровня разрушающего воздействия неровностей ВПП на ресурсные характеристики ВС. В связи с этим в работе проведено

исследование практической применимости существующих методов и моделей с целью выбора и обоснования методик для проведения расчетов и нормирования неровностей аэродромного покрытия [Рухлинский и др., 2021].

Одним из них является метод оценки индекса неровности BVI, разработчиком которого является также компания Boeing. Данный метод похож на обобщенную характеристику оценки ровности аэродромного покрытия (R), теоретические основы которого изложены в работе [Филиппов, 2015]. Отличительной особенностью расчета индекса BVI является возможность получения критических значений неровностей с целью оценки их влияния на ресурсные характеристики ВС [Нормы ..., 2002].

Допустимое значение индекса колеблется в пределах единицы: менее 1.0, неровность относят к допустимому диапазону, более 1.0 – неровность поверхности аэродромного покрытия относится к повышенному или недопустимому значению.

Для оценки индекса BVI в свободном доступе существует программное обеспечение ProFAA. Однако, с помощью индекса BVI можно получить лишь усредненный уровень неровности покрытия [Рухлинский и др., 2021; Штовба, 2007].

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 [Рухлинский и др., 2021].

Отличительной особенностью метода оценки RMSVA является простота расчетов для получения количественного значения интересующей характеристики. Но отсутствие методических рекомендаций для оценки разрушительного воздействия неровностей аэродромного покрытия на ВС, движущихся по поверхности аэродромного покрытия при выполнении взлета или посадки на ВПП, придает ей весьма ограниченный общетеоретический характер. Попытки придать данной модели практическое применение посредством оценки рисков выхода пилотажных параметров за эксплуатационные ограничения ВС были предприняты в Военно-воздушной инженерной академии (ВВИА) им. проф. Н.Е. Жуковского в 70-х – 80-х годах, что позволило получить методику оценки рисков для безопасности полетов, обусловленных выходом за эксплуатационные ограничения пилотажных параметров в полете [Рухлинский и др., 2021; Куклев, 2015]. Основная направленность методики ориентирована на идентификацию риска, анализ риска и сравнительную оценку риска выхода ВС за эксплуатационные ограничения пилотажных параметров в полете или при наземной эксплуатации [Рухлинский и др., 2021].

Количественная оценка выстроена на основе расчета и сопоставления значений вероятности возникновения событий, обусловленных выходом за эксплуатационные ограничения с требованиями руководства по летной эксплуатации. Логическим продолжением данного подхода явились результаты исследования по оценке рисков выхода пилотажных параметров за

эксплуатационные ограничения при эксплуатации покрытия ВПП. Предложенный подход весьма зарекомендовал себя в рамках разработки и реализации Системы управления безопасностью полетов эксплуатанта ВС. Однако, отсутствие достаточного количества исходных данных для расчетов и нормирования неровностей аэродромного покрытия для операторов аэродрома может служить существенным препятствием в практической применимости данного подхода.

Альтернативным методом, представляющим собой характеристику неровностей, является индекс неровностей дорожных поверхностей IRI. Значение индекса IRI может рассчитываться как для 100-метровых участков ВПП для идентификации участков, имеющих повышенный уровень неровности, так и для всей длины ВПП.

К достоинствам метода оценки индекса IRI можно отнести его широкое применение для целей оценки ровности дорожных поверхностей автомагистралей. К очевидным недостаткам можно отнести то, что базовое предположение использования и применение набора критериев применимо для автомобилей с четырьмя колесами, что не может быть применимо для ВС различных типов, имеющих различные конструкции шасси.

Еще одним методом, представляющим интерес в рамках проводимого исследования, является метод оценки индекса плавности движения RCI.

Значение индекса RCI рассчитывается в зависимости от значений индексов IRI и RMSVA, формируя значения характеристики усредненного уровня неровности профиля для 100-метровых участков ВПП, имеющих повышенный уровень неровности, но практически с теми же недостатками практической применимости в решении поставленной задачи.

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 [Рухлинский и др., 2021].

В данной модели в качестве неблагоприятного последствие рассматривается авиационный инцидент, заключающийся в выполнении передвижения ВС на ВПП, которая не отвечает установленным требованиям. Согласно предложенному подходу, риск возникновения авиационного 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 [Рухлинский и др., 2021].

К недостаткам данного подхода можно отнести некорректное толкование положений ПРАПИ-98 в части, касающейся классификации полетов, выполняемых в районе аэродрома, которая не отвечает установленным требованиям к авиационным инцидентам. Данные недостатки делают рассматриваемый подход весьма бесполезным для эксплуатанта аэродромов и ВС [Рухлинский и др., 2021].

Чтобы избежать выявленных недостатков при разработке математических моделей, необходимо использовать интегральную оценку посредством

применения модели оценки изолированных неровностей и модели оценки усредненного уровня неровности профиля [Рухлинский и др., 2021].

Заключение

Полученные результаты проведенного исследования применимости существующих математических моделей оценки неровностей аэродромного покрытия с учетом их комплексного воздействия на самолеты, эксплуатирующиеся в условиях Крайнего Севера и Арктики, позволили убедиться в актуальности решения задачи разработки рекомендаций учета воздействия неблагоприятных климатических факторов на состояние неровностей аэродромного покрытия [Рухлинский и др., 2021]. Это обусловлено отсутствием адаптированных моделей для оценки негативного воздействия неровностей аэродромных покрытий, расположенных в районах Крайнего Севера и Арктики на ресурсные характеристики самолетов нового поколения.

При всем многообразии моделей для практического применения измерения ровности поверхности аэродромных покрытий рекомендуется использовать модель оценки, предложенной компанией Boeing, которая позволяет получить наиболее точные значения состояния продольного профиля высоты ВПП.

Библиографический список

- Андронов, В. Д.* Разработка стратегии поддержания эксплуатационно-технического состояния аэродромных покрытий: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.11 / В.Д. Андронов. Москва, 2012. 170 с.
- Караев, К. З.* Статистические методы анализа нагруженности самолётных конструкций для оценки воздействия неровностей аэродромных покрытий / К. З. Караев, В. П. Филиппов // Надежность, прочность, диагностика и безопасность эксплуатации воздушных судов: сборник научных трудов. Выпуск 302. М.: ГосНИИГА, 1991. С. 23-31.
- Куклев, Е. А.* Моделирование систем и процессов. Математические и комбинированные модели технико-экономических комплексов в гражданской авиации. / Е. А. Куклев, М. Ю. Смуров, А. Б. Байрамов. СПб.: СПб ГУГА, 2015. 166 с.
- Нормы годности к эксплуатации гражданских аэродромов. Новосибирск, 2002. 138 с.
- Рухлинский, В.М.* Выбор и обоснование методик для проведения нормирования неровностей аэродромного покрытия / В. М. Рухлинский, Л. Г. Большедворская, А. А. Хаустов (Материалы четырнадцатой международной конференции Управление развитием крупномасштабных систем в новых условиях MLSD'2021) // [Электронный ресурс DOI 10.25728/8177.2021.51.20.001]. 2021. Режим доступа: <https://mlsd2021.ipu.ru/proceedings/24-29.pdf> (Дата обращения 02.02.2022).
- Филиппов, В. П.* Оценка вероятности превышения параметрами нагруженности конструкции самолета предельно допустимых для наземных режимов эксплуатации уровней как один из критериев пригодности покрытия ВПП / В. П. Филиппов, Е. Ф. Орлов, К. З. Караев [и др.] // Надежность, прочность и безопасность эксплуатации воздушных судов. Сборник научных трудов. Выпуск 297. М.: ГосНИИГА, 1991. С. 41-45.
- Филиппов, В. П.* Методы обеспечения безопасной эксплуатации самолетов гражданской авиации по условиям прочности на наземных этапах полета: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.14 / В. П. Филиппов. Москва. 2015. 268 с.

Штовба, С.Д. Проектирование нечетких систем средствами Matlab. М.: Горячая линия – Телеком, 2007. 288 с.

Advisory Circular (AC) Measurement and Evaluation of Runway Roughness. Transport Canada, 2016. No. 302-023. 14 p.

Evaluation Methods for longitudinal evenness of runway pavements. NLR-TP-2009-190 June 2009. 23 pp.

Guidelines and Procedures for Measuring Airfield Pavement Roughness. FAA AC 50/5380-9. 9. 22 pp.

Korpak, J. Erosion irregularities resulting from series of grade control structures: The Mszanka River, Western Carpathians / J. Korpak, A. Lenar-Matyas, A. Radecki-Pawlik, K. Plesiński // *Science of the Total Environment*. 2021. 799. Pp. 149-169.

Kuznetsov, O.A. Influence of structural damping on airplane dynamic loads at flight in turbulence and at run International Forum on Aeroelasticity and Structural Dynamics, IFASD 2015.

Pikabu.ru. Официальный сайт // [Электронный ресурс] – URL: http://cs5.pikabu.ru/post_img/2015/12/08/10/1449590537139561835.png (дата обращения: 10.02.2022)

Pohl, M. Solving the time-discrete winter runway scheduling problem: A column generation and constraint programming approach / M. Pohl, C. Artigues, R. Kolisch // *European Journal of Operational Research*. 2022. 299(2), pp. 674-689.

Roughness Measurement, Quantification, and Application – Boeing Method,” Document No. D6-81746, Boeing, November 1995. 44 p.

Sayers, M.W. On the Calculation of IRI from Longitudinal Profile. Transportation Research Record 1501, Transportation Research Board, 1995, p. 1-12.

References

Advisory Circular (AC) Measurement and Evaluation of Runway Roughness. Transport Canada, 2016. No. 302-023. 14 p.

Andronov, V. D. (2012). Development of a strategy for maintaining the operational and technical condition of airfield pavements: thesis ... to-ta. tech. Sciences, 170 p. (in Russian)

Civil Airfield Operational Worthiness Requirements Novosibirsk, 2002. 138 p. (in Russian)

Evaluation Methods for longitudinal evenness of runway pavements. NLR-TP-2009-190 June 2009. 23 p.

Filippov V. P. (1991). Estimation of the probability that the aircraft structure loading parameters do not exceed the maximum permissible levels for ground modes of operation as one of the criteria for the suitability of the runway pavement // Reliability, strength and safety of aircraft operation. Collection of scientific papers. Issue 297. / V. P. Filippov, E. F. Orlov, K. Z. Karaev, I. V. Yakobson. Moscow: GosNIIGA, P. 41-45. (in Russian)

Filippov, V.P. (2015). Methods for ensuring the safe operation of civil aviation aircraft in terms of strength at the ground stages of flight: dissertation ... Dr. tech. Sciences. Moscow, 2015. 268 p.

Guidelines and Procedures for Measuring Airfield Pavement Roughness. FAA AC 50/5380-9. 9. 22 p. (in Russian)

Karaev K. Z. (1991). Statistical methods for analyzing the loading of aircraft structures for assessing the impact of roughness in airfield pavements / K. Z. Karaev, V. P. Filippov // Reliability, strength, diagnostics and safety of aircraft operation. Collection of scientific papers. Issue 302. Moscow: GosNIIGA,. P. 23-31. (in Russian)

Korpak, J. (2021). Erosion irregularities resulting from series of grade control structures: The Mszanka River, Western Carpathians / J. Korpak, A. Lenar-Matyas, A. Radecki-Pawlik, K. Plesiński // *Science of the Total Environment*. 799: 49-169.

- Kuklev E. A.* (2015). Modeling of systems and processes. Mathematical and combined models of technical and economic complexes in civil aviation / E. A. Kuklev, M. Yu. Smurov, A. B. Bayramov. Saint Petersburg: 166 p. (in Russian)
- Kuznetsov, O.A.* (2015). Influence of structural damping on airplane dynamic loads at flight in turbulence and at run International Forum on Aeroelasticity and Structural Dynamics, IFASD.
- Pikabu.ru. Официальный сайт // [Электронный ресурс] – URL: http://cs5.pikabu.ru/post_img/2015/12/08/10/1449590537139561835.png (Accessed 10.02.2022).
- Pohl, M.* (2022). Solving the time-discrete winter runway scheduling problem: A column generation and constraint programming approach / M. Pohl, C. Artigues, R. Kolisch // *European Journal of Operational Research*. 299(2): 674-689.
- Roughness Measurement, Quantification, and Application - Boeing Method,” Document No. D6-81746, Boeing, November 1995. 44 p.
- Rukhlinsky, V. M.* (2021). Selection and substantiation of methods for carrying out the normalization of airfield pavement irregularities / L. G. Bolshedvorskaya, A. A. Khaustov (Proceedings of the fourteenth international conference Management of the development of large-scale systems in the new conditions MLSD'2021) // [Electronic resource DOI 10.25728/8177.2021.51.20.001]. Access mode: <https://mlsd2021.ipu.ru/proceedings/24-29.pdf> (Accessed 02.02.2022). (in Russian)
- Sayers, M. W.* (1995). On the Calculation of IRI from Longitudinal Profile. Transportation Research Record 1501, Transportation Research Board, p. 1-12.
- Shtovba S. D.* (2007). Fuzzy systems design by means of Matlab. M.: Hotline – Telecom, 2007. 288 p. (in Russian)