

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ (МАДИ)»

На правах рукописи



Цаплин Яков Николаевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ОЦЕНКИ НЕСУЩЕЙ
СПОСОБНОСТИ ЖЕСТКИХ АЭРОДРОМНЫХ ПОКРЫТИЙ**

2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов,
мостов и транспортных тоннелей

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук,
доцент Сабуренкова В. А.

МОСКВА – 2022

Оглавление

Введение.....	5
Глава 1 Конструкции бетонных и армобетонных аэродромных покрытий и существующие методы оценки их несущей способности	10
1.1 Обзор конструкций аэродромных покрытий	10
1.2 Принципы расчета аэродромных покрытий.....	17
1.3 Анализ развития отечественных нормативных методов расчета бетонных аэродромных покрытий	19
1.4 Анализ существующих методов оценки несущей способности бетонных аэродромных покрытий	41
1.4.1 Метод оценки Международной организации гражданской авиации ИКАО.....	41
1.4.2 Метод оценки Российской Федерации	43
1.4.3 Метод оценки несущей способности бетонного покрытия по результатам испытаний, принятый в Польше.....	46
1.4.4 Метод оценки несущей способности бетонных покрытий в США	48
1.4.5 Метод оценки несущей способности покрытий в Нидерландах.....	54
1.5 Выводы, цель и задачи работы	56
Глава 2 Исследование нагрузок от воздушных судов на аэродромные покрытия и грунтовые основания	59
2.1 Характеристики воздушных судов, эксплуатирующихся в настоящее время жесткие аэродромные покрытия.....	59
2.2 Классификация нагрузок от воздушных судов на аэродромные покрытия..	64
2.2.1 Определение упругой характеристики для КНН.....	65
2.2.2 Классификация ВС по максимальным изгибающим моментам	73
2.2.3 Классификация ВС по нагрузке на колесо	79
2.2.4 Классификация ВС по коду ACN	81
2.3 Исследование прочности грунтового основания по предельному давлению при воздействии современных тяжелых типов воздушных судов	84

2.4 Выводы по главе 2.....	95
Глава 3 Разработка метода оценки несущей способности бетонного аэродромного покрытия по результатам испытаний опорами воздушных судов и автомобилей или штампами	97
3.1 Обследование поверхности аэродромных покрытий с оценкой их технического состояния.....	99
3.2 Существующий метод определения расчетных характеристик бетонных покрытий по испытаниям штампами	101
3.3 Методика планирования испытаний бетонных аэродромных покрытий ...	102
3.3.1 Планирование испытаний опорами воздушных судов и автомобилей	105
3.3.2 Планирование испытаний штампами	110
3.4 Методика определения характеристик бетонного покрытия по результатам испытаний	113
3.4.1 Расчет упругой характеристики плиты бетонного покрытия	113
3.4.2 Оценка коэффициента постели основания и жесткости плиты бетонного покрытия.....	122
3.5 Методика оценки несущей способности бетонного аэродромного покрытия по результатам испытаний	125
3.5.1 Исходные данные модели	126
3.5.2 Расчет несущей способности по статистическим данным	127
3.5.3 Определение величины допустимой нагрузки методом статистического моделирования Монте-Карло	132
3.6 Выводы по главе 3.....	135
Глава 4 Автоматизированная оценка несущей способности бетонных и армобетонных покрытий	138
4.1 Расчет прогибов от испытательной нагрузки.....	141
4.2 Расчет характеристик жесткого покрытия по измеренным прогибам	148
4.3 Статистическая обработка результатов испытаний	154
4.3.1 Методика анализа статистического ряда.....	154

4.3.2 Расчет статистических оценок характеристик напряженно-деформированного состояния бетонного и армобетонного покрытия	157
4.4 Статистическое моделирование допустимой нагрузки.....	160
4.5 Расчет несущей способности покрытий взлетно-посадочной полосы аэродрома Ростов-на-Дону по результатам натурных испытаний	169
4.6 Выводы по главе 4.....	179
Заключение	180
Список литературы	182
Приложение А	197
Приложение Б	201
Приложение В.....	209

Введение

Актуальность темы исследования. Оценка несущей способности является одним из важных мероприятий при эксплуатации аэродрома. Она необходима для определения количества взлетно-посадочных операций эксплуатируемых воздушных судов. Действующий в России метод оценки не всегда дает адекватный результат из-за того, что несущая способность аэродромного покрытия определяется как допустимая нагрузка на стандартную четырехколесную опору, характеристики которой приведены в нормативном источнике [97], и не учитываются характеристики воздушных судов, воздействующих на покрытие. Расчет выполняется по нормам [97], используемым при проектировании.

Следует отметить, что оценка несущей способности покрытия, вычисленная как допустимая нагрузка на четырехколесную опору, может отличаться от величины допустимой нагрузки эксплуатируемых воздушных судов. Принятая в расчете четырехколесная нормативная опора была введена в отечественные нормы в 1970 году. В то время большинство эксплуатируемых аэродромные покрытия воздушных судов имели четырехколесные опоры с давлением в пневматиках до 1 МПа. В настоящее время изменился парк воздушных судов. На смену отечественным пришли воздушные суда с количеством колес на опорах от двух до шести и более. Давление в пневматиках достигает 1,5 МПа.

При оценке несущей способности эксплуатируемых покрытий необходимо учитывать их фактические характеристики. Так как характеристики покрытий в условиях эксплуатации под воздействием случайных факторов изменяются, целесообразно применять вероятностные методы для учета стохастической природы факторов, влияющих на напряженно-деформированное состояние покрытий.

Как следует из вышеизложенного, необходимо выполнить исследование для уточнения метода расчета несущей способности аэродромных покрытий, предназначенных для эксплуатации современных и перспективных типов воздушных судов. Применение усовершенствованного метода позволит учитывать

характеристики нагрузок от современных типов воздушных судов и фактическое напряженно-деформированное состояние аэродромных покрытий.

Степень разработанности темы исследования. Совершенствованием методов расчета жестких аэродромных покрытий занимались многие ученые из России и других стран. Большое количество исследований было выполнено следующими учеными: В.Ф. Бабковым, Г.М. Вестергаардом, А.П. Виноградовым, С. Войновским-Кригером, Г.И. Глушковым, Л.И. Горецким, Б.И. Деминым, Б.Г. Кореневым, В.А. Кульчицким, С.А. Матвеевым, И.А. Медниковым, Е.А. Палатниковым, Б.С. Раевым-Богословским, В.Д. Садовым, А.П. Степушиным, С.П. Тимошенко, В.Е. Тригопи, В.В. Ушаковым, И.И. Черкасовым и другими.

Объектами исследования являются жесткие бетонные и армобетонные аэродромные покрытия.

Предметом исследования является метод оценки несущей способности жестких бетонных и армобетонных аэродромных покрытий.

Целью исследования является разработка метода оценки несущей способности жестких бетонных и армобетонных покрытий, основанного на учете характеристик современных воздушных судов и фактического напряженно-деформированного состояния аэродромных покрытий, для определения режимов их эксплуатации.

Задачи исследования:

- провести анализ существующих методов расчета бетонных и армобетонных покрытий на возможность их использования для оценки несущей способности покрытий при эксплуатации современных типов воздушных судов;
- исследовать нагрузки на бетонные и армобетонные покрытия и разработать методику классификации воздушных судов, учитывающую воздействие современных типов воздушных судов на покрытия;
- выполнить численное исследование воздействия современных воздушных судов на грунтовые основания бетонных и армобетонных покрытий;
- разработать методики планирования и обработки результатов испытаний бетонных и армобетонных покрытий для определения их статистических характе-

ристик: упругой характеристики плиты, коэффициента постели основания и жесткости сечения плиты;

– разработать методику определения допустимой нагрузки на бетонное и армобетонное покрытие по полученным в результате испытаний статистическим оценкам характеристик покрытия;

– разработать программы автоматизированной оценки несущей способности бетонных и армобетонных покрытий по предлагаемым методикам.

Научная новизна заключается в следующем:

– разработана методика классификации воздушных судов с учетом максимальных изгибающих моментов в жестком аэродромном покрытии;

– численный эксперимент впервые показал, что нагрузки от опор тяжелых воздушных судов могут вызывать в грунтовом основании бетонного покрытия недопустимые напряжения;

– разработанная математическая модель позволяет определять характеристики плиты на упругом основании по отношениям прогибов от любой испытательной нагрузки, по действующей методике характеристики определяются по объему чаши прогиба только от штампа;

– разработана новая методика определения допустимой нагрузки на бетонное и армобетонное аэродромное покрытие методом статистического моделирования Монте-Карло по статистическим оценкам характеристик плиты на упругом основании, полученным при испытаниях аэродромных покрытий.

Теоретическая и практическая значимость работы обусловлена следующими результатами:

– предложенная методика классификации воздушных судов позволяет учитывать требования, обусловленные категориями нормативной нагрузки, при расчете прочности аэродромных покрытий на нагрузки от современных типов воздушных судов;

– предложенный метод оценки несущей способности реализован в виде комплекса программ;

– разработанные методики и программы могут быть использованы организациями для планирования испытаний и оценки несущей способности жестких аэродромных покрытий.

Методология и методы исследования. В теоретических исследованиях при разработке классификации воздушных судов применяются методы планирования и обработки результатов эксперимента; при разработке методов планирования и обработки результатов испытаний аэродромных покрытий – методы теории упругости и математической статистики; при оценке несущей способности – метод статистического моделирования Монте-Карло.

Положения, выносимые на защиту:

– методика классификации воздушных судов с учетом максимальных изгибающих моментов в жестком аэродромном покрытии;

– новые требования по проверке давления на грунтовые основания жестких бетонных и армобетонных аэродромных покрытий;

– метод оценки несущей способности бетонных и армобетонных аэродромных покрытий по результатам натурных испытаний, основанный на разработанной математической модели;

– рекомендации по применению методик и программ для планирования натурных испытаний и оценки несущей способности бетонных и армобетонных покрытий.

Степень достоверности и апробация результатов. Степень достоверности представленных научных положений и выводов обосновывается сопоставлением результатов численных экспериментов по разработанным компьютерным программам с данными других авторов и фактическими оценками несущей способности бетонных и армобетонных покрытий.

Основные положения диссертационной работы доложены на следующих конференциях:

– 77 международная научно-методическая и научно-исследовательская конференция МАДИ, Москва, 2019 г.

– 78 международная научно-методическая и научно-исследовательская конференция МАДИ, Москва, 2020 г.

– 79 международная научно-методическая и научно-исследовательская конференция МАДИ, Москва, 2021 г.

ГЛАВА 1 Конструкции бетонных и армобетонных аэродромных покрытий и существующие методы оценки их несущей способности

1.1 Обзор конструкций аэродромных покрытий

Искусственные покрытия аэродромов предназначены для обеспечения эксплуатации воздушных судов (ВС). Они должны обладать достаточной несущей способностью для восприятия нагрузок от колес опор ВС. Согласно [97] искусственные покрытия должны также воспринимать воздействия природных и эксплуатационных факторов. Основными природными факторами являются переменный температурно-влажностный режим, многократное замораживание и оттаивание, солнечная радиация, ветровая эрозия. К эксплуатационным факторам относятся тепловые и механические воздействия газоздушных струй авиационных двигателей и механизмов, предназначенных для эксплуатации аэродрома, а также воздействие антигололедных реагентов.

Аэродромными покрытиями являются конструкции, включающие верхние слои, называемые в нормативных документах [97] покрытиями и нижние слои, именуемые искусственными основаниями. Покрытие и искусственное основание лежат на естественном грунтовом основании, свойства которого в значительной степени влияют на работоспособность всей конструкции.

На рис. 1.1 приведена схема конструкций аэродромных покрытий.

Как видно из схемы рис. 1.1, конструкции аэродромных покрытий включают собственно покрытие, искусственное основание и грунтовое основание. Покрытия по условиям восприятия нагрузок от опор ВС делятся на две группы: жесткие и нежесткие (см. рис. 1.1).

Жесткие аэродромные покрытия способны сопротивляться напряжениям растяжения при изгибе от нагрузок опорами ВС, а также природно-климатическим условиям эксплуатации. Моделью жесткого покрытия является плита на упругом основании. Характеристики бетона жестких покрытий мало из-

меняются при изменении климатических факторов, основными из которых являются температура воздуха, солнечная радиация и влажность.

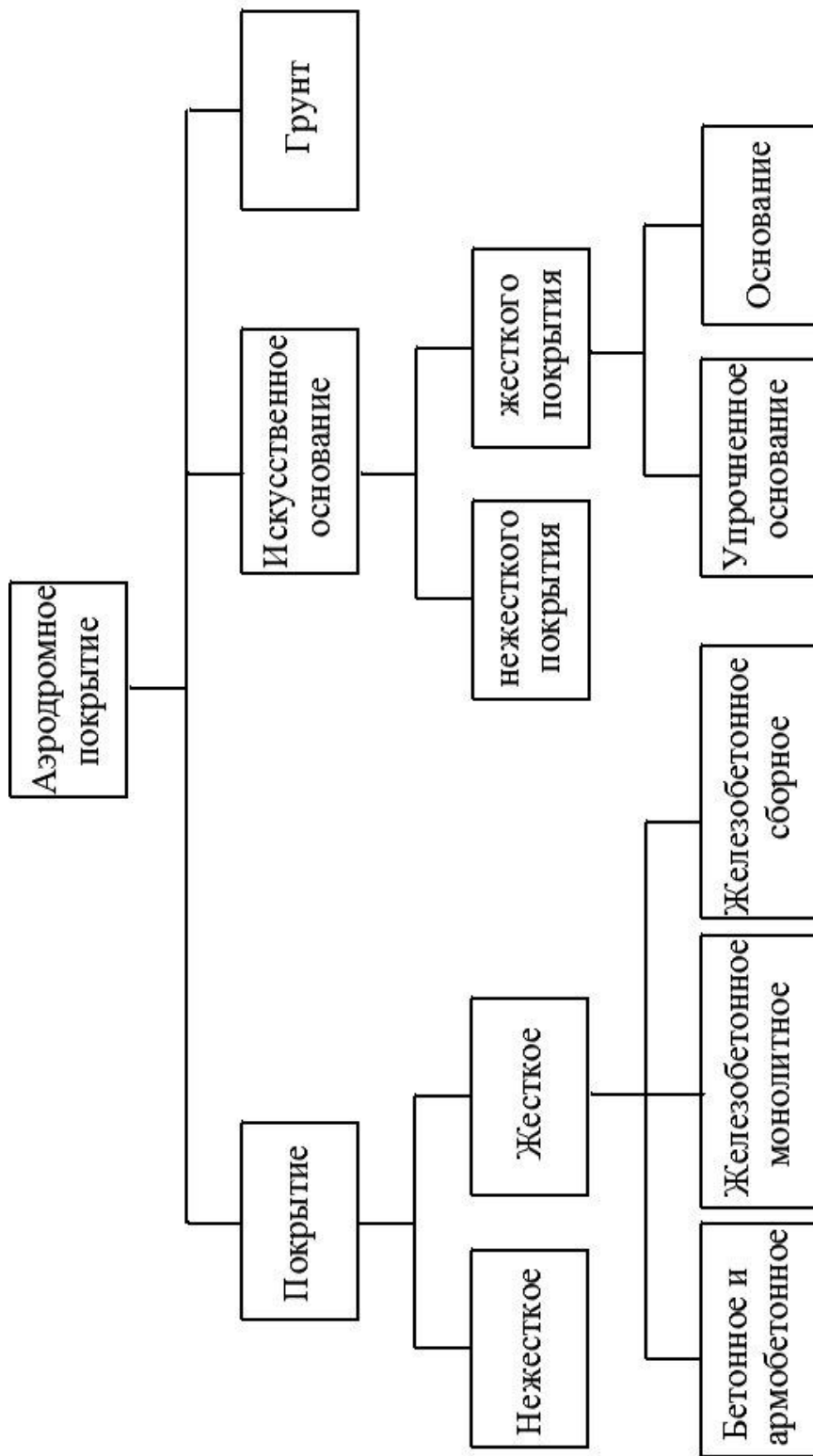


Рисунок 1.1 – Схема аэродромных покрытий

На схеме рис. 1.1 жесткие покрытия подразделяются на 3 вида: бетонные (армобетонные); монолитные железобетонные и сборные железобетонные покрытия из предварительно напряженных железобетонных плит.

Строительство первых аэродромов с бетонными покрытиями началось в 30-е годы прошлого века. Они были предназначены для небольших ВС и устраивались из бетона классов $B_{tb}2,8-3,2$ толщиной 10–14 см. Основным назначением покрытий была защита аэродромных покрытий от неблагоприятных условий внешней среды в период распутиц.

В настоящее время согласно [97] класс бетона должен быть не ниже $B_{tb}4,4$ для аэродромов, эксплуатируемых внекатегорийными нагрузками, и не ниже $B_{tb}4,0$ для остальных аэродромов. Толщины современных бетонных покрытий могут достигать 50 см и более.

Железобетонные монолитные покрытия устраивают из бетона с двухуровневой арматурной сеткой, рассчитываемой под нагрузку от опоры ВС. Основную нагрузку воспринимает арматура, бетон работает в конструкции железобетонного покрытия с трещинами в растянутой зоне, ширина которых согласно действующим нормам [97] не должна быть больше 0,3 мм.

Основное преимущество железобетонных плит заключается не столько в увеличении их прочности, сколько в том, что арматура, прочно стягивая грани любых трещин, предотвращает их дальнейшее расширение, позволяя тем самым сохранить первоначальную прочность плит и исключить или свести к минимуму проникание воды под покрытие [43]. Расчет прочности железобетонных покрытий выполняется для условий работы с трещинами в растянутой зоне, которые снижают жесткость сечения плиты. Требуемая по расчету ширина раскрытия трещин не более 0,3 мм необходима для предотвращения коррозии арматуры и снижения возможности проникания воды в основание.

В отечественной практике железобетонные покрытия устраивались монолитными и сборными. Монолитные железобетонные покрытия делятся на покрытия с ненапряженной арматурой и предварительно напряженные. В настоящее время монолитные предварительно напряженные железобетонные покрытия не

строятся из-за сложности технологического оборудования и производства работ по сравнению со строительством бетонных покрытий. Железобетонные предварительно напряженные покрытия укладываются из сборных плит, производимых на заводах железобетонных изделий. Они получили распространение в северных районах с коротким строительным сезоном. Эти плиты, изготовленные с соблюдением технологии заводского производства, имеют преимущество перед монолитным бетоном за счет качества и исключения процесса ухода за свежееуложенным бетоном. Заводы железобетонных изделий выпускают плиты типа ПАГ-14, ПАГ-18 и ПАГ-20, соответствующие ГОСТ 25912.

Однако плиты ПАГ имеют существенные ограничения по допустимым нагрузкам на них. В нормах [97] приведены следующие требования. Сборные покрытия из плит ПАГ-14 следует применять для нагрузок на колесо не более 100 кН для многоколесной опоры и не более 170 кН для одноколесной, ПАГ-18 – не более 140 кН для многоколесной опоры и не более 200 кН для одноколесной опоры, ПАГ-20 – не более 180 кН и 250 кН соответственно. Это существенно уменьшает область их применения на аэродромах.

Армобетонные покрытия рассчитываются по модели бетонного покрытия. Они армируются металлом с процентом армирования не более 0,25%. Арматура в них предназначена для восприятия нагрузок от опор ВС и колебаний температуры воздуха и солнечной радиации. В расчете прочности эти свойства армобетонных покрытий учитываются большими коэффициентами условий работы по сравнению с бетонными покрытиями, повышающими предельный изгибающий момент. Длина армобетонных плит больше длины бетонных плит. Например, согласно действующим нормам [97] при толщине бетонной плиты 30 см и более длина плиты должна быть не более 7,5 м. Длина армобетонной плиты не зависит от толщины, а зависит от годовой амплитуды среднемесячных температур. При годовой амплитуде менее 45°С длина армобетонной плиты должна быть не более 15 м. Т.е. для наиболее вероятных значений толщин и амплитуд среднемесячных температур длина армобетонных плит может быть в два раза больше длины бе-

тонных плит. В связи с этим у армобетонных плит меньше швов, что является благоприятным фактором при эксплуатации аэродромных покрытий.

Однако обследование эксплуатируемых армобетонных покрытий показало, что арматура в верхней зоне плиты не предотвращает появление трещин, связанных с нагрузками от опор ВС и температурными колебаниями. В результате такого воздействия в покрытии появляются тонкие трещины, которые в процессе эксплуатации разрушаются и превращаются в сквозные трещины, которые делят армобетонную плиту на отдельные фрагменты. Для предупреждения таких трещин необходимо уменьшать размер плит, это уменьшает преимущества армобетона перед бетоном.

В статье [1] приведен пример однослойного армобетонного покрытия толщиной 24-27 см, построенного в аэропорту Анапа (Витязево). Покрытие было разрезано на плиты длиной 33 и шириной 7 м.

На второй год эксплуатации в покрытии появились трещины, связанные с температурными усадками бетона. После 30 лет эксплуатации в покрытии появилось большое количество сквозных поперечных трещин, разделивших плиты на отдельные фрагменты. На фото рис. 1.2 и фрагменте дефектовочного плана рис. 1.3 видно большое количество поперечных трещин. На некоторых плитах было обнаружено до 12 сквозных поперечных трещин. Большинство этих трещин появилось в первые годы эксплуатации армобетонного покрытия, после чего процесс образования поперечных трещин существенно замедлился.

В настоящее время практически все новые жесткие аэродромные покрытия возводятся из бетона. Это обусловлено повышением прочности бетона и возможностью строительной техники по устройству более толстых слоев покрытия, а также технологичностью и экономичностью строительства бетонных покрытий.

Нежесткие аэродромные покрытия согласно действующим нормам [97] делятся на покрытия капитального типа и облегченного типа.

Покрытия капитального типа состоят из одного или нескольких слоев асфальтобетона; слоев из укрепленных золой уноса, шлаком, битумом, цементом, известью грунто-щебеночных, песчано-гравийных и других подобных строитель-

ных материалов; неукрепленных слоев из тех же материалов; дренирующих слоев.

Нежесткие покрытия облегченного типа имеют структуру как у нежестких покрытий капитального типа, но у них нет асфальтобетонных слоев.

По сравнению с жесткими покрытиями нежесткие покрытия слабее сопротивляются растягивающим напряжениям от нагрузок и факторам окружающей среды, основными из которых являются температура и влажность [43].



Рисунок 1.2 – Армобетонное покрытие аэродрома Анапа (Витязево)

Сопротивление нагрузкам обуславливается сопротивлением подстилающего грунта сжатию и боковому выжиманию. Прогибы нежестких покрытий под нагрузкой значительно больше прогибов жестких покрытий, а диаметры чаши прогиба имеют меньшие размеры. В периоды весенней и осенней распутиц давление от опоры ВС, передаваемое через нежесткое покрытие на грунт, достигает значительной величины, деформации носят упруго-пластический характер.

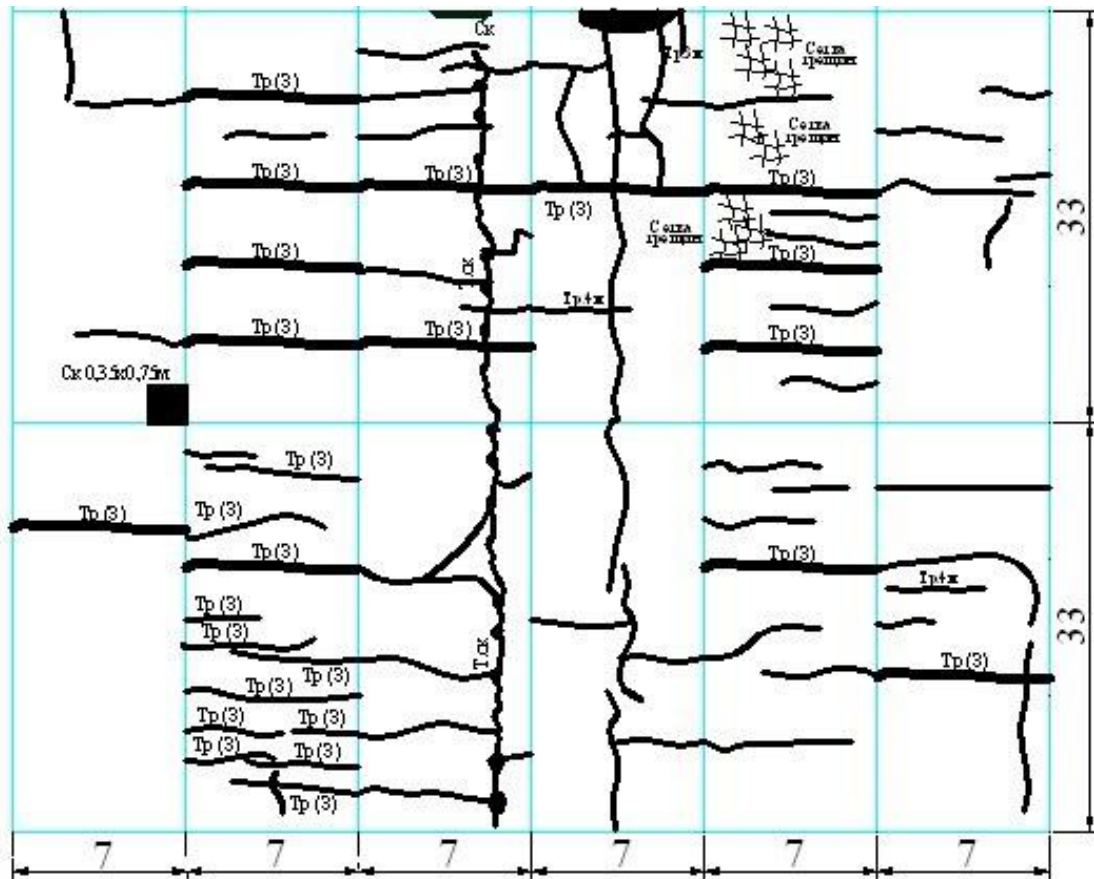


Рисунок 1.3 – Фрагмент дефектовочного плана армобетонного покрытия

Покрывтия, состоящие из жестких слоев (слоя), перекрытых асфальтобетоном, в зависимости от технического состояния жесткого слоя и способности его воспринимать растягивающие напряжения, могут относиться либо к жестким, либо к нежестким. Если жесткий слой является доминирующим элементом покрытия и не имеет серьезных повреждений, а также близко расположенных сквозных трещин (на расстоянии менее 3-х метров), то такое покрытие считается жестким смешанным. В остальных случаях покрытие считается нежестким [37].

Искусственные покрытия, как правило, устраивают на искусственных основаниях, имеющих различные функции: дренирующие, воспринимающие часть нагрузки, теплоизолирующие и др. Характеристики искусственных оснований независимо от их назначения учитываются при оценке несущей способности конструкции аэродромного покрытия.

Из выполненного обзора конструкций аэродромных покрытий можно сделать вывод о том, что наиболее актуальным является совершенствование методов оценки бетонных покрытий.

1.2 Принципы расчета аэродромных покрытий

Основными факторами, которые необходимо учитывать при проектировании и оценке аэродромных покрытий, являются:

нагрузки от опор ВС;

температурный режим работы конструкции;

гидрогеологические условия грунтового основания.

Расчет аэродромных покрытий всех типов производят по методу предельных состояний. Предельное состояние – это состояние конструкции, при наступлении которого она становится неспособной сопротивляться внешним воздействиям или получает недопустимые по условиям эксплуатации повреждения [36]. Предполагается, что предельное состояние наступает под воздействием предельной нагрузки при наименьшей возможной несущей способности конструкции.

Проектирование аэродромных покрытий выполняется по предельным состояниям на проектные сроки службы в соответствии с действующими нормами [97]. Для жестких аэродромных покрытий нормативный минимальный срок службы 20 лет; для нежестких покрытий капитального типа 10 лет; для нежестких покрытий облегченного типа – 5 лет. В течение срока службы в конструкции не должны быть нарушены условия предельных состояний с одной стороны, и запас прочности должен быть минимальным для экономичности конструкции, с другой стороны. Условие прочности записывается в виде [9]

$$S \leq R, \quad (1.1)$$

где S – нагрузка от опор ВС;

R – несущая способность аэродромного покрытия.

В процессе эксплуатации случайным образом изменяются характеристики нагрузок от опор ВС и внешних факторов, а также характеристики конструкции,

определяющие ее несущую способность. Статистические характеристики этих случайных величин можно определить только в результате обследования и испытаний.

Существует два подхода к проверке условия (1.1): детерминированный и вероятностный.

При детерминированном подходе статистическая природа аргументов функций S и R учитывается коэффициентами запаса, а условие (1.1) заменяется условием [9]

$$S_H \leq \frac{R_H}{k}, \quad (1.2)$$

где S_H – расчетная нагрузка;

R_H – расчетная несущая способность;

k – коэффициент запаса прочности.

Расчетные значения нагрузок от опор ВС с учетом их повторности используются в формуле (1.2) как детерминированные величины. Они определяются приведением нагрузок от всех эксплуатируемых типов ВС к расчетному типу. Расчетные характеристики конструкции и грунтового основания принимаются по нормативным источникам, в которых приведены обобщенные данные, полученные в результате многолетних наблюдений и испытаний, например, коэффициенты постели или прочностные характеристики строительных материалов. Коэффициенты запаса и расчетные коэффициенты математических моделей получены эмпирическим путем, их значения включены в действующие нормы.

При вероятностном подходе используются статистические методы обработки результатов исследований для получения оценок параметров конструкций, по которым методом статистического моделирования Монте-Карло определяется оценка несущей способности конструкции – допустимая нагрузка.

Основная формула метода расчета жестких аэродромных покрытий по предельному состоянию при вероятностном подходе имеет вид [73]

$$S < k \cdot \Phi, \quad (1.3)$$

где S и Φ – математические ожидания соответственно изгибающего момента от

опоры расчетного ВС и несущей способности конструкции;

k – коэффициент, учитывающий вероятностный характер воздействия нагрузок и статистическую изменчивость расчетных параметров конструкции (прочности материала, геометрических сечений и т. д.)

Расчетным предельным состоянием бетонных и армобетонных покрытий является [97] условие прочности по изгибающему моменту.

Для конструкций аэродромных покрытий на просадочных грунтах расчетным предельным состоянием является также предельное состояние по давлению на грунтовое основание, в зависимости от которого согласно требованиям [97] необходимо предусматривать мероприятия по устранению просадочных свойств грунтов.

1.3 Анализ развития отечественных нормативных методов расчета бетонных аэродромных покрытий

Данная работа направлена на совершенствование метода оценки бетонных аэродромных покрытий, которая выполняется на стадии их эксплуатации. При этом аэродромные покрытия должны соответствовать действующим нормативным документам, в которых изложены требования к ним и методы расчета. Рассмотрим, как совершенствовались методы расчета бетонных покрытий.

Левые части условий прочности (1.1) и (1.2) при расчете прочности жестких аэродромных покрытий по нормативному методу [97] являются расчетными изгибающими моментами, которые определяются по нормативному методу, в котором жесткое аэродромное покрытие рассчитывается как плита на упругом основании.

Выбор изгибающих моментов критериями прочности жестких аэродромных покрытий обоснован тем, что они состоят из тонких плит, т.к. отношение толщины плиты к размеру наименьшей стороны намного меньше 0,2. Прогибы плит $w < h/4$, где h – толщина плиты, м. Такие покрытия рассчитываются в рамках технической теории изгиба пластин решением уравнения Софи Жермен – Лагранжа [147].

Для расчета изгибающих моментов используются несколько гипотез о функции $p(x, y)$ реактивного отпора основания, осадка которого принимается в модели равной прогибам плиты под опорой ВС. При этом условии дифференциальное уравнение Софи Жермен – Лагранжа имеет вид [147]

$$D \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) = q(x, y) - p(x, y), \quad (1.4)$$

где w – прогиб плиты;

x, y – координаты срединной плоскости плиты;

$$D = \frac{E_b \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \quad \text{– цилиндрическая жесткость плиты;}$$

E_b, μ – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала плиты;

t – толщина плиты;

$q(x, y)$ – внешняя нагрузка;

$p(x, y)$ – реактивный отпор основания.

Левая часть уравнения (1.4) представляет собой бигармоническое уравнение изгиба срединной плоскости плиты, а правая – разность функций внешней нагрузки $q(x, y)$ и реактивного отпора основания $p(x, y)$.

В зависимости от положенной в основу расчета гипотезы о работе грунта в основании плит вид функции $p(x, y)$ может быть различным. Она задает способность грунтов сопротивляться действующим нагрузкам и определяет особенности развития деформаций грунтов под действием этих нагрузок.

При решении задачи об изгибе плит на упругом основании основными гипотезами о работе грунта являются:

коэффициента постели Фусса – Винклера, положенная в основу работ Г.М. Вестергаарда [151], С.П. Тимошенко, С. Войновского-Кригера [147] и др.;

основания, характеризуемого двумя коэффициентами постели, предложенная П.Л. Пастернаком [66];

линейно-деформируемого полупространства теории упругости, развитая применительно к расчету строительных конструкций трудами Н.М. Герсеванова,

О.Я. Шехтер [129, 130], Б.Н. Жемочкина [39], М.Н. Горбунова-Посадова [26–29] и др.

Механические свойства грунтов неоднородны как во времени, так и в пространстве. На одном аэродроме встречаются несколько разновидностей грунтов с различными свойствами, которые при расчете необходимо учитывать одним значением. Значительно различаются свойства грунтов по сезонам года. Поэтому чем меньше параметров будет содержать принятая расчетная модель, тем меньше приближенных величин будет вводиться в расчет покрытий [67].

Наибольшее распространение в практике проектирования сооружений, покоящихся на естественных грунтах, получила самая простая модель, основанная на гипотезе Фусса – Винклера. Эта гипотеза была впервые представлена Э. Винклером [150] в 1867 году. Таким образом, эта модель называется моделью Винклера (рис. 1.4). Однако, согласно М. Хетеньи [139], В.З. Власову и Н.Н. Леонтьеву [20], первоначальная концепция гипотезы приписывается Л. Эйлеру или его ученику Н. Фуссу. Данная модель имеет следующие допущения [67]:

сооружения и основания связаны друг с другом в вертикальном направлении так, что всякие перемещения сооружения влекут за собой такие же перемещения (осадку) основания в том же месте;

в горизонтальном направлении сооружение не связано с основанием, поэтому возможны сдвиги его относительно основания;

величина вертикального перемещения (осадки) основания пропорциональна интенсивности нагрузки на него.

По этой гипотезе основание представляет собой как бы систему не связанных между собой вертикальных пружин, которые деформируются только в тех точках поверхности, где имеется нагрузка.

Зависимость между реакцией основания и его осадкой выражается формулой [43]

$$p(x, y) = k \cdot w, \quad (1.5)$$

где k – коэффициент постели основания, представляющий собой отношение давления на грунт к абсолютной величине осадки;

w – осадка основания.

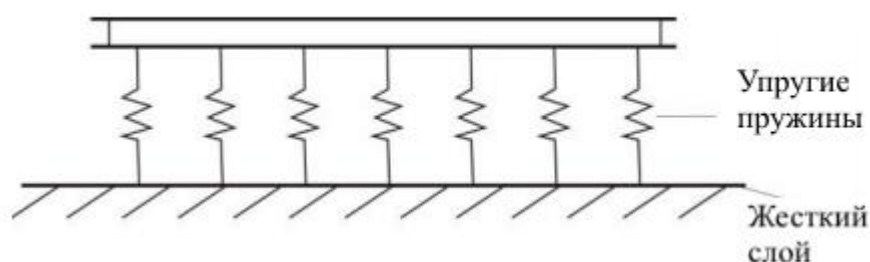


Рисунок 1.4 – Модель основания Винклера

Строго говоря, гипотеза Фусса – Винклера не соответствует фактическому характеру работы грунта в основаниях покрытия, поскольку в действительности грунт деформируется не только под давящей площадкой, но и вокруг нее [43].

Свободной от указанного недостатка является модель упругого полупространства, в которой грунт рассматривается как упругое изотропное твердое тело, а распределение деформаций на его поверхности принимается по гиперболическому закону Буссинеска. Согласно этой модели грунтовое основание деформируется и за пределами нагруженной части. При этом деформации распространяются в стороны до бесконечности, постепенно затухая по мере удаления от нагруженной части. Механические свойства материала модели характеризуются двумя параметрами: модулем упругости E и коэффициентом Пуассона μ .

П.Л. Пастернак [66] предложил модель, характеризующую грунт двумя коэффициентами постели (рис. 1.5). Первый коэффициент аналогичен коэффициенту Фусса – Винклера – коэффициент сжатия, связывает интенсивность вертикального отпора грунта σ с его осадкой w формулой [66]

$$\sigma = C_1 w. \quad (1.6)$$

Независимый от C_1 второй коэффициент C_2 характеризует сопротивление грунта сдвигу в вертикальном направлении и дает возможность выразить интенсивность вертикальной силы сдвига t в виде произведения C_2 на производную осадки в соответствующем направлении по формуле [66]

$$t = C_2 \frac{\partial w}{\partial x}. \quad (1.7)$$

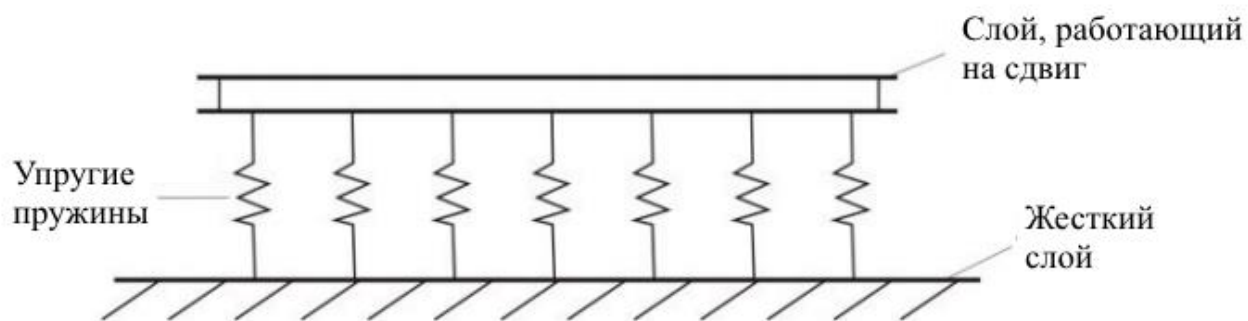


Рисунок 1.5 – Модель основания Пастернака

С учетом двух коэффициентов постели дифференциальное уравнение осадочной поверхности в прямоугольных координатах имеет вид [66]

$$p = C_1 w - C_2 \nabla^2 w, \quad (1.8)$$

где ∇^2 – оператор Лапласа.

Аналогичные модели для грунтов предложил М. М. Филоненко-Бородич – «мембранную» и «ламинарную» модели (рис. 1.6) [40]. Мембранная модель усложняется добавлением мембраны с постоянным натяжением. Мембрана обеспечивает совместное взаимодействие всех пружин. Взаимодействие пружинных элементов определяется интенсивностью натяжения мембраны.

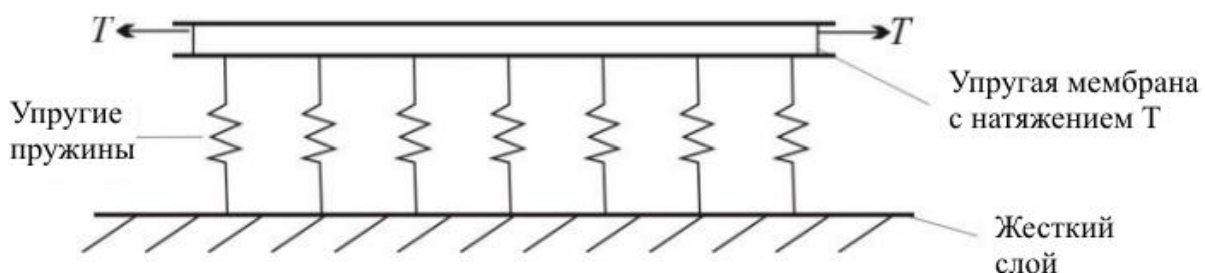


Рисунок 1.6 – Модель основания Филоненко-Бородича

$$p = kw - T\nabla^2 w, \quad (1.9)$$

где T – сила натяжения мембраны.

В ламинарной модели вводятся тонкие упругие стержни или пластинки [40].

В модели, предложенной Хетеньи [140], взаимодействие между независимыми пружинными элементами обеспечивается с помощью упругой плиты, работающей на изгиб (рис. 1.7).

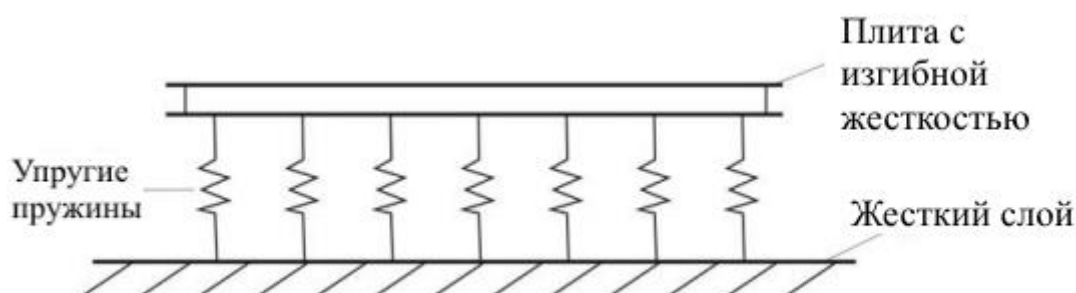


Рисунок 1.7 – Модель основания Хетеньи

Функция реакции задана уравнением

$$p = kw - D\nabla^4 w, \quad (1.10)$$

где

$$\nabla^4 = \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4},$$

∇^4 – бигармонический оператор.

В качестве обобщения концепции Пастернака, Керр [143] предложил трехпараметрическую модель основания, которая состоит из двух слоев упругих пружин, соединенных между собой слоем, работающим на сдвиг, с модулем сдвига G (рис. 1.8).

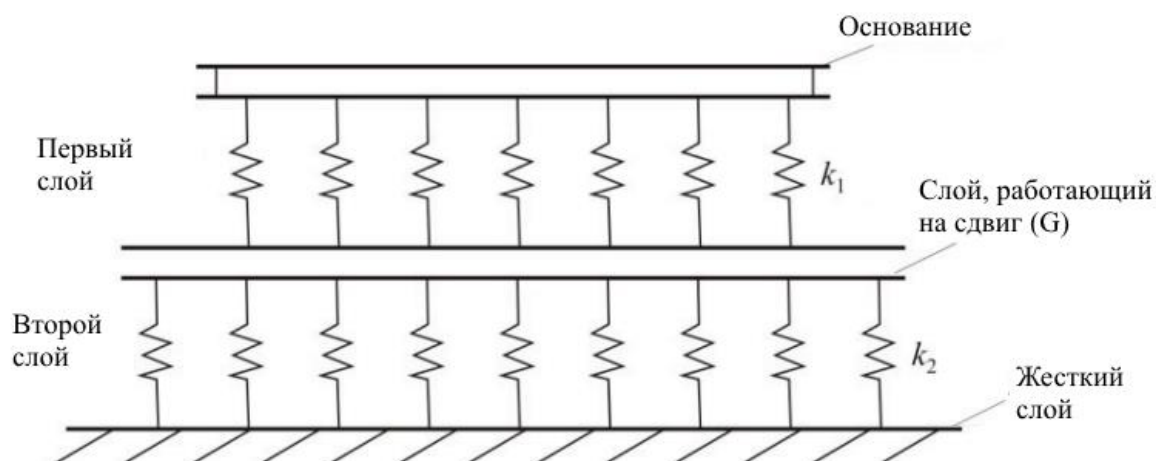


Рисунок 1.8 – Модель основания Керра

В этой модели реакция описывается уравнением

$$\left(1 + \frac{k_2}{k_1}\right)p = \frac{G}{k_1}\nabla^2 p + k_2 w - G\nabla^2 w, \quad (1.11)$$

где k_1 – постоянная первого слоя,

k_2 – постоянная второго слоя,

w – осадка первого слоя.

Для определения возможности применения модели Фусса – Винклера для расчета конструкций жестких аэродромных покрытий были проведены обширные экспериментальные исследования различных грунтов в естественном состоянии в разное время года (весной, летом, осенью) в I, II, III и IV дорожно-климатических зонах территории СССР, начиная с 1954 года в течение ряда лет. На основании этих исследований Л.И. Манвелов и Э.С. Бартошевич сделали следующие выводы [51]:

1. Деформация поверхности грунта за пределами загруженной части очень быстро затухает, следовательно, грунты обладают весьма малой распределительной способностью.

2. Кривые, построенные на основе модели упругого полупространства, не подтверждаются результатами испытаний. Деформации поверхности на основе этой модели затухают очень медленно. Следовательно, модель упругого полупространства сильно преувеличивает распределительную способность грунта.

Авторы [51] на основании исследований рекомендовали для практических расчетов конструкций, лежащих на естественных грунтах, модель Фусса – Винклера, отмечая, что при той малой распределительной способности, которой обладают грунты, погрешность в применении модели Фусса – Винклера, идущая в запас прочности, практически не сказывается на результатах расчета. Кроме этого, в статье [51] отмечено, что весной, когда грунты переувлажнены, у них распределительные свойства практически отсутствуют. В этом случае деформационные свойства грунтов наиболее правильно отображаются моделью Фусса – Винклера.

Теоретические исследования [62] и экспериментальные работы Е.А. Палатникова, А.А. Теплякова и других исследователей подтвердили возможность ис-

пользования гипотезы Фусса – Винклера для расчета плит на упругом основании.

Гипотеза Фусса – Винклера была включена в утвержденные Госстроем СССР «Технические условия проектирования аэродромных покрытий» СН 120-60 [91], а затем – в нормативные документы [92, 93, 95, 96] для расчета жестких аэродромных покрытий.

Э.С. Бартошевичем [7] по данным полевых испытаний грунтов всех климатических зон СССР была составлена таблица коэффициентов постели в зависимости от плотности и влажности грунта. В заключении НИИ оснований и подземных сооружений на статью [7] было указано, что «применение модели Фусса – Винклера к расчету гибких конструкций большого протяжения (каковыми являются плиты аэродромных и дорожных покрытий и др.) является оправданным». Опубликованные в [7] значения коэффициента постели являются основой для усовершенствованной в дальнейшем таблицы нормативных значений, используемых в действующем нормативном документе [97].

Расчетные характеристики грунтов в таблице [97] даны в зависимости от вида грунтов, типа гидрологических условий и дорожно-климатической зоны. Вид грунтов определяется стандартом [34], гармонизированным с международными стандартами [137, 141]. Приведенное в нем сопоставление классификаций грунтов позволяет использовать международные классификации, что расширяет область применения разрабатываемых методов расчета аэродромных покрытий.

Поэтому для расчета жестких покрытий оказываются приемлемыми гипотезы как коэффициента постели, так и линейно-деформируемого однородного полупространства, рассматриваемого в теории упругости.

Влияние нелинейной связи между напряжениями и деформациями в грунтовых основаниях бетонных покрытий было исследовано Л.И. Манвеловым и К.И. Сафроновым. Они разработали метод расчета покрытий, где расчетное значение модуля деформации грунта принимается в зависимости от нагрузки на плиту, ее толщины, удельного давления в шине колеса и расстояния между колесами опоры самолета [67]. Этот метод расчета использовался в нормативном документе СН 120-60 [91].

Решению дифференциального уравнения (1.4) посвящены работы О.Я. Шехтер [129, 130], М.И. Горбунова-Посадова [26–29], Б.Н. Жемочкина [39] и др.

Для плит больших размеров в плане («бесконечные плиты»), нагруженных сосредоточенной силой, которые представляют собой случай осевой симметрии, имеется точное решение уравнения, полученное О.Я. Шехтер при помощи функций Бесселя. Решение О.Я. Шехтер основывается на гипотезе линейно-деформируемого полупространства и предусматривает основание в виде однородного массива или слоя конечной мощности, подстилаемого несжимаемым массивом. При выводе было сделано допущение, что трение между покрытием и подстилающим грунтом отсутствует.

О.Я. Шехтер составила таблицы безразмерных эпюр изгибающих моментов, прогибов и поперечных сил в любом радиальном сечении плиты. Решение О.Я. Шехтер можно использовать для определения моментов и прогибов в плитах большого размера при симметрично расположенной по отношению к центру плиты нагрузке в виде группы сил. Условием применимости решения О.Я. Шехтер к расчетам жестких покрытий можно считать случай, когда границы чаши положительного прогиба от нагрузки не выходят за пределы плиты.

М.И. Горбунов-Посадов получил решение общего дифференциального уравнения (1.4) для круглых плит любых размеров, нагруженных симметрично расположенной нагрузкой в виде сосредоточенной силы и равномерно распределенной нагрузки, приложенных в центре, а также для системы сил или моментов, приложенных по окружности или распределенных по кольцу. Эти решения он получил, принимая искомый закон реактивного отпора грунта и выражение для прогиба основания под плитой в виде степенных рядов.

Для всех указанных случаев составлены таблицы безразмерных величин, при помощи которых можно рассчитать изгибающие моменты, прогибы и реакцию основания в любом сечении плиты.

В 1959 году М.И. Горбунов-Посадов опубликовал расчет полубесконечных плит [29], результаты которого могут быть использованы для расчета бетонных покрытий при расположении нагрузки на краях плит.

Все указанные методы, за исключением последней работы М.И. Горбунова-Посадова, рассматривают случай приложения нагрузки в центре плиты, оставляя открытым вопрос о напряжениях, возникающих при действии нагрузок на угол и край плиты, когда условия ее работы более неблагоприятны. Для этих случаев Г.М. Вестергаардом [151] был предложен метод расчета напряжений в бетонных плитах дорожных покрытий при расположении нагрузки в центре, на краю и углу плиты. Впоследствии формулы Г.М. Вестергаарда были видоизменены применительно к нагрузкам от колес самолетов.

Действующий нормативный метод [97] расчета жестких аэродромных покрытий использует также исследования плит на упругом основании С.П. Тимошенко, С. Войновского-Кригера [147], Б.Г. Коренева [47, 48, 49].

Отечественные аэродромы с бетонными покрытиями условно можно разделить на гражданские, военные и заводские. Этим трем видам аэродромов соответствуют три направления развития методов расчета аэродромных покрытий, которые тесно взаимосвязаны между собой.

Большое количество исследований, связанных с совершенствованием расчетов жестких аэродромных покрытий начиная с середины прошлого столетия, было выполнено учеными ГПИ и НИИ ГА «Аэропроект» и МАДИ: В.П. Апестиной [1–3, 13, 68, 119], Ю.С. Барит [6], В.Б. Безелянским [8, 70, 86], А.П. Виноградовым [12–19, 28, 71], Г.И. Глушковым [21–24, 40, 44, 71, 72, 120, 125, 133], Л.И. Горецким [30–32, 71], С.А. Матвеевым [52], И.А. Медниковым [53–56], В.А. Сабуренковой [76–84], В.Д. Садовым [54, 68, 71, 85–89], А.П. Степушиным [24, 98–114, 120, 125, 132, 133], В.Е. Тригоны [42, 68, 71, 118, 119], В.В. Татариновым [115–117], А.В. Фоминым [117, 123, 124] и другими.

Особая роль в развитии отечественных методов расчета аэродромных покрытий принадлежит 26 НИИ МО РФ, в котором выполняли научную работу Г.И. Глушков, Б.И. Демин [67], Б.С. Раев-Богословский [40, 67], И.И. Черкасов [127, 128] и другие специалисты в области аэродромостроения. Работы В.А. Кульчицкого и его соавторов [5, 57], вышедших из 26 НИИ МО РФ, направлены на дальнейшее развитие методов проектирования и оценки аэродромных покрытий.

Третьим направлением являются работы ученых института ГИПРОНИ-ИАВИАПРОМ: Е.А. Палатникова [61–65, 131], А.А. Теплякова [65, 131] и др.

Исследованию жестких покрытий автомобильных дорог посвящены работы В.П. Носова [60], В.В. Ушакова [121] и др.

Исследования отечественных и зарубежных ученых лежат в основе нормативных документов, разрабатываемых с середины прошлого столетия.

Одним из первых отечественных нормативных документов являются Технические условия проектирования аэродромных покрытий СН 120-60 [91].

Конструкции аэродромных покрытий по [91] проектировались на категории нормативной нагрузки, представленных взлетным весом самолета и расчетной эквивалентной нагрузкой на колесо. Расчет конструкций требовалось выполнять на одну из шести категорий, представленных в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Категории расчетных нагрузок	Взлетный вес самолетов в т	Расчетная эквивалентная нагрузка на одно колесо в т
I	200	35
II	150	25
III	100	17
IV	75	12
V	35	8
VI	15	5

Расчет жестких покрытий согласно [91] выполнялся по методу предельных состояний. В качестве предельного состояния бетонного покрытия принималось достижение предельного разрушающего изгибающего момента по условию

$$M_{\text{расч}} \leq m k_b R_{\text{ри}}^H W_0, \quad (1.12)$$

где $M_{\text{расч}} = \max(M_x, M_y)$ – расчетный изгибающий момент;

m – коэффициент условий работы;

k_b – коэффициент однородности бетона;

$R_{\text{ри}}^H$ – нормативное сопротивление бетона растяжению при изгибе;

W_0 – момент сопротивления сечения покрытия.

Рассмотрим определение параметров формулы (1.12). Для определения расчетных изгибающих моментов на краю, углу или других точках изотропных плит покрытия в [91] используется формула

$$M_{\text{расч}} = M_{\text{ц}} K, \quad (1.13)$$

где $M_{\text{ц}}$ – максимальный изгибающий момент в плите покрытия при ее центральном нагружении. Значения K определяются в зависимости от расположения расчетной точки плиты покрытия и условия закрепления ее краев. При армировании бетонных плит по периметру или по отдельным сторонам согласно [91] принимался $K = 1,2$.

Для определения максимального значения изгибающего момента в плите покрытия при ее центральном нагружении предписывалась формула

$$M_{\text{ц}} = M_0 + \max \sum M_{x(y)i}, \quad (1.14)$$

где M_0 – момент в сечении под центром отпечатка следа наиболее нагруженного колеса под действием этого же колеса;

$M_{x(y)i}$ – моменты в указанном выше сечении от действия остальных колес самолетной опоры.

Для изотропной бетонной плиты моменты определялись по приведенным ниже формулам.

$$M_0 = qS(0,096a - 0,012S), \quad (1.15)$$

где q – удельное давление, передающееся на поверхность покрытия от внешней нагрузки (давление в пневматиках колес шасси);

S – упругая характеристика плиты покрытия;

a – размер стороны квадрата, равновеликого по площади отпечатку пневматика.

Упругая характеристика плиты в формуле (1.15) определялась по формуле

$$S = \sqrt[4]{\frac{4D}{C_{\text{расч}}}}, \quad (1.16)$$

где $C_{\text{расч}}$ – расчетный коэффициент постели;

$D = \frac{E_6 h^3}{12(1 - \mu_6^2)}$ – цилиндрическая жесткость изотропной плиты;

E_6 – расчетный модуль упругости бетона;

h – толщина покрытия;

μ_6 – коэффициент Пуассона для бетона.

Моменты от действия остальных колес в случае изотропной плиты определяются по формулам [91]

$$\left. \begin{aligned} M_{xi} &= M_{ri} \cos^2 \beta_i + M_{\vartheta i} \sin^2 \beta_i \\ M_{yi} &= M_{ri} \sin^2 \beta_i + M_{\vartheta i} \cos^2 \beta_i \end{aligned} \right\} \quad (1.17)$$

где $M_{ri}, M_{\vartheta i}$ – радиальный и тангенциальный изгибающие моменты от воздействия i -го колеса опоры;

β_i – углы между осями ox и ox_i (рис. 1.9).

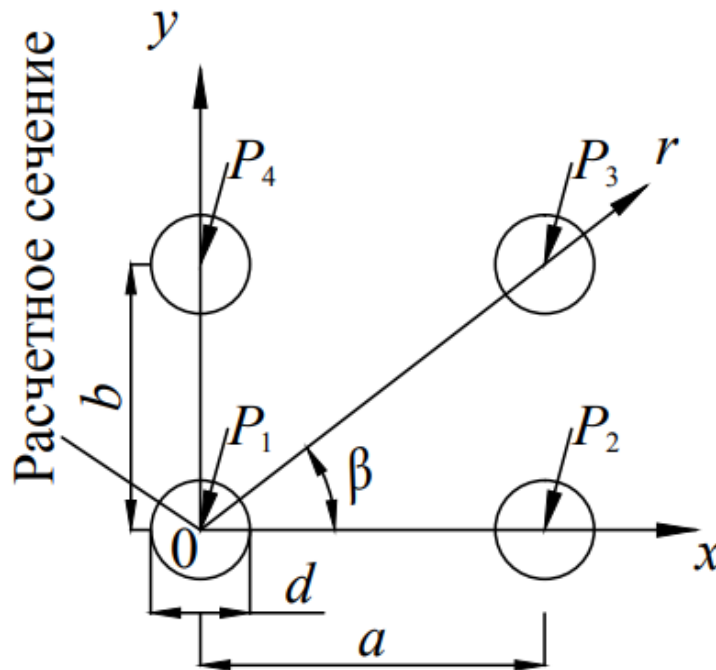


Рисунок 1.9 – Расчетная схема опоры самолета

Изгибающие моменты M_{ri} и $M_{\vartheta i}$ определяются по формулам Б.Г. Коренева [48]:

$$\left. \begin{aligned} M_{ri} &= -\frac{P}{4} \left[V - \frac{1 - \mu_6}{\xi_i} U \right] \\ M_{\vartheta i} &= -\frac{P}{4} \left[\mu_6 V + \frac{1 - \mu_6}{\xi_i} U \right] \\ \xi_i &= 1,41 \frac{r_i}{S} \end{aligned} \right\} \quad (1.18)$$

где r_i – расстояния от рассматриваемого сечения до центров отпечатков других колес;

U и V – функции, значения которых представлены в таблицах [91] в зависимости от ξ_i .

Формулы (1.18) являются решениями уравнения изгиба плиты на упругом основании Фусса – Винклера при центральном загрузении плиты для сосредоточенной нагрузки. Функции U и V выражаются через функции Ганкеля по формулам

$$\begin{aligned} U &= f_0'(\xi) = \left(\operatorname{Re} H_0^{(1)}(\xi \sqrt{i}) \right)'; \\ V &= g_0(\xi) = \operatorname{Im} H_0^{(1)}(\xi \sqrt{i}), \end{aligned} \quad (1.19)$$

где $\operatorname{Re} H_0^{(1)}$, $\operatorname{Im} H_0^{(1)}$ – действительная и мнимая части функции Ганкеля первого рода нулевого порядка [46, 48, 50].

Выражая тригонометрические функции в формуле (1.17) через расстояния колес шасси от расчетного сечения по формулам

$$\left. \begin{aligned} \sin^2 \beta &= \frac{b^2}{a^2 + b^2} \\ \cos^2 \beta &= \frac{a^2}{a^2 + b^2} \end{aligned} \right\}, \quad (1.20)$$

можно вычислить изгибающие моменты в формуле (1.17) непосредственно через координаты колес шасси по формулам

$$\left. \begin{aligned} M_{xi} &= M_{ri} \frac{a_i^2}{a_i^2 + b_i^2} + M_{\vartheta i} \frac{b_i^2}{a_i^2 + b_i^2} \\ M_{yi} &= M_{ri} \frac{b_i^2}{a_i^2 + b_i^2} + M_{\vartheta i} \frac{a_i^2}{a_i^2 + b_i^2} \end{aligned} \right\}, \quad (1.21)$$

где a_i, b_i – координаты i -го колеса в системе координат рис. 1.9 с началом в расчетном сечении.

Нормы [91] допускали также производить расчет изотропных покрытий по методике, рассматривающей грунтовое основание как линейно-деформируемое полупространство. При этом изгибающий момент в покрытии при центральном расположении нагрузки определяется также формулой (1.14), а моменты в сечении под центром отпечатка следа наиболее загруженного колеса под действием этого же колеса определяются по формуле М.И. Горбунова-Посадова [28].

$$M_0 = P(0,0592 - 0,09284 \ln \lambda), \quad (1.22)$$

где $\lambda = \frac{r}{L}$;

r – радиус круга, равновеликого по площади отпечатку пневматика;

P – расчетная нагрузка на одно колесо в т;

L – упругая характеристика плиты, определяемая по формуле

$$L = h \sqrt[3]{\frac{E_6(1 - \mu_0^2)}{6E_0(1 - \mu_6^2)}}, \quad (1.23)$$

E_0 – расчетный модуль деформации грунта;

μ_0, μ_6 – коэффициенты Пуассона для грунта и бетона.

Моменты от действия остальных колес определяются по формулам, использующим решения О.Я. Шехтер [129, 130] задачи о плите неограниченных размеров и составленных ею таблиц безразмерных величин:

$$\left. \begin{aligned} M_{xi} &= P \bar{M}_{xi} \\ M_{yi} &= P \bar{M}_{yi} \end{aligned} \right\} \quad (1.24)$$

где $\bar{M}_{xi}, \bar{M}_{yi}$ – единичные моменты от действия колес, расположенных вне рассматриваемого сечения, значения которых определяются по таблице [91] в зависимости от приведенных расстояний от расчетного сечения.

$$\xi_i = \frac{x_i}{L}; \quad \eta_i = \frac{y_i}{L};$$

x_i, y_i – координаты точки приложения сил, считая за начало координат рассматриваемое сечение.

Коэффициент условий работы в формуле (1.12) учитывает накопление остаточных деформаций в основании покрытий, температурные напряжения и нарастание

тание прочности бетона во времени. Значение коэффициента определяется по формуле [40]

$$m = \frac{W}{W_n} \cdot \frac{R}{R_{28}} \cdot \frac{R_{28} - R_t}{R_{28}}, \quad (1.25)$$

где W – прогиб покрытия при однократном проходе расчетного самолета;

W_n – прогиб покрытия при расчетном числе проходов того же самолета;

R – предел прочности бетона при изгибе к расчетному сроку;

R_{28} – предел прочности бетона на растяжение при изгибе в возрасте 28 суток;

R_t – дополнительные температурные напряжения.

Параметр W_n определялся по эмпирической формуле

$$W_n = W + \alpha \cdot \log N \quad (1.26)$$

где α – коэффициент, характеризующий тип основания и конструкцию покрытия, определяемый опытным путем;

N – число проходов самолета по одному следу.

При определении расчетного числа проходов по одному следу учитывалось отклонение ВС от оси руления. Опытным путем были получены параметры нормального закона распределения отклонений от оси руления. Степушин А.П. [112] в своей работе опубликовал значения статистических параметров отклонения центра масс от оси руления, по которым получена гистограмма, показанная на рис. 1.10.

В [40] приведены экспериментальные кривые по нарастанию прочности бетона во времени, учитываемые при определении коэффициента условий работы. На основании опытных данных были получены значения коэффициентов работы, используемые в формуле (1.12). Для бетонного покрытия в зависимости от участка покрытия приняты следующие значения коэффициента условий работы для аэродромных покрытий, расположенных севернее 50° северной широты:

- 0,8 для магистральных РД;
- 0,9 для остальных участков аэродрома.

Для аэродромов, расположенных южнее 50° северной широты вводился поправочный коэффициент, равный 0,95 для аэродромов, расположенных между 43 и 50° северной широты и 0,9 – южнее 43° северной широты. Поправочный коэффициент учитывал большую температуру воздуха по сравнению расчетной температурой, при которой были определены нормативные значения коэффициента условий работы. Эти значения являются среднестатистическими и не учитывают фактические характеристики ВС, интенсивность эксплуатации и климатические условия.

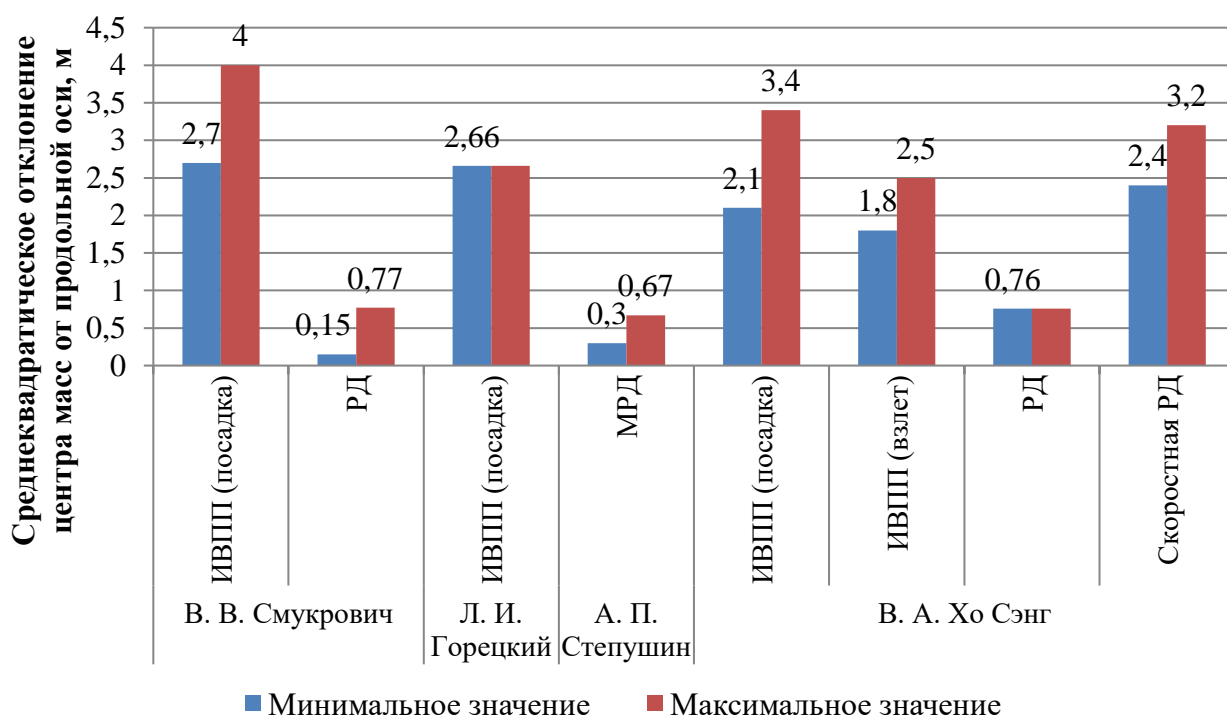


Рисунок 1.10 – Среднеквадратическое отклонение центра масс от оси руления

Коэффициент однородности бетона k_6 в формуле (1.12) был принят равным 0,7. Это значение получено в 1955 году в результате статистической обработки результатов испытаний бетона в лабораториях строящихся объектов Г.Г. Мудровым и Б.П. Антоновым [40].

Дальнейшее развитие отечественных нормативных методов представлено в документе [92]. В Указаниях [92] изменился принцип определения категорий нормативной нагрузки. Вместо взлетного веса и расчетной эквивалентной нагрузки на одно колесо разделение категорий нормативной нагрузки стало выполняться

по величине нагрузки на опору, давлению в пневматиках и типу опоры. Появилось требование рассчитывать аэродромные покрытия, как правило, на нормативную самолетную нагрузку, представленную шестью категориями (см. табл. 1.2).

В [92] также появилась схема деления покрытий аэродрома на группы участков А–Г, в зависимости от которых меняются значения расчетных коэффициентов. Введен учет фактической интенсивности эксплуатации для участков группы А (магистральная РД и концевые участки ВПП по 150 м). Согласно [92] на основаниях из материалов, не обработанных вяжущими, коэффициент условий работы понижается на 10% при интенсивности 2000-4000 рулений расчетного самолета в год и на 20% – при большей интенсивности.

В нормах [92] расчет изгибающих моментов от действия колеса, расположенного за пределами расчетного сечения, упростился за счет использования таблицы предварительно рассчитанных и опубликованных в [92] единичных изгибающих моментов вместо формул (1.17, 1.18).

Таблица 1.2

Категория нормативной нагрузки	Величина нормативной нагрузки на условную опору P_0 в т	Давление в пневматиках q в кг/см ²	Тип опоры
I	70	10	Четырехколесная
II	55	10	
III	40	10	
IV	30	10	
V	8	6	Одноколесная
VI	5	4	

Кроме того, в [92] добавлено требование об исключении рядов колес, дающих в сумме отрицательное значение момента в расчетном сечении при определении расчетного изгибающего момента. Это требование обеспечивает запас прочности жесткого покрытия.

В [95] введены классы аэродрома (А–Е), к которым были привязаны категории нормативной нагрузки. Классу аэродрома А соответствовали категории нормативной нагрузки внекатегорийная (в/к) и I, классу Б – II, В – III и т.д. Типы аэродромных покрытий и требуемые толщины конструктивных слоев надлежало определять в соответствии с установленной категорией нормативной нагрузки. В [95] стал допускаться расчет аэродромных покрытий на ВС конкретного типа. Кроме того, появилась категория нормативной нагрузки в/к, нагрузка на основную опору которой равна 850 кН (85 тс).

В [95] в формулу для определения расчетных изгибающих моментов в плитах однослойных жестких покрытий добавился коэффициент, учитывающий увеличение изгибающего момента в плите вследствие неравномерного накопления остаточных прогибов в основании, и она приобрела вид

$$M_p = M_{\max}^u K K_N \quad (1.27)$$

где M_{\max}^u – максимальный изгибающий момент при центральном нагружении плиты, который вычисляется как наибольший суммарный момент, создаваемый всеми колесами опоры ВС в расчетном сечении плиты; при этом должны исключаться ряды колес, дающие в сумме отрицательное значение изгибающего момента в расчетном сечении;

K – переходный коэффициент от изгибающего момента при центральном нагружении к моменту при краевом нагружении плиты;

K_N – коэффициент, учитывающий увеличение изгибающего момента в плите вследствие неравномерного накопления остаточных прогибов в основании.

В формуле для определения предельного изгибающего момента $M_{пр}$ в [95] появился коэффициент, учитывающий интенсивность приложения колесных нагрузок ВС, и она приняла вид

$$M_{пр} = m R_{пр} \frac{bh^2}{6} k_u \quad (1.28)$$

где m – коэффициент условий работы,

$R_{пр}$ – расчетное сопротивление бетона растяжению при изгибе;

b – расчетная ширина поперечного сечения плиты, принимаемая равной 100 см;

h – толщина плиты;

k_u – коэффициент, учитывающий интенсивность приложения колесных нагрузок от разных типов ВС за проектный срок службы.

Необходимая толщина упрочненного основания бетонных покрытий стала определяться по графикам в зависимости от отношений изгибающих моментов в покрытии $M_p/M_{пр}$ и расчетных сопротивлений растяжению при изгибе материала покрытия и искусственного основания $R_{ри}^п/R_{ри}^{осн}$.

В следующем нормативном документе [93] произошел переход на систему единиц измерения СИ, а также добавилась схема деления аэродромных покрытий на группы участков для аэродромов, на которых руление осуществляется по ИВПШ. Изменились обозначения расчетных параметров, которые мы будем использовать в дальнейшем изложении, т.к. они с 1985 года не изменились.

В новых обозначениях условие прочности бетонного покрытия имеет вид [93]

$$m_d \leq m_u, \quad (1.29)$$

где m_d, m_u – расчетный и предельный изгибающие моменты в рассматриваемом сечении плиты.

Следует отметить, что в этом условии не определено, насколько предельный изгибающий момент может быть больше расчетного. В данной работе условие (1.29) дополнено условием

$$\frac{m_u - m_d}{m_u} \leq \delta, \quad (1.30)$$

где δ – допустимое относительное недонапряжение конструкции.

Кроме того, изменилась методика расчета бетонного покрытия на упрочненном основании. Для однослойного бетонного покрытия расчетный изгибающий момент согласно [93] определяется по формуле

$$m_d = \frac{B}{B + B_f} m_{c,max} k \rho, \quad (1.31)$$

где B, B_f – жесткости плиты однослойного покрытия и упрочненного основания, отнесенные к единице ширины ее сечения;

$m_{c,max}$ – максимальный изгибающий момент при центральном нагружении плиты;

k – переходный коэффициент от изгибающего момента при центральном нагружении к моменту при краевом нагружении;

ρ – коэффициент, определяемый в зависимости от отношения $\frac{B}{B_f}$.

Предельный изгибающий момент вычисляется по формуле, аналогичной (1.28), но из-за перехода на систему единиц СИ она имеет вид [93]:

$$m_u = \gamma_c R_{tb} \frac{t^2}{6} k_u, \quad (1.32)$$

где γ_c – коэффициент условий работы;

R_{tb} – расчетное сопротивление бетона растяжению при изгибе;

t – толщина плиты.

В [93] появилось требование для грунтового основания из просадочных грунтов проверять условие:

$$\sigma_{zp} + \sigma_{zg} \leq p_{sc}, \quad (1.33)$$

где σ_{zp} – вертикальное сжимающее напряжение в грунте от эксплуатационной нагрузки;

σ_{zg} – вертикальное сжимающее напряжение от собственного веса грунта и аэродромного покрытия;

p_{sc} – предельно допустимое давление на грунт, при котором в грунтовом основании отсутствуют деформации сдвига.

При невыполнении этого условия необходимо выполнять мероприятия по устранению просадочных свойств грунтов. Это требование содержится в последующих нормах.

В нормах [94] отсутствует методика расчета аэродромных покрытий, но появилось требование представлять данные о прочности покрытий аэродромов классификационными числами покрытий (PCN). Согласно [94], расчеты покрытий аэродромов на прочность выполняются в соответствии со Сводом правил (СП) по проектированию и строительству аэродромов. Предполагалось, что в дополнение

к [94] будет разработан такой СП. Но этого не произошло, и с 1996 до 2012 года в качестве СП использовались нормы [93].

Нормы расчета прочности бетонных аэродромных покрытий [93] вошли в последние нормативные документы [96, 97] без существенных изменений.

В настоящее время в действующих нормах [97] при проектировании расчет требуется выполнять на конкретные типы ВС, но в СП [97] остались требования, связанные с нормативными нагрузками, приведенными в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Категория нормативной нагрузки для аэродромов	Нормативная нагрузка F_n , на основную (условную) опору самолета, кН	Внутреннее давление воздуха в пневматиках колес p_a , МПа	Основная опора
в/к	850	1,0	
I	700		
II	550		
III	400		
IV	300		
V	80		
VI	50	0,4	

Приведем некоторые из них для жестких покрытий.

1. Для покрытий, рассчитанных на в/к нагрузку, минимальный класс по прочности бетона на растяжение при изгибе должен быть не ниже $B_{тб} 4,4$, по прочности на сжатие – не ниже В35.

2. При усилении цементобетонных покрытий общая минимальная толщина асфальтобетонных слоев нормируется в зависимости от среднемесячной температуры воздуха наиболее холодного месяца, вида участков аэродрома и категории нормативной нагрузки.

3. При расчете эквивалентного коэффициента постели используется условный диаметр круга передачи нагрузки на основание, принимаемый в зависимости

от категории нормативной нагрузки. Значение диаметра изменяется от 3,6 м для в/к до 2,2 м для VI категории.

4. При теплотехническом расчете термоизоляционного слоя искусственного покрытия на вечномёрзлом грунте вводятся поправки к температуре воздуха и значению среднемесячной радиации в зависимости от категории нормативной нагрузки.

5. В требованиях к грунтам и смесям в искусственных основаниях пределы прочности при сжатии и прочности на растяжение при изгибе водонасыщенных образцов нормируется в зависимости от категории нормативной нагрузки.

Для учета этих требований необходимо определять категорию нормативной нагрузки в зависимости от эксплуатируемых на аэродроме ВС. В настоящее время это вызывает затруднения из-за необходимости установления категории нормативной нагрузки для эксплуатируемых на аэродроме типов ВС, основные опоры которых существенно отличаются от нормативных опор.

1.4 Анализ существующих методов оценки несущей способности бетонных аэродромных покрытий

1.4.1 Метод оценки Международной организации гражданской авиации ИКАО

В настоящее время странами – членами Международной организации гражданской авиации (ИКАО) используется единый международный метод представления данных о несущей способности аэродромных покрытий и нагрузках, позволяющий оценить возможность эксплуатации покрытий воздушными судами. Метод называется ACN–PCN [4, 74]. Принцип оценки заключается в представлении данных о нагрузке на покрытие от ВС в виде кода ACN, данных о несущей способности покрытия в виде кода PCN. Режим эксплуатации покрытия ВС определяется сопоставлением кода ACN и PCN.

Коды ACN предоставляют производители ВС и публикуют в специальных справочниках. Коды PCN определяются для каждого элемента аэродрома в зависимости от конструкции и технического состояния поверхности. Код PCN состоит из следующих позиций:

- классификационное число;
- тип покрытия;
- категория прочности основания;
- код допустимого давления в пневматиках колес основной опоры;
- код метода определения несущей способности (техническая оценка или оценка по опыту эксплуатации).

Классификационное число покрытия (PCN) характеризует прочность (несущую способность) покрытия в соответствии с требованиями Международной организации гражданской авиации ИКАО [74].

В методе ACN–PCN рассчитывается классификационное число покрытия и категория прочности основания и сравнивается с классификационным числом воздушного судна, эксплуатирующего покрытие, при одной и той же категории прочности основания. Условие возможности эксплуатации покрытия воздушным судном без ограничений имеет вид

$$ACN \leq PCN, \quad (1.34)$$

где ACN – классификационное число воздушного судна;

PCN – классификационное число покрытия

с учетом ограничений на давление в пневматике [37, 74].

В методике [74] классификационное число ACN равно удвоенной приведенной одноколесной нагрузке с давлением в пневматике колеса 1,25 МПа, эквивалентной по силовому воздействию основной опоре ВС.

Классификационное число покрытия PCN равно удвоенной величине допустимой нагрузки на покрытие от такой же одноколесной нагрузки при неограниченной повторности нагружения. При расчете классификационных чисел ACN и PCN величина нагрузки выражается в тоннах.

1.4.2 Метод оценки Российской Федерации

В России для оценки возможности эксплуатации аэродромных покрытий ВС с 1980 также используется метод ACN–PCN в соответствии с требованиями нормативных документов [58, 59, 75]. В настоящее время основным нормативным документом, в соответствии с которым выполняется оценка несущей способности аэродромных покрытий, является ФАП 262 [122]. Согласно [122] для ИВПП, перрона и мест стоянок должна быть объявлена несущая способность искусственных покрытий по методу «Классификационное число воздушного судна – классификационное число покрытия» (ACN–PCN).

Нормами [122] допускается указывать значения PCN, применение которых ограничено конкретным сезоном года.

Согласно [122] ВС могут эксплуатироваться без ограничения массы и/или интенсивности при выполнении условия (1.34). При невыполнении этого условия вводятся ограничения по интенсивности движения на жестких покрытиях:

при $1 > PCN/ACN \geq 0,85$ десять самолетовылетов в сутки;

при $0,85 > PCN/ACN \geq 0,8$ два самолетовылета в сутки;

при $0,8 > PCN/ACN \geq 0,75$ один самолетовылет в сутки;

при $0,75 > PCN/ACN \geq 0,66$ два самолетовылета в неделю;

при $0,66 > PCN/ACN \geq 0,6$ один самолетовылет в неделю.

Если эти ограничения невыполнимы или неэффективны для авиакомпании, могут быть введены ограничения по массе для неограниченной интенсивности или с учетом вышеуказанных ограничений по формуле

$$m_{\text{доп}} = m_1 - \frac{(m_1 - m_2)(ACN_1 - ACN_{\text{доп}})}{ACN_1 - ACN_2}, \quad (1.35)$$

где $m_{\text{доп}}$ – максимально допустимая масса эксплуатируемого ВС;

m_1 – максимальная взлетная масса ВС;

m_2 – масса пустого ВС;

ACN_1 – классификационное число ВС, соответствующее максимальной взлетной массе;

ACN_2 – классификационное число ВС, соответствующее массе пустого ВС;

$ACN_{\text{доп}}$ – допустимое значение классификационного числа ВС.

Исходными данными для расчета классификационного числа PCN могут быть проектные и нормативные данные, а также результаты обследования и испытаний аэродромных покрытий.

При определении классификационного числа PCN используются все критерии для рассчитываемого типа покрытия. Оценка несущей способности принимается равной допустимой величине нагрузки на покрытие по всем критериям. Расчетным критерием для оценки несущей способности бетонных покрытий является условие прочности (1.29).

Техническая оценка несущей способности бетонных покрытий отечественным методом заключается в определении нагрузки F_n на четырехколесную основную (условную) опору, характеристики которой показаны в табл. 1.3, удовлетворяющей условию (1.29). Процедура определения допустимой нагрузки является обратной к поиску допустимых значений толщин конструктивных слоев при проектировании и выполняется в соответствии с [97]. При этом коэффициент k_u , учитывающий интенсивность приложения нагрузок, принимается равным 1, что соответствует 1000000 приложений нагрузок за срок службы 20 лет или 50000 – в год.

Классификационное число бетонного покрытия PCN определяется в зависимости от допустимой нагрузки F_n и категории прочности основания, определяемой по табл. 1.4. Для этого по стандартной программе ИКАО [74] были вычислены значения классификационного числа ACN для каждого кода основания и нагрузки F_n с шагом 50 кН. Эти значения ACN , приведенные в табл. 1.5, используются в качестве классификационного числа PCN.

Таблица 1.4

Код основания	Категория прочности основания	Коэффициенты постели оснований жестких покрытий K_{se} , МН/м ³
А	Высокая	$K_{se} > 120$
В	Средняя	$60 < K_{se} \leq 120$
С	Низкая	$25 < K_{se} \leq 60$
Д	Очень низкая	$K_{se} \leq 25$

Таблица 1.5

F_n , кН	Код основания			
	А	В	С	Д
	Классификационное число покрытия PCN			
50	3	3	3	3
100	5	5	5	6
150	7	7	8	9
200	10	10	12	14
250	12	13	16	18
300	14	17	20	23
350	17	20	24	28
400	20	24	29	34
450	24	29	34	40
500	28	33	40	46
550	32	38	45	52
600	36	43	51	58
650	40	49	57	65
700	45	54	64	71
750	50	60	70	78
800	55	66	77	85
850	60	72	84	93

Таким образом, при определении кода PCN в качестве расчетной нагрузки используется нормативная четырехколесная опора, характеристики которой не соответствуют характеристикам фактически эксплуатируемых ВС.

1.4.3 Метод оценки несущей способности бетонного покрытия по результатам испытаний, принятый в Польше

В статьях [82, 149] приведено описание метода определения модулей упругости жестких покрытий, используемого в Польше. Метод основан на использовании ударного дефлектометра, создающего нагрузку на покрытие с помощью нагрузочной пластины. Упругие прогибы аэродромного покрытия измеряются под действием динамической нагрузки от падения веса определенного значения на нагрузочную пластину, лежащую на испытываемом покрытии. Во время падения значение нагрузки колеблется от 30 до 240 кН в зависимости от типа конструкции покрытия, а время одного удара колеблется от 0,025 до 0,03 с. При этом преобразованное элементарное давление на грунтовое основание составляет примерно 1,25 МПа. Во время измерения девять сейсмографов, установленных на полосе измерения и центрально под нагрузочной пластиной, записывают прогибы u_i испытываемого покрытия. Максимальное расстояние от точки измерения до центра нагрузочной пластины составляет 2,5 м. В результате измеряется чаша прогиба поверхности испытываемой конструкции. На основе полученной чаши прогиба и известных значений толщин слоев конструкции, а также характеристик материалов, из которых они сделаны, определяются модули упругости отдельных слоев. Схема измерений чаши прогиба поверхности, позаимствованная из [149], приведена на рис. 1.11.

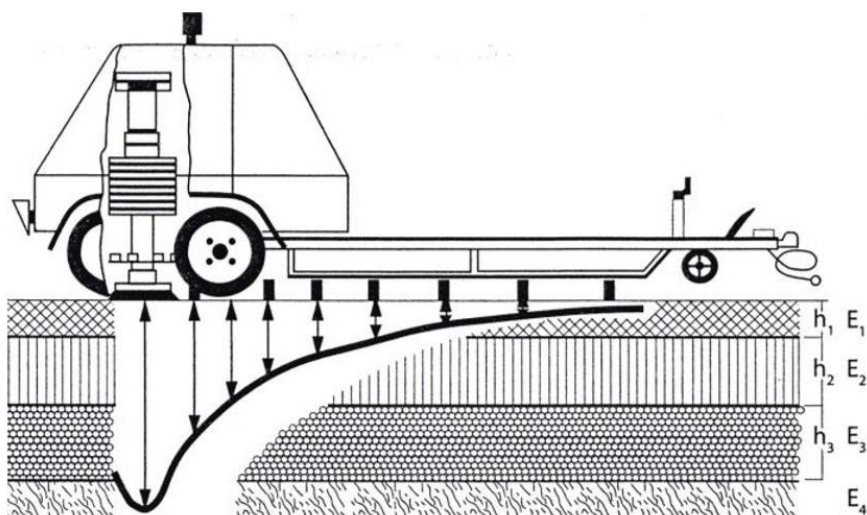


Рисунок 1.11 – Схема измерений чаши прогиба тяжелым ударным дефлектометром

Модули упругости поверхности в зависимости от расстояния между сейсмографами и центром нагрузочной пластины определяются по следующим формулам [149]:

$$E_0(0) = \frac{2(1 - \nu^2) \cdot q \cdot a}{u(0)}; \quad (1.36)$$

$$E_0(r) = \frac{2(1 - \nu^2) \cdot q \cdot a^2}{r \cdot u(r)}, \quad (1.37)$$

где $E_0(0)$ – модуль упругости поверхности под нагрузочной пластиной;

$E_0(r)$ – модуль упругости поверхности на расстоянии r от центра нагрузочной пластины;

a – радиус пластины;

ν – коэффициент Пуассона;

u – прогиб в испытываемой точке (0 – под нагрузочной пластиной);

q – напряжение под нагрузочной пластиной.

Для исследования прочности грунтового основания пластина диаметром 0,76 м загружается такой силой, что получается ее перемещение 1,25 мм. Отношение измеренной силы к перемещению является коэффициентом постели грун-

тового основания. Этот метод используется, в частности, в США, Франции и Канаде.

1.4.4 Метод оценки несущей способности бетонных покрытий в США

Процедура Федерального управления авиации США по расчету PCN приводится в его Рекомендательном циркуляре [136]. В процедуре выполняется оценка PCN для расчетной толщины покрытия и учитывается движение всех ВС с точки зрения состава парка, выполняющего полеты с объекта. Фактическое вычисление ACN–PCN основано на программе COMFAA версии 3.0, разработанной Федеральным управлением авиации.

Программа COMFAA получает оценку толщины покрытия из графиков, представленных в Рекомендательном циркуляре Федерального управления авиации [134], которые основаны на уравнениях Вестергаарда для жестких покрытий.

С достижениями в области вычислительной техники также развивались новые методологии проектирования покрытий, а именно механико-эмпирический подход к проектированию, основанный на расчете методом конечных элементов для жестких покрытий. Федеральное управление авиации в своем Рекомендательном циркуляре [135] представило руководящие принципы использования этой методологии для проектирования аэродромных покрытий. Так как методы проектирования могут моделировать и рассчитывать конструкции покрытий более точно, они обеспечивают более эффективный расчет толщины покрытия. Федеральное управление авиации предоставило программное обеспечение FAARFIELD вместе с Рекомендательным циркуляром [135]. Как приведено в [148], проектные толщины, вычисленные программным обеспечением FAARFIELD для жестких аэродромных покрытий, отличаются от толщин, рассчитанных программным обеспечением COMFAA, хотя и сравнимы, благодаря калибровке программного обеспечения FAARFIELD. Таким образом, представление PCN, основанное на COMFAA, не соответствует по принципу проектирования и, следовательно, расчетным толщинам, вычисленным FAARFIELD или любым другим программным

обеспечением, применяющим механико-эмпирические методы. Хотя в FAARFIELD была произведена калибровка, чтобы иметь сопоставимую толщину, по существу принцип и методология проектирования расходятся между программным обеспечением COMFAA и FAARFIELD.

Усталостные эффекты учитываются в процессе проектирования с помощью увеличения толщины плиты для увеличенного количества повторений нагрузки. Повторения нагрузки выражаются в полных нагружениях. Для жестких покрытий полные нагружения равняются количеству раз, которое плита покрытия испытывает максимальное приложение усилия в связи с производимым движением ВС. Одно полное нагружение происходит, когда каждая точка покрытия в пределах полосы движения испытала максимальное напряжение, при этом принимается, что напряжение одинаковое под всем отпечатком пневматика. Каждый проход (P) ВС может быть сконвертирован в полные нагружения (C) с помощью коэффициента отношения проходов к полным нагружениям, расчет которого разработан исходя из нормального распределения и с применением стандартных статистических методов. Годовые вылеты конвертируются в полные нагружения исходя из 20-летнего проектного срока службы. Полные нагружения определяются путем умножения годовых вылетов на 20 и деления результата на коэффициент отношения проходов к полным нагружениям.

Отношение проходов к полным нагружениям (P/C) является величиной, обратной к вероятности того, что любая часть рабочей ширины шины накроет центральную точку заданной полосы (C/P). Для жестких покрытий принимается, что критической поверхностью является поверхность контакта покрытия, и рабочая ширина шины поэтому является номинальной шириной шины W_t . Если ширина шины неизвестна, её можно определить по формуле [145]:

$$W_t = 0,878 \cdot \sqrt{\frac{L}{p}}; \quad (1.38)$$

где W_t – рабочая ширина шины, м;

L – нагрузка на колесо, кН;

p – давление в пневматике, кПа.

Поверхность покрытия разделяется на 81 продольную полосу, и C/P вычисляется для каждой полосы по формуле

$$(C/P)_i = \sum_{k=1}^{N_t} P \left[\left(x_i - \frac{W_t}{2} \right) \leq x_k \leq \left(x_i + \frac{W_t}{2} \right) \right]; \quad (1.39)$$

где N_t – количество колес на опоре;

x_i – поперечное расстояние от продольной линии отсчета (например, осевой линии ВПП или РД) до середины полосы i ;

x_k – поперечное расстояние от той же самой линии отсчета до середины шины k .

Расчет отношения P/C производится в следующем порядке [142].

1. Определяется самое заднее колесо в каждой tandemной группе. Колесо считается принадлежащим к tandemной группе, если его центр находится в пределах ширины заднего колеса.

2. Для каждого заднего колеса определяется количество колес в tandemе, связанных с этим колесом.

3. Вычисляется tandemное расстояние (база) для каждой пары колес в tandemе.

4. Вычисляется tandemный коэффициент F_{tnd} для каждого заднего колеса. Tandемный коэффициент зависит от количества колес в группе и tandemного расстояния.

- Для tandemных расстояний меньших или равных 72 дюймам принимается коэффициент 1.
- Для tandemных расстояний более 72 дюймов принимается коэффициент 2.
- Для групп из трех и более шин в tandemе tandemный коэффициент равняется N , где N – количество шин в tandemе. Это действует только для случаев, где tandemное расстояние между всеми парами шин более 72 дюймов.

- Когда есть n пар шин с тандемным расстоянием меньшим или равным 72 дюймов, тандемный коэффициент равен $N - n$.

5. Вычисляется отношение полных нагрузений к проходам (C/P) путем определения площади под кривой нормального распределения движения между границами рабочей ширины шины по формуле

$$(C/P) = C_{XC} \times W_t, \quad (1.40)$$

где C_{XC} – максимальная ордината кривой нормального распределения движения, определяемая по графику рис. 1.12 [144],

W_t – рабочая ширина шины, дюйм.

6. Тандемный коэффициент F_{tnd} умножается на отношение C/P :
 $(C/P)_{final} = (C/P) \times F_{tnd}$.

7. Вычисляется отношение проходов к полным нагрузениям:

$$P/C = \frac{1}{(C/P)_{final}}. \quad (1.41)$$

Вычисленное значение P/C учитывается при оценке несущей способности бетонного покрытия классификационным числом PCN. Расчеты, необходимые для определения PCN, выполняются для одного ВС одновременно.

В методе оценки несущей способности Федерального управления авиации, как и при проектировании, весь состав парка ВС объединяется в эквивалентные годовые вылеты одного ВС. Для определения эквивалентных годовых вылетов данного ВС используется метод коэффициента накопленного повреждения (CDF), основанный на правиле Майнера.

Согласно данному правилу повреждение покрытия пропорционально количеству приложений нагрузки, разделенному на количество приложений нагрузки, требуемое для разрушения покрытия. При расчете PCN CDF каждого ВС равен количеству его полных нагрузений за 20 лет C_{CNV} , разделенному на количество полных нагрузений для разрушения C_{CNVF} . Модель разрушения для жестких покрытий – краевой случай метода Вестергаарда.

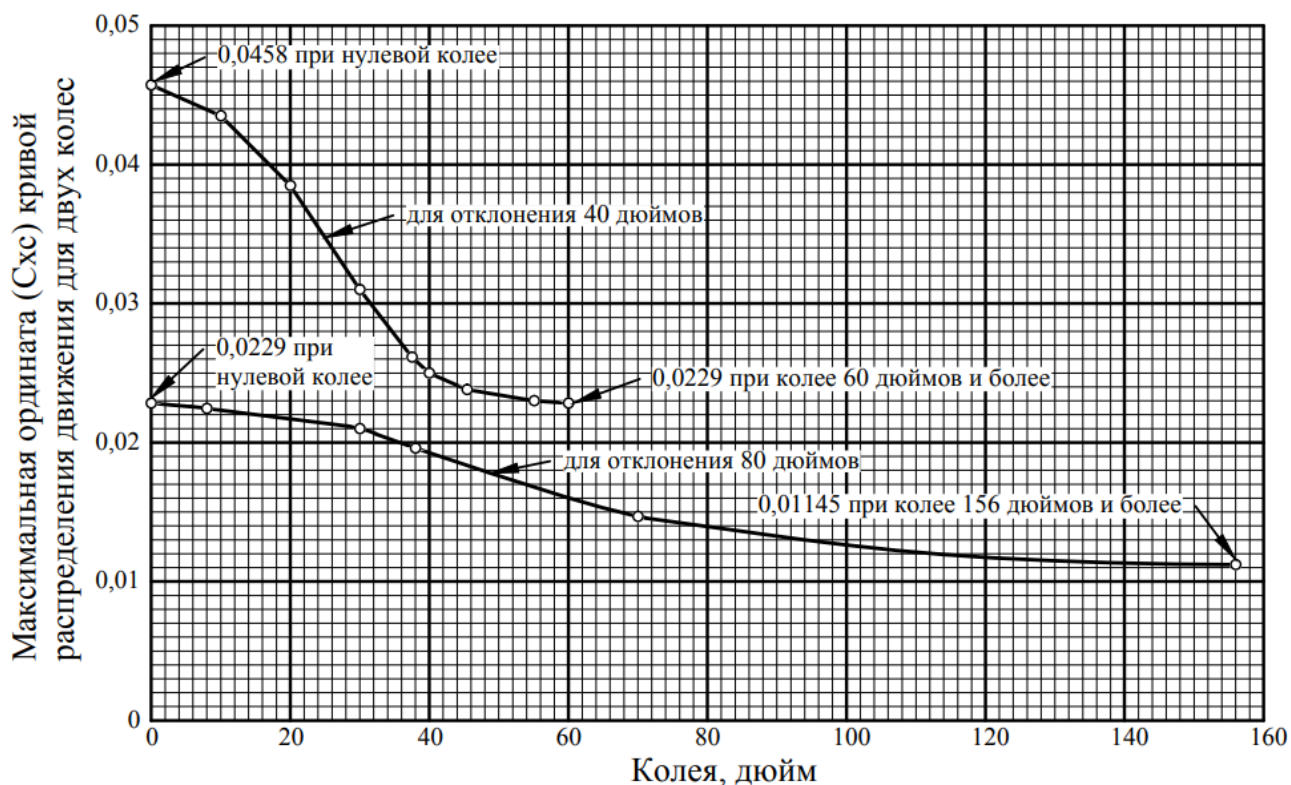


Рисунок 1.12 – Максимальная ордината кривой распределения движения для двух колес в зависимости от колеи

$$CDF_{CNV} = \frac{C_{CNV}}{C_{CNVF}}, \quad (1.42)$$

где CDF_{CNV} – коэффициент накопленного повреждения от количества приложенных нагрузки конвертируемого ВС.

Каждое ВС рассматривается как критическое и оценивается с использованием эквивалентного количества полных нагружений всех остальных ВС. Эквивалентное количество полных нагружений $C_{CRTETotal}$ вычисляется путем умножения количества полных нагружений для разрушения каждого отдельного критического ВС на сумму CDF всех ВС в составе парка. Общая сумма определяет эквивалентное количество полных нагружений и является различной для каждого ВС.

$$C_{CRTETotal} = C_{CRTF} \sum_{I=1}^N CDF_{CNVI}, \quad (1.43)$$

где N – общее количество ВС, включая критическое.

Для полученного эквивалентного количества полных нагрузений критического ВС определяется максимально допустимый вес.

Затем определяется толщина покрытия для определения ACN при максимально допустимом весе для заданной категории прочности грунтового основания и соответствующее этой толщине ACN, которое принимается равным PCN при данном критическом ВС.

Все ВС из состава по очереди принимаются критическими и расчет повторяется. Итоговое число PCN принимается равным самому большому значению.

Для суммарного эквивалентного количества полных нагрузений каждого ВС можно рассчитать толщину покрытия. Если требуемая толщина для всех ВС в составе меньше, чем фактическая толщина покрытия, покрытие может выдержать все движение, и итоговое PCN должно быть больше, чем самые большие значения ACN. В противном случае PCN будет меньше некоторых значений ACN воздушных судов, для которых потребуются ограничения.

В качестве значения PCN принимается собственно ACN ВС при его максимально допустимом весе, который является показателем настоящей несущей способности покрытия.

Для жестких покрытий методологию COMFAA можно резюмировать следующим образом:

1. Определяется интенсивность движения с точки зрения ежегодных вылетов каждого ВС и коэффициент постели (k) грунтового основания.
2. Вычисляется значение k непосредственно под слоем бетона на портландцементе, основанное на конструкции покрытия и значении k грунтового основания.
3. Определяется толщина бетонной плиты и значение k непосредственно под слоем бетона на портландцементе с учетом ежегодных вылетов и отношения проходов к взлетно-посадочным операциям. Программа вычисляет общее количество эквивалентных полных нагрузений в течение 20-летнего срока службы, взяв поочередно каждое ВС в качестве критического ВС (вычисленная толщина основана на методе Ассоциации портландцемента или методе Федерального управле-

ния авиации, а также на расчете краевого нагружения Вестергаарда, при этом выбор остается за пользователем).

4. Программа вычисляет соответствующую расчетную толщину при максимальном взлетном весе для эквивалентного количества полных нагружений каждого ВС.

5. Теперь, учитывая преобразованную оцениваемую толщину, программа вычисляет максимально допустимый вес ВС для того же эквивалентного количества полных нагружений.

6. ACN каждого ВС при расчетном максимально допустимом весе и соответствующей ИКАО стандартной категории прочности основания рассчитывается для 10000 полных нагружений и представляется в виде численного значения PCN.

7. PCN для покрытия представляется как самое большое числовое значение PCN, вычисленное в приведенных выше шагах для конкретной категории грунтового основания.

1.4.5 Метод оценки несущей способности покрытий в Нидерландах

Для государств или отдельных управлений гражданских аэропортов технические значения PCN часто определяются как расширение существующих национальных технологий проектирования и оценки покрытий. Вследствие этого технические значения PCN могут варьировать в зависимости от используемого метода оценки.

Из [146], для того, чтобы согласовать и получить сопоставимые и воспроизводимые PCN, координационный комитет по аэродромным покрытиям Информационно-технологического центра транспорта и инфраструктуры (CROW) разработал «Руководство по определению PCN» [138], которое нормирует оценку конструкций жестких покрытий. Руководство должно использоваться для определения PCN с помощью технической оценки покрытий гражданских аэропортов на

национальном уровне. Это руководство содержит процедуры для расчета технического PCN во всех подробностях.

Основой для определения PCN в Руководстве является порядок, обратный проектированию покрытия.

Нидерландское Руководство требует использования конкретного программного обеспечения, способного выполнять линейный упругий анализ, используя жесткие многослойные теории проектирования. Как показано в Руководстве, только программа Paviers® пригодна для использования при определении PCN жестких покрытий, так как только Paviers® осуществила многослойную модель жесткого покрытия. Последняя является необходимой при оценке PCN для покрытий с упрочненным основанием.

Paviers® была разработана в рамках методики оценки аэродромного покрытия Нидерландского министерства обороны. Разработчики, д-р Ф. Ван Ковелер, Х.П.М. Тевессен и М. Стет объединились, усовершенствовали и расширили несколько моделей, создали набор инструментов и внедрили их в последние версии Paviers®. Программа также является патентованным средством. Средство не требует определенной методики проектирования, но позволяет инженеру по покрытиям определять или использовать выверенные критерии отказа в работе для всех материалов покрытия. Если существуют усталостные зависимости этих материалов, то эта информация может быть без проблем введена в одну из подпрограмм программы. Следовательно, можно быстро изучить влияние различных материалов покрытия, прочностей, нагрузок или сложных сочетаний нагрузок. Программа может поддерживать нидерландское Руководство по определению PCN. Paviers® использует аналитические целочисленные решения, чтобы моделировать многослойные бетонные плиты на грунтовом основании как классическую плиту Вестергаарда на основании Пастернака. Эта модель преодолевает классическое расхождение между моделью Вестергаарда – Винклера (со швами) и многослойной упругой моделью Бурмистера (без швов). Основание Пастернака было выбрано в качестве привлекательной альтернативы классическому основанию Винклера. Введение горизонтальной связи, модуля сдвига Пастернака, в модель Винклера

является средством защиты от расхождений между теорией Вестергаарда и многослойной теорией, в то время как большие преимущества модели Вестергаарда (краевое и угловое нагружение) сохраняются (при нулевом модуле сдвига получается классическое основание Винклера).

Многослойная модель представляет собой классическую линейную упругую многослойную конструкцию Бурмистера. Слои являются изотропными, за исключением нижнего слоя, где анизотропность учитывается различными модулями в горизонтальном и вертикальном направлении. Поверхность контакта между двумя соседними слоями можно изменять от полного сцепления до полного скольжения.

Посредством использования аналитических решений, можно рассчитать реакцию от нескольких нагрузок, расположенных в любом месте плиты, что позволяет преодолеть концепцию эквивалентной одноколесной нагрузки для жестких покрытий, которая может считаться одним из основных недостатков модели Вестергаарда. Уникальный алгоритм жесткой модели программы Pavers® позволяет рационально учитывать вариативное боковое отклонение ВС, исключая концепцию отношения проходов и повторений нагрузки.

1.5 Выводы и задачи работы

Выполненный в данной главе анализ существующих методов оценки несущей способности жестких аэродромных покрытий позволяет сделать следующие выводы:

1. В действующих в России нормативных документах по проектированию жестких аэродромных покрытий используется модель плиты на упругом основании Винклера. Эта модель также рекомендована при эксплуатационной оценке несущей способности бетонных аэродромных покрытий Международной организацией ИКАО.

2. В настоящее время странами – членами ИКАО используется единый метод представления данных о несущей способности аэродромных покрытий и

нагрузках – метод ACN–PCN, заключающийся в сопоставлении классификационного числа воздушного судна ACN с классификационным числом аэродромного покрытия PCN. Отличие использования метода разными странами заключается в методах определения допустимой нагрузки.

3. Существует два подхода к определению допустимой нагрузки: детерминированный и вероятностный. Детерминированный метод изложен в нормативных документах и использует исходные данные, полученные путем обобщения многолетнего опыта проектирования и эксплуатации конструкций. При вероятностном подходе оценка несущей способности может быть выполнена методом статистического моделирования Монте-Карло на основе статистических данных.

4. Оценка несущей способности выполняется на стадии эксплуатации аэродромных покрытий, характеристики которых отличаются от проектных из-за воздействия на них нагрузок от ВС, климатических и эксплуатационных факторов. Эти характеристики являются случайными величинами, поэтому при оценке наиболее адекватна вероятностная модель, основанная на статистических данных, полученных при исследовании конструкций.

5. В настоящее время в отечественной практике оценки несущей способности аэродромных покрытий для расчета допустимой нагрузки используется нормативная четырехколесная опора с давлением в пневматиках колес 1 МПа, что не соответствует характеристикам опор большинства современных ВС.

Для разработки метода оценки несущей способности жестких аэродромных покрытий, наиболее адекватно учитывающего характеристики эксплуатируемых ВС и конструкции, необходимо решение следующих задач:

- анализ характеристик опор ВС, эксплуатирующих в настоящее время жесткие аэродромные покрытия;
- разработка новой методики классификации ВС на основе существующей классификации по категориям нормативной нагрузки с учетом воздействия современных типов ВС на жесткие аэродромные покрытия;

- исследование воздействия современных ВС на грунтовые основания с целью уточнения критериев предельного состояния бетонных аэродромных покрытий;
- разработка методик планирования и обработки результатов испытаний бетонных и армобетонных аэродромных покрытий для определения статистических характеристик их напряженно-деформированного состояния;
- разработка метода статистического моделирования допустимой нагрузки на бетонное и армобетонное аэродромное покрытие на основе полученных при испытаниях статистических характеристик;
- разработка компьютерных программ для планирования и обработки результатов испытаний жестких аэродромных покрытий; определения допустимой нагрузки с использованием метода статистического моделирования Монте-Карло.

Глава 2 Исследование нагрузок от воздушных судов на аэродромные покрытия и грунтовые основания

2.1 Характеристики воздушных судов, эксплуатирующих в настоящее время жесткие аэродромные покрытия

Основными нагрузками на аэродромные покрытия являются опоры ВС, эксплуатирующих аэродром. На аэродроме одновременно выполняют взлеты, посадки и руления различные типы ВС с разной интенсивностью. При развитии норм проектирования аэродромных покрытий менялись принципы учета состава движения на аэродроме. В первой главе выполнен анализ учета нагрузок от ВС в отечественных нормах категориями нормативной нагрузки. Требование расчета конструкций аэродромных покрытий на нормативную опору сохранялось до ввода в действие норм [96]. Для учета характеристик современных ВС в нормах [96] его заменили требованием: «Аэродромные покрытия, как правило, следует рассчитывать на воздействие нагрузок от ВС конкретного типа. Допускается проводить расчет на нормативные нагрузки».

Использование нагрузок от ВС конкретного типа при расчете прочности аэродромных покрытий используется и зарубежными странами – членами Международной организации ИКАО [74].

В действующем СП [97] характеристики ВС представлены семью категориями нормативной нагрузки (КНН), которые приведены в табл. 1.3. Эта таблица повторяет практически без изменений параметры нормативных нагрузок, опубликованные в 1970 году в [92]. В СНиП [95] добавилась только строка с категорией в/к.

Вместе с тем, с 1980 года полностью поменялся парк ВС. Как показано в статье [78], современные ВС отличаются большим разнообразием основных опор с количеством колес от одного до шести и более. Давление воздуха в пневматиках колес ВС достигает 1,5-1,6 МПа. Действующие КНН не могут представлять парк современных ВС.

Для исследования расчетных характеристик современных ВС был выполнен анализ расписания вылетов всех типов ВС из аэропортов: Казань, Красноярск (Емельяново), Магадан (Сокол), Минеральные Воды и других, показанных на рис. 2.1.

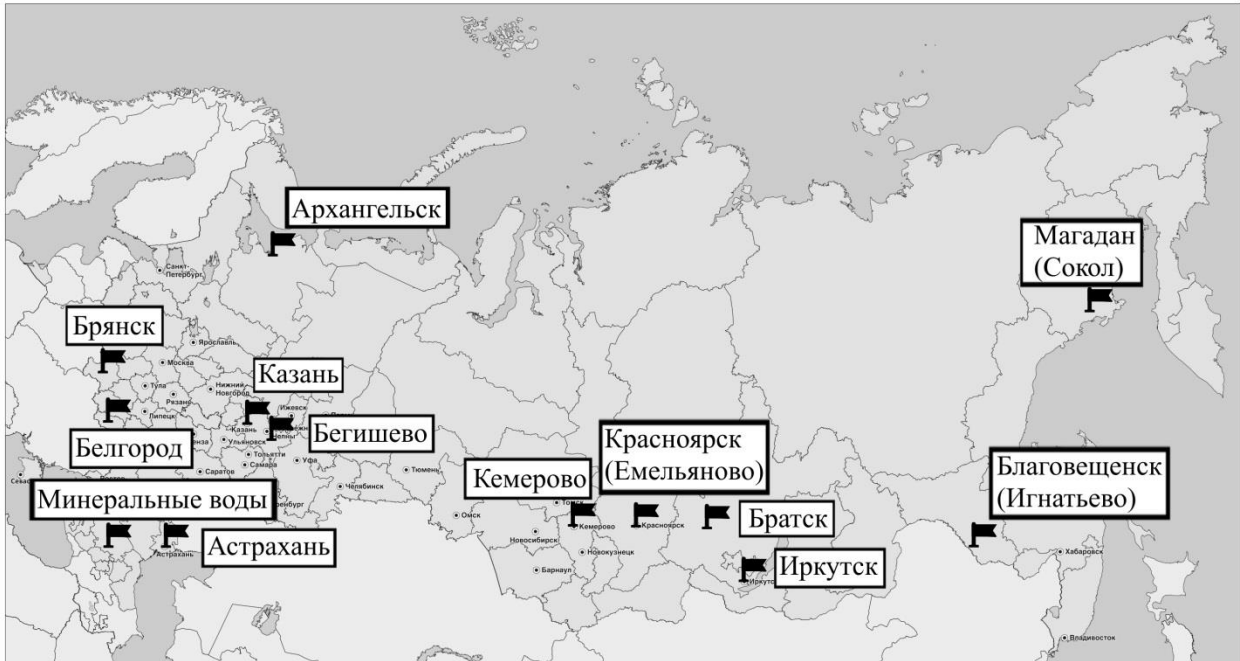


Рисунок 2.1 – Расположение исследуемых аэропортов

В приложении Б представлены диаграммы распределения интенсивностей взлетно-посадочных операций (ВПО) всех эксплуатируемых типов ВС для каждого аэродрома.

На рис. 2.2 показано распределение типов ВС, эксплуатирующих исследованные аэродромы, по числу колес на основной опоре. Как видно, более 90% опор имеют два колеса. Это не отражено в СП [97].

На рис. 2.3 показана гистограмма давлений в пневматиках ВС, эксплуатирующихся на всех рассмотренных аэродромах. Как видно, давление в пневматиках современных ВС значительно отличается от давления опор КНН.

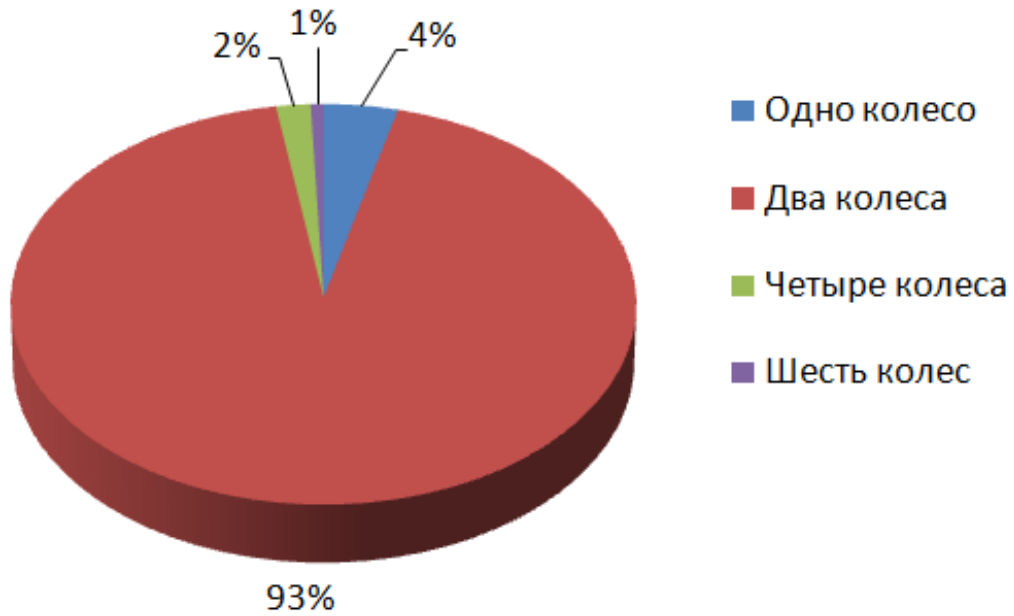


Рисунок 2.2 – Распределение типов ВС по числу колес на основной опоре

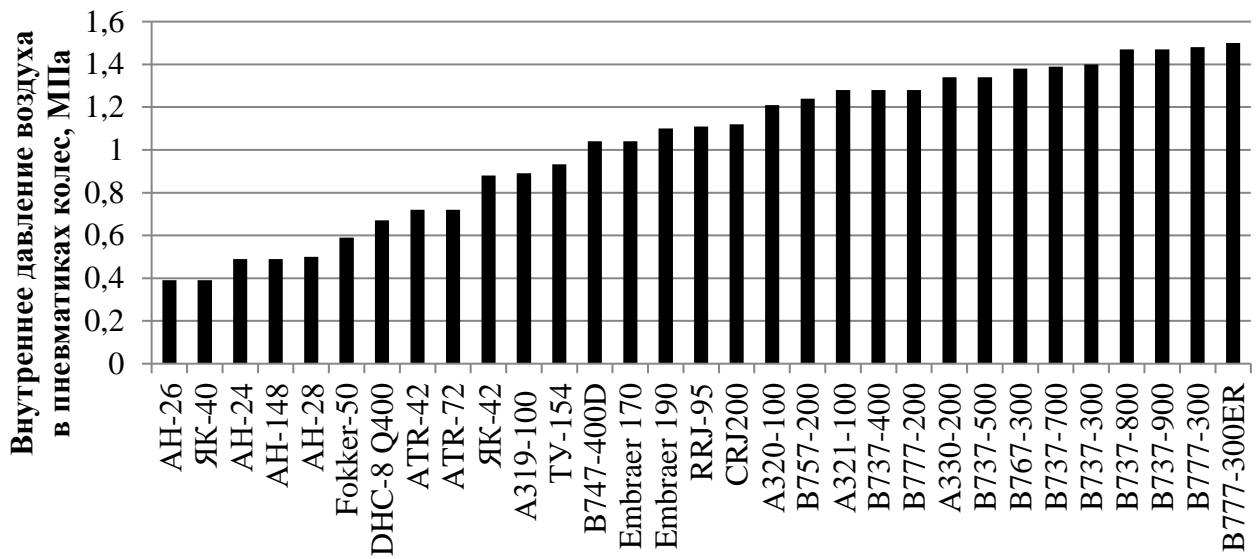
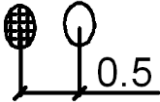
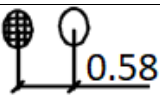

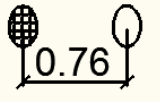
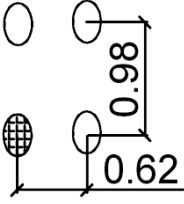
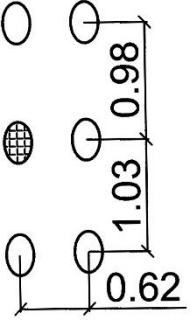
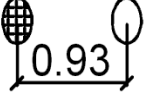
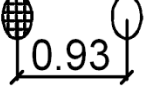
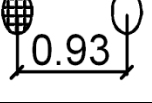
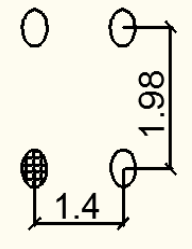

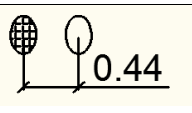
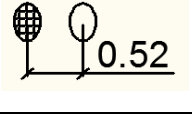
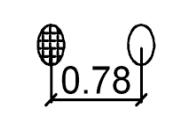

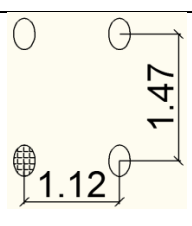
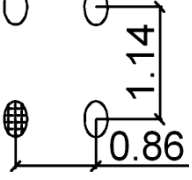


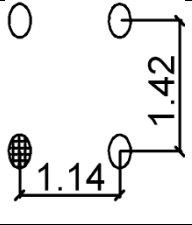
Рисунок 2.3 – Гистограмма давлений в пневматиках

В табл. 2.1 приведены характеристики ВС, эксплуатирующихся на рассмотренных аэродромах. Как видно из табл. 2.1, нагрузка на основную опору исследованных типов ВС находится в диапазоне от 26,1 до 1565,5 кН.

Таблица 2.1

Тип ВС	Нагрузка F_n , на основную опору самолета, кН	Внутреннее давление воздуха в пневматиках колес p_a , МПа	Основная опора
АН-24	97,9	0,49	
АН-26	111,8	0,39	
АН-148	179,6	0,49	
ЯК-40	70,4	0,39	
АН-28	26,1	0,5	
RRJ-95	218,5	1,11	
ЯК-42	265,6	0,88	
ТУ-154	442	0,932	
A319-100-1	292,6	0,89	
A320-100	316,8	1,21	
A321-100	367,6	1,28	

Тип ВС	Нагрузка F_n , на основную опору самолета, кН	Внутреннее давление воздуха в пневматиках колес p_a , МПа	Основная опора
A330-200-1	1015	1,34	
ATR-42	86,4	0,72	
ATR-72	100,2	0,72	
CRJ200	112,6	1,12	
DHC-8 Q400	136,3	0,67	
B737-300	295,9	1,4	
B737-400	318,2	1,28	
B737-500	283,1	1,34	
B737-700	327,3	1,39	
B737-800	369,1	1,47	
B737-900	369,1	1,47	
B747-400D	649,5	1,04	
B757-200	538,6	1,24	

Тип ВС	Нагрузка F_n , на основную опору самолета, кН	Внутреннее давление воздуха в пневматиках колес p_a , МПа	Основная опора
B767-300	743,8	1,38	
B777-200	1139,6	1,28	
B777-300	1395,9	1,48	
B777-300ER	1565,5	1,5	
Embraer 170	174,8	1,04	
Embraer 190	228,5	1,1	
Fokker-50	97,4	0,59	

Из анализа табл. 2.1 следует вывод о том, что характеристики современных ВС не соответствуют категориям нормативной нагрузки, приведенным в табл. 1.3. Для учета требований, обусловленных категориями нормативной нагрузки, при расчете прочности аэродромных покрытий на нагрузки от современных типов ВС необходимо определять соответствие характеристик ВС и КНН.

2.2 Классификация нагрузок от воздушных судов на аэродромные покрытия

Задача заключается в том, что нужно каждый тип ВС отнести к категории нормативной нагрузки по воздействию его на аэродромные покрытия. Для жестких аэродромных покрытий в данной работе выполняется сравнение максималь-

ных изгибающих моментов от воздействия колес основной опоры ВС и четырехколесной условной нормативной опоры.

Для этого рассчитываются максимальные изгибающие моменты m_{k_i} , $i = 1, 2, \dots, 6$ в покрытии от нормативных нагрузок в/к, I–V и каждого типа ВС m_{a_j} . Индекс $i = 1$ присвоен категории в/к, $i = 2$ – I КНН и т.д. Воздушные суда разделяются на классы. Номер класса совпадает с индексом КНН, которая является нижней границей класса по величине моментов.

Условие назначения j -му типу ВС i -го класса имеет вид

$$m_{k_i} < m_{a_j} \leq m_{k_{i-1}} \quad (2.1)$$

Например, максимальные изгибающие моменты ВС 3-го класса должны быть больше момента от II КНН и не больше – момента от I КНН.

Если максимальные изгибающие моменты ВС больше момента от I КНН, то принимается, что по силовому воздействию они соответствуют категории в/к. Воздушные суда, максимальные изгибающие моменты которых превышают момент от категории в/к, принимаются сверхтяжелыми и относятся к классу 1.

Рассмотрим алгоритм и исходные данные для определения максимальных изгибающих моментов, необходимых для граничных значений условия (2.1). Максимальный изгибающий момент является функцией параметров опоры ВС и упругой характеристики плиты, т.е. не существует взаимно-однозначного соответствия между параметрами опоры и максимальным изгибающим моментом в плите аэродромного покрытия. Необходимо определить эталонные значения упругой характеристики плиты, которые будут наиболее вероятными для рассчитываемых КНН или ВС. Это означает, что конструкция аэродромного покрытия с эталонным значением упругой характеристики будет расчетной, т.е. в ней не будет недонапряжения или перенапряжения.

2.2.1 Определение упругой характеристики для КНН

Эталонные значения упругих характеристик для каждой КНН должны удовлетворять условиям прочности (1.29, 1.30).

Упругая характеристика зависит от конструкции покрытия и основания, вида грунтов, климатических и гидрогеологических условий. Для выбора эталонных конструкций, на которых будут определяться изгибающие моменты, был выполнен численный эксперимент для определения влияния перечисленных факторов на упругую характеристику. Для его планирования были приняты следующие исходные данные.

Вид грунтов, климатические и гидрогеологические условия, а также характеристики искусственного основания были заданы величиной эквивалентного коэффициента постели K_S .

Согласно [97] жесткие монолитные покрытия следует проектировать, как правило, однослойными. Были рассчитаны максимальные изгибающие моменты в конструкции однослойного жесткого покрытия, наиболее часто используемой при проектировании в настоящее время.

Для определения эталонных значений упругой характеристики для приведенных в табл. 1.3 нормативных нагрузок нужно задать модули упругости бетона (классы бетона B_{tb}) и толщины покрытия таким образом, чтобы их значения представляли наибольшее количество конструкций жестких аэродромных покрытий. Для этого выполнен численный эксперимент, который заключался в следующем. Составлена матрица планирования, представленная в табл. 2.2, для определения значимости факторов класса бетона B_{tb} и эквивалентного коэффициента постели K_S (графы 1–5 табл. 2.2). Минимальные и максимальные значения фактора B_{tb} приняты согласно нормативным требованиям к минимальному классу бетона и по опыту строительства современных аэродромных покрытий, фактора K_S – в соответствии с принятой в [97] классификацией грунтов.

Для каждого класса бетона, коэффициента постели и категории нормативной нагрузки были определены толщины покрытия, удовлетворяющие условиям (1.29, 1.30). В графах 6–10 табл. 2.2 в числителе приведены значения максимальных изгибающих моментов при центральном загрузении плиты, в знаменателе – толщины покрытия.

Значения уровней факторов в табл. 2.2 в кодированном виде определяются с помощью следующих соотношений:

для класса бетона:

$$x_1 = \begin{cases} 1 \Leftrightarrow B_{tb} 4,8/60, \\ -1 \Leftrightarrow B_{tb} 4,0/50; \end{cases} \quad (2.2)$$

для коэффициента постели

$$x_2 = \begin{cases} \frac{160 - 105}{55} = 1 \\ \frac{50 - 105}{55} = -1 \end{cases} \quad (2.3)$$

Таблица 2.2

№ опыта	Уровни факторов				Значения функции отклика $m_{c,max}$, кНм/м, и толщины покрытия, м, для категории нормативной нагрузки				
	В натуральных значениях		В кодированных значениях						
	B_{tb}	$K_s, \text{МН/м}^3$	x_1	x_2	В/к	I	II	III	IV
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	4,0/50	50	-1	-1	<u>110</u> 0,57	<u>85,9</u> 0,5	<u>63.</u> 0,43	<u>42</u> 0,35	<u>28,8</u> 0,29
2	4,8/60	50	+1	-1	<u>105</u> 0,51	<u>81,9</u> 0,45	<u>59,5</u> 0,38	<u>39,4</u> 0,31	<u>27,7</u> 0,26
3	4,0/50	160	-1	+1	<u>74,9</u> 0,47	<u>57,5</u> 0,41	<u>44,2</u> 0,36	<u>31</u> 0,30	<u>22,8</u> 0,26
4	4,8/60	160	+1	+1	<u>68,8</u> 0,41	<u>55,4</u> 0,37	<u>42,2</u> 0,32	<u>29,8</u> 0,27	<u>21,8</u> 0,23

Уравнение регрессии математической модели зависимости максимального изгибающего момента от класса бетона и коэффициента постели основания в кодированных значениях уровней факторов имеет вид

$$y = B_0 + B_1x_1 + B_2x_2, \quad (2.4)$$

где $y = m_{c,max}$ – функция отклика;

B_0, B_1, B_2 – коэффициенты регрессии;

x_1, x_2 – планируемые факторы.

Коэффициенты модели вычисляются по формуле

$$B_j = \frac{\sum_{i=1}^N x_{j,i} y_i}{N}, \quad (2.5)$$

где N – число точек плана.

Определены коэффициенты уравнений модели для всех КНН, приведенных в табл. 2.2.

Для категории в/к уравнение регрессии определено следующим образом.

$$B_0 = \frac{\sum_{i=1}^4 x_{0i} \bar{y}_i}{4} = \frac{110 + 105 + 74,9 + 68,8}{4} = 89,675;$$

$$B_1 = \frac{\sum_{i=1}^4 x_{1i} \bar{y}_i}{4} = \frac{-110 + 105 - 74,9 + 68,8}{4} = -2,775 ;$$

$$B_2 = \frac{\sum_{i=1}^4 x_{2i} \bar{y}_i}{4} = \frac{-110 - 105 + 74,9 + 68,8}{4} = -17,825;$$

$$y = 89,675 - 2,775x_1 - 17,825x_2.$$

Аналогично определены коэффициенты математических моделей для остальных КНН. Результаты расчетов сведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

КНН	Коэффициенты уравнений регрессии		
	B_0	B_1	B_2
в/к	89,675	-2,775	-17,825
I	70,175	-1,525	-13,725
II	52,225	-1,375	-9,025
III	35,55	-0,95	-5,15
IV	25,275	-0,525	-2,975

По уравнению регрессии определены расчетные значения функции отклика \hat{y} , которые приведены в табл. 2.4.

Таблица 2.4

№ опыта	Уровни факторов в кодированных значениях		Значения функции отклика \hat{y}_i , вычисленные по уравнению регрессии для категории нормативной нагрузки				
	x_1	x_2	В/к	I	II	III	IV
1	-1	-1	110,275	85,425	62,625	41,65	28,775
2	+1	-1	104,725	82,375	59,875	39,75	27,725
3	-1	+1	74,625	57,975	44,575	31,35	22,825
4	+1	+1	69,075	54,925	41,825	29,45	21,775

Далее приведен статистический анализ уравнения регрессии для категории в/к.

Вычисляем дисперсию адекватности с использованием значений из табл. 2.5:

$$S_{\text{ад.}}^2 = \frac{1}{N - I} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 =$$

$$= \frac{1}{4 - 3} (0,075625 + 0,075625 + 0,075625 + 0,075625) = 0,3025;$$

где I – количество определяемых коэффициентов регрессии.

Таблица 2.5

№ опыта	1	2	3	4
y_i	110	105	74,9	68,8
\hat{y}_i	110,275	104,725	74,625	69,075
$y_i - \hat{y}_i$	-0,275	0,275	0,275	-0,275
$(y_i - \hat{y}_i)^2$	0,075625	0,075625	0,075625	0,075625

Дисперсии коэффициентов линейной модели равны:

$$S^2(B_i) = \frac{S_{\text{ад.}}^2(y)}{N} = \frac{0,3025}{4} = 0,075625.$$

Среднеквадратическое отклонение коэффициентов:

$$S(B_i) = \sqrt{0,075625} = 0,275.$$

Проверяем значимость коэффициентов регрессии. Для этого определяем значение t -критерия при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $f = N - I = 1$ по таблице распределения Стьюдента:

$$t_{0,05;1} = 12,71.$$

Вычисляем t -статистики:

$$t_{B_0} = \frac{|B_0|}{S(B_0)} = \frac{89,675}{0,275} = 326,091;$$

$$t_{B_1} = \frac{|B_1|}{S(B_1)} = \frac{2,775}{0,275} = 10,091;$$

$$t_{B_2} = \frac{|B_2|}{S(B_2)} = \frac{17,825}{0,275} = 64,818.$$

Проверяем выполнение условий:

$$t_{B_0} = 326,091 > t_{0,05;1} = 12,71;$$

$$t_{B_1} = 10,091 > t_{0,05;1} = 12,71;$$

$$t_{B_2} = 64,818 > t_{0,05;1} = 12,71.$$

Поскольку неравенство для коэффициента B_1 не выполняется, то линейный эффект первого фактора (класса бетона) не является значимым.

Вычисляем дисперсию относительно среднего с использованием значений из табл. 2.6:

$$S_y^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2, \quad (2.6)$$

где \bar{y} – среднее значение функции отклика.

Таблица 2.6

№ опыта	1	2	3	4	Среднее значение
y_i	110	105	74,9	68,8	89,675
$(y_i - \bar{y})^2$	413,106	234,856	218,301	435,766	

$$S_y^2 = \frac{1}{4-1} (413,106 + 234,856 + 218,301 + 435,766) = 434,009.$$

Так как серия опытов выполнена без параллельных, для расчета дисперсии воспроизводимости нет данных. Поэтому по критерию Фишера сравниваем дисперсию относительно среднего и дисперсию адекватности

$$F_{\text{опытн}} = \frac{S_y^2(f_1)}{S_{\text{ад.}}^2(f_2)} = \frac{434,009}{0,3025} = 1434,74; \quad (2.7)$$

где $F_{\text{опытн}}$ – опытное значение критерия Фишера.

Чем больше полученное значение $F_{\text{опытн}}$ превышает критическое значение критерия Фишера, тем эффективнее уравнение регрессии. Критическое значение критерия Фишера $F_{\alpha, f_1, f_2} = 215,7$ определено при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числах степеней свободы $f_1 = N - 1 = 3$ и $f_2 = N - I = 1$.

$$F_{\text{опытн}} = 1434,74 > F_{0,05,3,1} = 215,7,$$

следовательно, уравнение регрессии эффективно.

Доминирующим фактором для всех КНН является коэффициент постели основания, т.к. $|B_2| > |B_1|$ во всех уравнениях регрессии. Это свидетельствует о том, что изменение коэффициента постели в рассмотренном интервале оказывает большее влияние на изгибающие моменты по сравнению с изменением класса бетона. Это хорошо видно из таблицы коэффициентов регрессии (табл. 2.3) и графиков изгибающих моментов (рис. 2.4).

При одинаковых значениях коэффициента постели и изменении класса бетона от 4,0/50 до 4,8/60 максимальные изгибающие моменты изменяются не более чем на 6,1 кНм/м, в то время как при одинаковых классах бетона и изменении значений коэффициента постели диапазон изменения значений максимальных изгибающих моментов достигает 36,2 кНм/м.

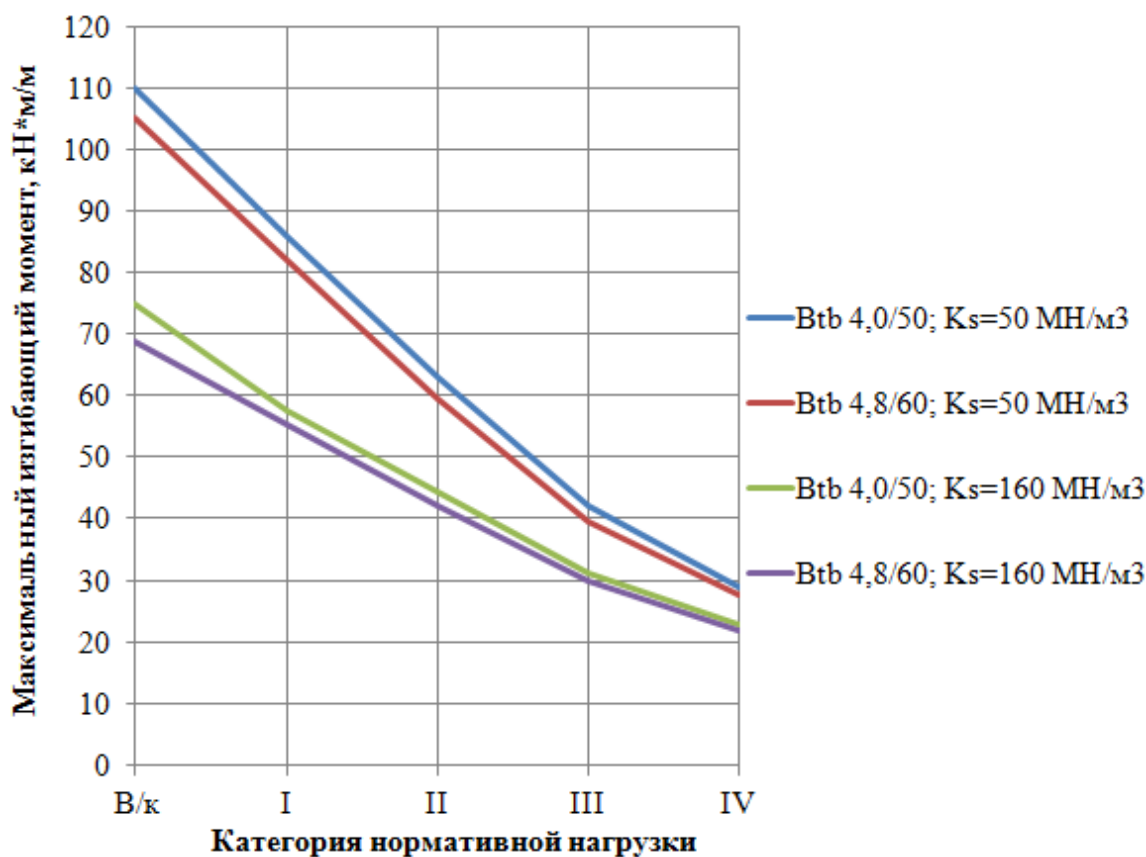


Рисунок 2.4 – Графики зависимости максимальных изгибающих моментов от класса бетона и коэффициента постели

Поэтому для дальнейшего анализа приняты средний в рассматриваемом диапазоне класс бетона 4,4/55 и граничные значения коэффициента постели 50 и 160 МН/м³. Рассчитаны толщины однослойного бетонного покрытия, при которых выполняются условия (1.29, 1.30), и соответствующие им значения упругой характеристики плиты l . Полученные значения упругой характеристики в зависимости от коэффициента постели и КНН приведены в табл. 2.7.

Таблица 2.7

K_s , МН/м ³	l , м					
	В/к	I	II	III	IV	V
50	1,75	1,61	1,43	1,23	1,07	0,89
160	1,12	1,03	0,94	0,82	0,73	0,62

2.2.2 Классификация ВС по максимальным изгибающим моментам

Рассчитанные значения упругой характеристики (см. табл. 2.7) использованы для расчета максимальных изгибающих моментов m_{aj} конкретных типов ВС и включения типов ВС в классы в зависимости от выполнения условия (2.1).

Результаты расчета максимальных изгибающих моментов для исследованных типов ВС представлены в табл. 2.8–2.13.

Таблица 2.8

Класс 1. Границы: при $K_s = 50 \text{ МН/м}^3$ $m_{k_0} = 108,2 \text{ кН} \cdot \text{м/м}$; при $K_s = 160 \text{ МН/м}^3$ $m_{k_0} = 72,3 \text{ кН} \cdot \text{м/м}$.		
Тип ВС	m_{aj} , кН · м/м при $K_s = 50$ МН/м ³ , $l = 1,75 \text{ м}$	m_{aj} , кН · м/м при $K_s = 160 \text{ МН/м}^3$, $l = 1,12 \text{ м}$
B777-300	123,9	78,5
B777-300ER	137,5	86,5

Таблица 2.9

Класс 2. Границы: при $K_s = 50 \text{ МН/м}^3$ $m_{k_0} = 101,3 \text{ кН} \cdot \text{м/м}$, $m_{k_1} = 85,3 \text{ кН} \cdot \text{м/м}$; при $K_s = 160 \text{ МН/м}^3$ $m_{k_0} = 66,9 \text{ кН} \cdot \text{м/м}$, $m_{k_1} = 57 \text{ кН} \cdot \text{м/м}$.		
Тип ВС	m_{aj} , кН · м/м при $K_s = 50$ МН/м ³ , $l = 1,61 \text{ м}$	m_{aj} , кН · м/м при $K_s = 160 \text{ МН/м}^3$, $l = 1,03 \text{ м}$
A330-200-1	91	67,9
B777-200	93,5	60,4
A321-100-1	76,6	58,7
B737-800/900	80	61,8

Таблица 2.10

Класс 3. Границы: при $K_s = 50 \text{ МН/м}^3$ $m_{k_1} = 77,1 \text{ кН} \cdot \text{м/м}$, $m_{k_2} = 62,5 \text{ кН} \cdot \text{м/м}$; при $K_s = 160 \text{ МН/м}^3$ $m_{k_1} = 53,6 \text{ кН} \cdot \text{м/м}$, $m_{k_2} = 43,9 \text{ кН} \cdot \text{м/м}$.		
Тип ВС	m_{a_j} , кН · м/м при $K_s = 50$ МН/м ³ , $l = 1,43$ м	m_{a_j} , кН · м/м при $K_s = 160$ МН/м ³ , $l = 0,94$ м
A320-100	62,7	48,4
B737-300	63,2	49,6
B737-400	66,5	51,8
B737-500	60,5	47,4
B737-700	67,1	52,2
B747-400D	61,8	45,3
B757-200	63,3	43,6
B767-300	72,5	53,1

Таблица 2.11

Класс 4. Границы: при $K_s = 50 \text{ МН/м}^3$ $m_{k_2} = 54,7 \text{ кН} \cdot \text{м/м}$, $m_{k_3} = 41,6 \text{ кН} \cdot \text{м/м}$; при $K_s = 160 \text{ МН/м}^3$ $m_{k_2} = 40,1 \text{ кН} \cdot \text{м/м}$, $m_{k_3} = 30,9 \text{ кН} \cdot \text{м/м}$.		
Тип ВС	m_{a_j} , кН · м/м при $K_s = 50$ МН/м ³ , $l = 1,23$ м	m_{a_j} , кН · м/м при $K_s = 160$ МН/м ³ , $l = 0,82$ м
Ty-154	45,1	29,4
A319-100-1	49,5	37,5
Embraer190/195	48,3	38
RRJ-95B	43,7	34,1

Таблица 2.12

Класс 5. Границы: при $K_s = 50 \text{ МН/м}^3$ $m_{k_3} = 36,6 \text{ кН} \cdot \text{м/м}$, $m_{k_4} = 28,6 \text{ кН} \cdot \text{м/м}$; при $K_s = 160 \text{ МН/м}^3$ $m_{k_3} = 28,5 \text{ кН} \cdot \text{м/м}$, $m_{k_4} = 22,6 \text{ кН} \cdot \text{м/м}$.		
Тип ВС	m_{a_j} , кН · м/м при $K_s = 50$ МН/м ³ , $l = 1,07$ м	m_{a_j} , кН · м/м при $K_s = 160$ МН/м ³ , $l = 0,73$ м
АН-148	31,5	24,2
ЯК-42	28,6	20,7
Embraer170	35,3	28

Таблица 2.13

Класс 6. Границы: при $K_s = 50 \text{ МН/м}^3$ $m_{k_4} = 25,6 \text{ кН} \cdot \text{м/м}$, $m_{k_5} = 17,8 \text{ кН} \cdot \text{м/м}$; при $K_s = 160 \text{ МН/м}^3$ $m_{k_4} = 20,2 \text{ кН} \cdot \text{м/м}$, $m_{k_5} = 14,6 \text{ кН} \cdot \text{м/м}$.		
Тип ВС	m_{a_j} , кН · м/м при $K_s = 50$ МН/м ³ , $l = 0,89$ м	m_{a_j} , кН · м/м при $K_s = 160$ МН/м ³ , $l = 0,62$ м
АН-26	19	14,8
ATR-72	20,2	16,3
CRJ 200	24	19,5
DHC-8 Q400	24,2	19
Fokker50	18,6	14,8

На рис. 2.5–2.10 приведены графики максимальных изгибающих моментов в бетонном покрытии на основании с коэффициентом постели 50 и 160 МН/м³ от ВС классов и границ классов – максимальных изгибающих моментов от КНН.

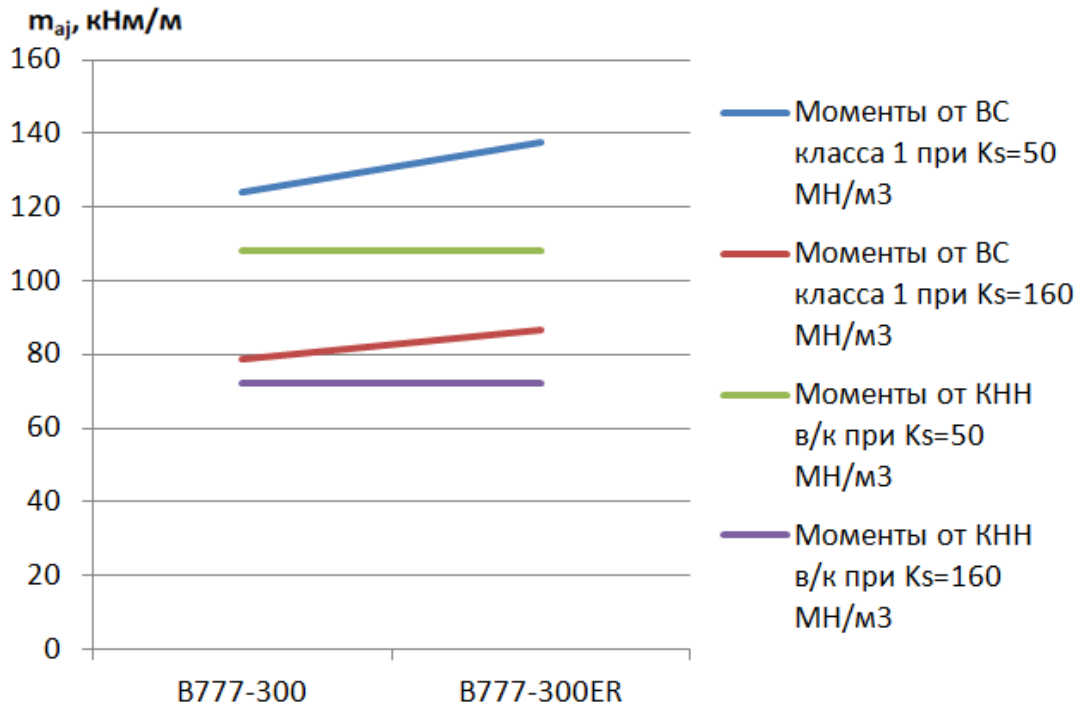


Рисунок 2.5 – Графики максимальных изгибающих моментов от ВС класса 1

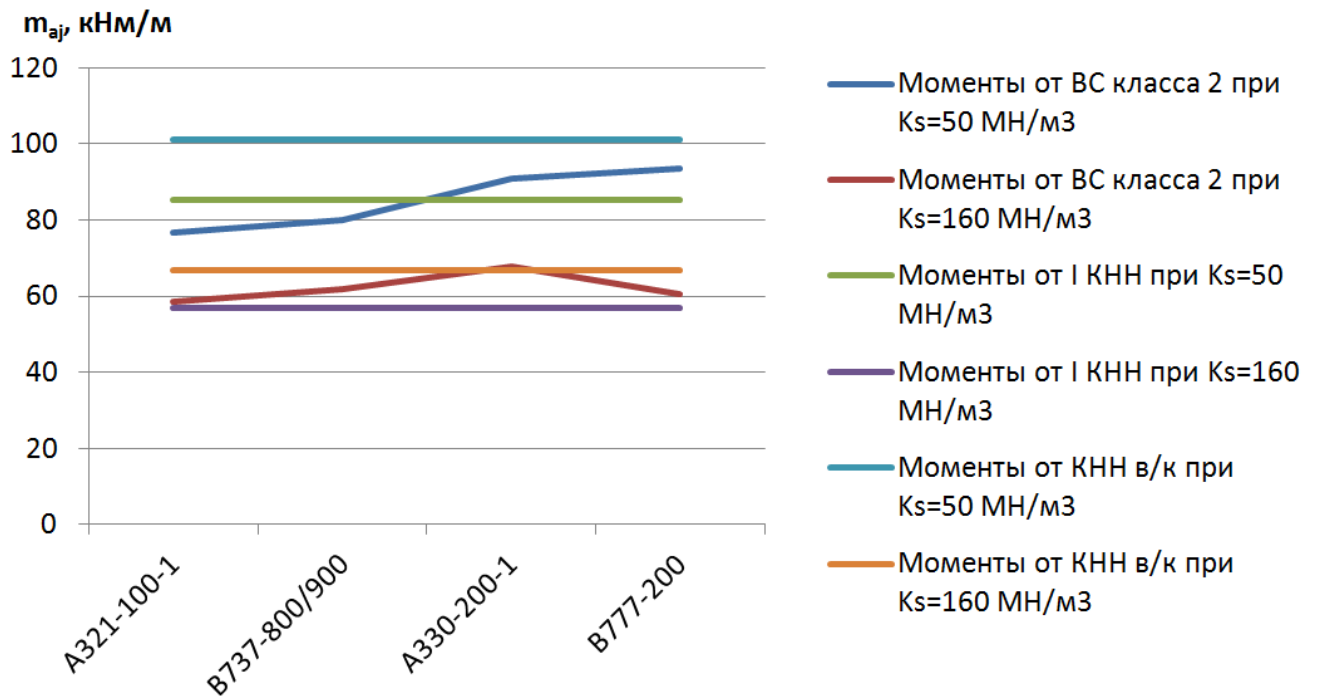


Рисунок 2.6 – Графики максимальных изгибающих моментов от ВС класса 2

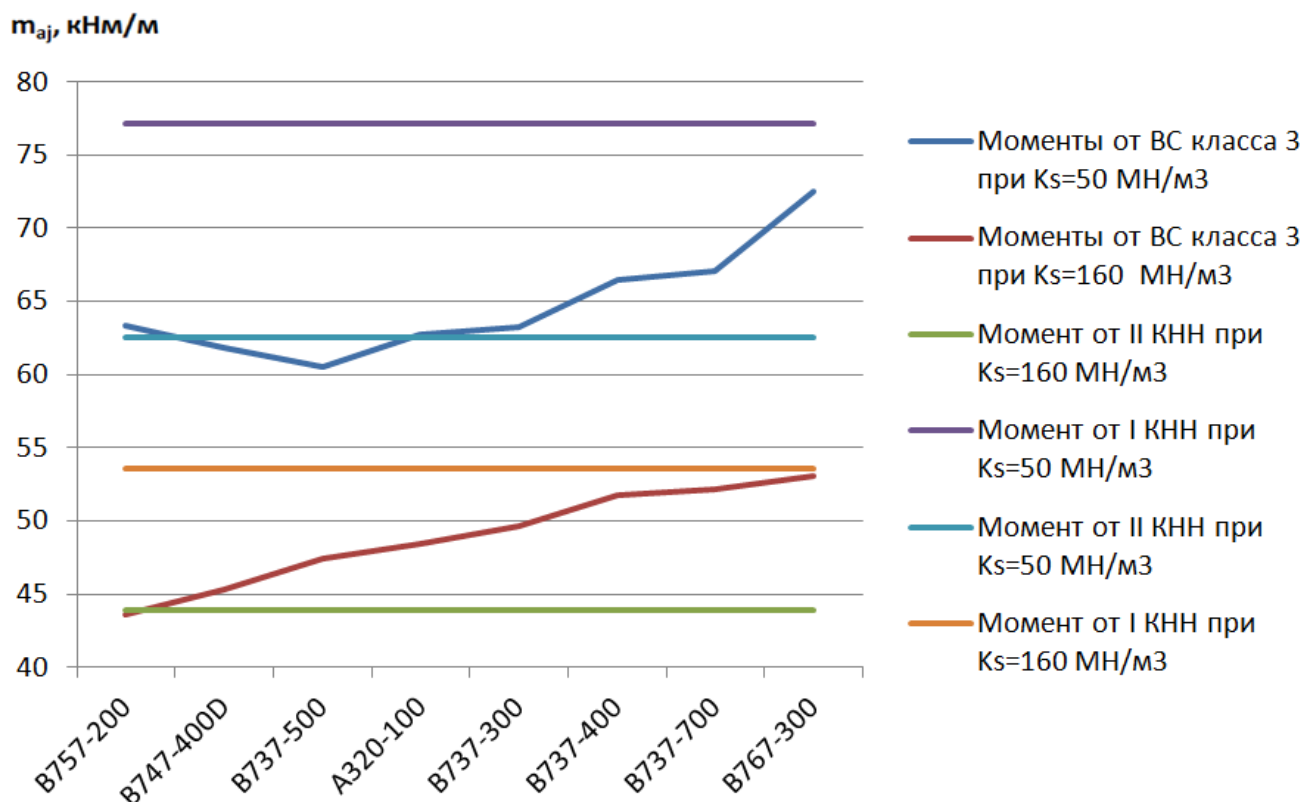


Рисунок 2.7 – Графики максимальных изгибающих моментов от BC класса 3

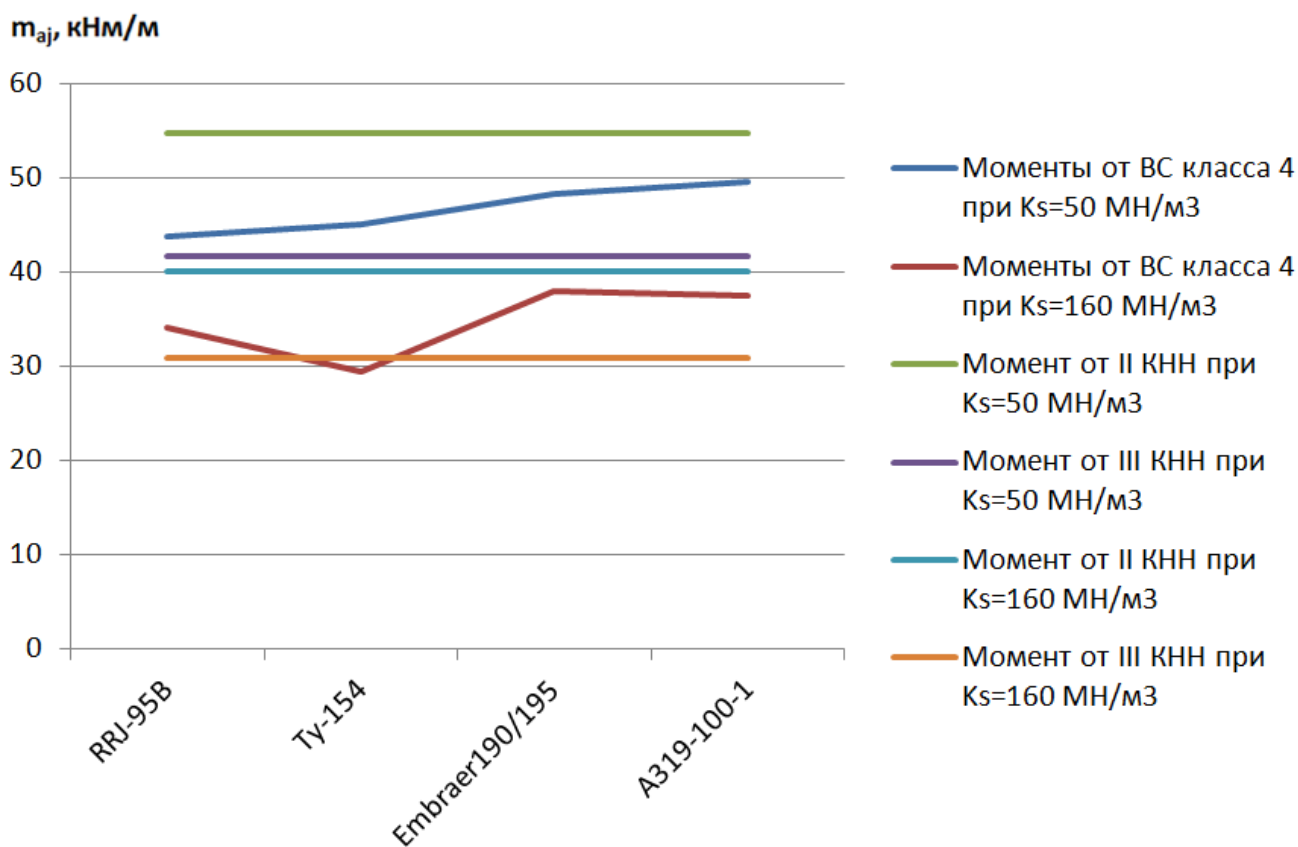


Рисунок 2.8 – Графики максимальных изгибающих моментов от BC класса 4

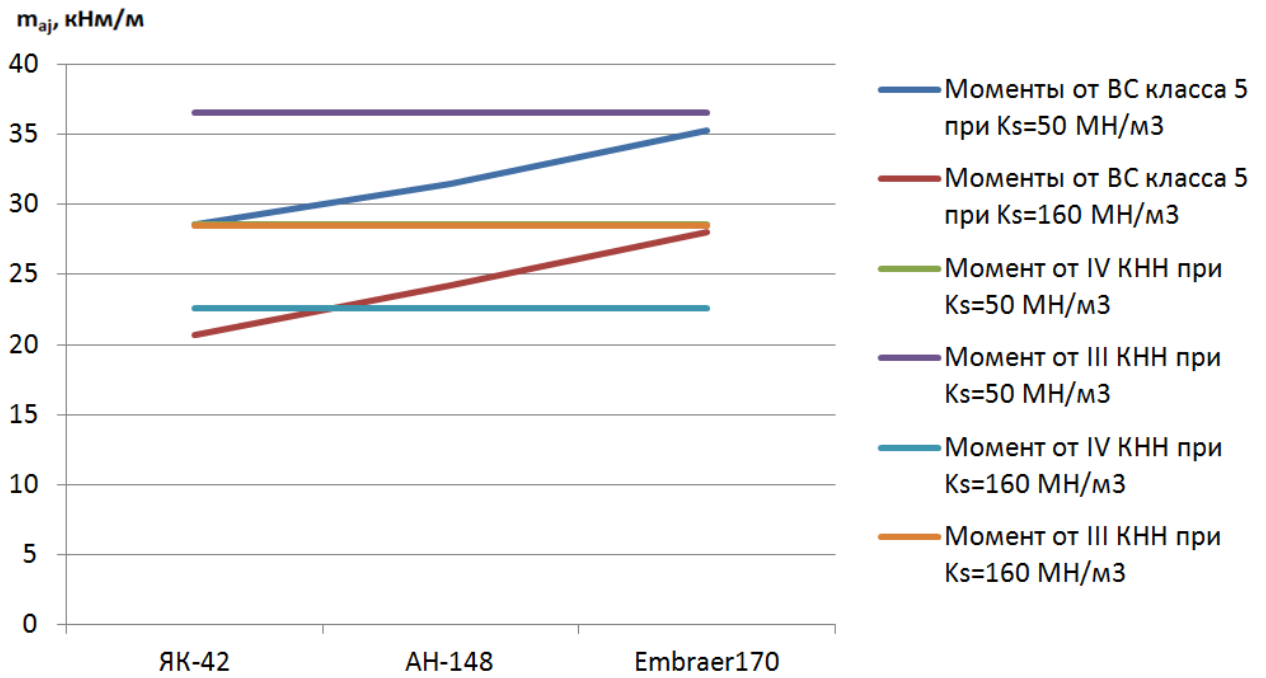


Рисунок 2.9 – Графики максимальных изгибающих моментов от ВС класса 5

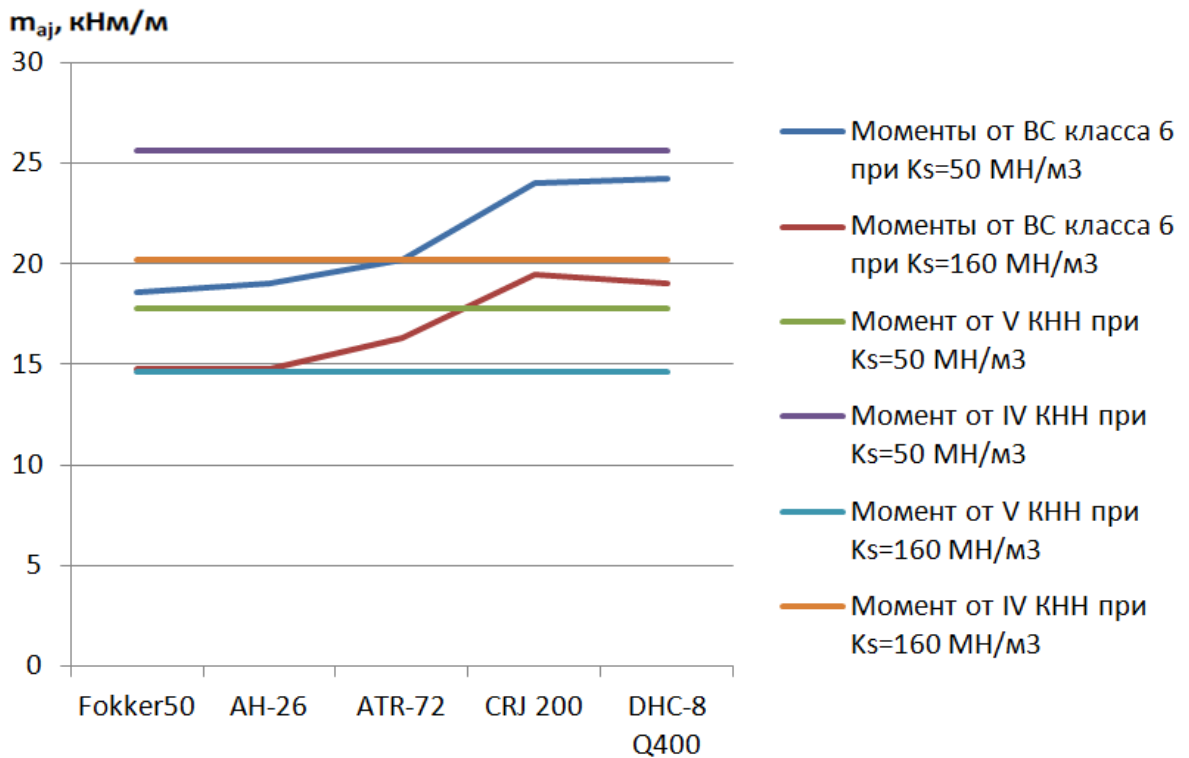


Рисунок 2.10 – Графики максимальных изгибающих моментов от ВС класса 6

В результате анализа информации, приведенной в табл. 2.8–2.13, и графиков рис. 2.5–2.10 была составлена табл. 2.14 соответствия типов ВС категориям нормативной нагрузки по изгибающим моментам в жестком аэродромном покрытии.

Класс	Категория нормативной нагрузки	Тип воздушного судна
1	Сверхтяжелые ВС	B777-300, B777-300ER
2	В/к	A330-200-1, A321-100-1, B737-800, B737-900, B777-200
3	I	A320-100, B737-300, B737-400, B737-500, B737-700, B747-400D, B757-200, B767-300
4	II	TU-154, RRJ-95B, A319-100-1, Embraer190
5	III	АН-148, ЯК-42, Embraer170
6	IV	АН-26, ATR-72, CRJ 200, DHC-8 Q400, Fokker50

2.2.3 Классификация ВС по нагрузке на колесо

Для сравнения с классификацией ВС по максимальным изгибающим моментам в табл. 2.15 сделано распределение ВС по классам на основе нагрузки на одно колесо F_k . В качестве границы класса 6 принята VI КНН, так как нагрузка на одно колесо V КНН больше нагрузки на одно колесо IV КНН.

Таблица 2.15

Класс	Границы F_k , кН		Тип ВС	F_k , кН
1	∞	$F_k^{B/K} = 212,5$	A330-200-1	253,8
			B777-300	232,6
			B777-300ER	260,9
2	$F_k^{B/K} = 212,5$	$F_k^{I\text{ КНН}} = 175$	A321-100	183,8
			B737-800	184,5
			B737-900	184,5
			B767-300	186
			B777-200	189,9
3	$F_k^{I\text{ КНН}} = 175$	$F_k^{II\text{ КНН}} = 137,5$	A319-100-1	146,3
			A320-100	158,4
			B737-300	148
			B737-400	159,1
			B737-500	141,5
			B737-700	163,6
			B747-400D	162,4
4	$F_k^{II\text{ КНН}} = 137,5$	$F_k^{III\text{ КНН}} = 100$	B757-200	134,6
			Embraer 190	114,2
			RRJ-95B	109,3
5	$F_k^{III\text{ КНН}} = 100$	$F_d^{IV\text{ КНН}} = 75$	АН-148	89,8
			Embraer 170	87,4
6	$F_d^{IV\text{ КНН}} = 75$	$F_d^{VI\text{ КНН}} = 50$	Ту-154	73,7
			ЯК-42	66,4
			АН-26	55,9
			ATR-72	50,1
			CRJ200	56,3
			DHC-8 Q400	68,2

2.2.4 Классификация ВС по коду ACN

В табл. 2.16 приведена классификация ВС по классификационным числам ACN. В качестве границ классов приняты значения ACN категорий нормативной нагрузки в/к–V.

В табл. 2.17 показано сравнение классификаций ВС по максимальным изгибающим моментам, по нагрузке на колесо и по ACN. Анализ классов, приведенных в табл. 2.17 позволяет сделать вывод, что классификация по изгибающим моментам для классов 1, 2, 3 практически совпадает с международной классификацией по ACN. Исключение составляют B747-400D и B757-200, отнесенные по изгибающим моментам к 3-му классу, а по классификационному числу ACN – к 4-му классу. Большинство ВС классов 4 и ниже относятся к одним и тем же классам или различаются не более чем на один класс. В основном это расхождение связано с нахождением характеристик этих ВС у границ классов. Классификация по нагрузке на колесо дает большее расхождение результатов с классификацией по ACN.

Таблица 2.16

Класс	Верхние границы, код основания				Нижние границы, код основания				Тип ВС	ACN, код основания			
	A	B	C	D	A	B	C	D		A	B	C	D
1	∞				60	72	84	93	B777-300	54	69	89	108
									B777-300ER	64	83	107	128
2	60	72	84	93	45	54	64	71	A330-200	48	56	66	78
									B777-200	38	47	62	78
									A321-100	47	50	52	54
									B737-800/900	51	53	55	57
3	45	54	64	71	32	38	45	52	A320-100	38	41	43	45
									B737-300	40	42	44	46
									B737-400	43	45	47	49
									B737-500	38	40	42	43
									B737-700	43	46	48	50
									B767-300	40	48	57	65
4	32	38	45	52	20	24	29	34	B747-400D	30	36	43	51
									B757-200	32	38	45	52
									Ту-154	19	25	32	38
									A319-100	31	34	37	39
									Embraer 190	31	33	35	36
									RRJ-95B	27	28,6	30,1	31,3
									Embraer 170	22	24	25	26
5	20	24	29	34	14	17	20	23	CRJ 200	16	16	17	18
									DHC-8 Q400	16	17	18	19
6	14	17	20	23	12	12	13	13	АН-148	12	13	14	15
									ЯК-42	13	16	20	23
									АН-26	9	10	12	13
									ATR-72	13	14	14	15

Таблица 2.17

Тип ВС	Класс по моментам	Класс по нагрузке на колесо	Класс по ACN
B777-300	1	1	1
B777-300ER	1	1	1
A330-200-1	2	1	2
B777-200	2	2	2
A321-100-1	2	2	2
B737-800/900	2	2	2
A320-100	3	3	3
B737-300	3	3	3
B737-400	3	3	3
B737-500	3	3	3
B737-700	3	3	3
B747-400D	3	3	4
B757-200	3	4	4
B767-300	3	2	3
Ty-154	4	6	4
A319-100-1	4	3	4
Embraer190/195	4	4	4
RRJ-95B	4	4	4
АН-148	5	5	6
ЯК-42	5	6	6
Embraer170	5	5	4
АН-26	6	6	6
ATR-72	6	6	6
CRJ 200	6	6	5
DHC-8 Q400	6	6	5

Таким образом, классификация ВС адекватна международным классификационным числам ACN.

2.3 Исследование прочности грунтового основания по предельному давлению при воздействии современных тяжелых типов воздушных судов

Согласно требованиям [97] расчет конструкций по допускаемому давлению на грунтовое основание необходимо выполнять для покрытий на основаниях из просадочных грунтов, а также железобетонных монолитных и сборных покрытий независимо от того, является грунт просадочным или нет. Это связано с тем, что большая гибкость железобетонных покрытий может привести к появлению остаточных деформаций в подстилающем грунтовом основании и к потере ровности покрытия. Критерий прочности по предельно допустимому давлению на грунт для просадочных грунтов выражается условием (1.33).

Приведенные в статье [84] расчеты аэродромных покрытий для воздушных судов, нагрузки от которых превышают внекатегорийную (например, В777-300ER), показывают, что в грунтовом основании бетонных и армобетонных покрытий под воздействием этих нагрузок может нарушиться условие (1.33), вследствие чего в грунте могут образоваться остаточные деформации.

Для исследования напряжений в грунте от сверхтяжелых ВС был выполнен численный эксперимент. Определены типы ВС, оказывающие большую нагрузку на основание по сравнению с внекатегорийной нагрузкой от нормативной опоры 850 кН с давлением в пневматиках 1 МПа.

Вертикальные сжимающие напряжения в грунте и предельно допустимое давление на грунт в формуле (1.33) определяются следующим образом.

Сжимающее напряжение в грунте от эксплуатационной нагрузки σ_{zp} определяется по формуле [97]

$$\sigma_{zp} = k_z p_k, \quad (2.8)$$

где k_z – коэффициент, представляющий отношение напряжения в грунте на

уровне его поверхности к максимальному контактному давлению на поверхности основания;

p_k – максимальное значение контактного давления от нагрузки на поверхности основания, кПа.

Максимальное значение контактного давления от многоколесной опоры ВС для бетонных аэродромных покрытий определяется по формуле [97]

$$p_k = 0,0081 \frac{F_d}{l^2} \sum_{i=1}^{n_k} \left(4 - \frac{a_i}{l}\right)^2 k_p, \quad (2.9)$$

где F_d – расчетная нагрузка на колесо ВС;

l – упругая характеристика плиты покрытия, м;

a_i – расстояние от центра тяжести площади контакта всех колес опоры до центра отпечатка i -го колеса, м;

n_k – число колес в главной опоре;

k_p – коэффициент, значения которого принимают равными 5,0 – для одноколесной опоры; 3,5 – для двухколесной опоры; 2,0 – для опоры с четырьмя и большим числом колес.

Значения коэффициента k_z определяются по [97] в зависимости от отношения эквивалентного расстояния a_e от рассматриваемой точки до подошвы плиты покрытия к условному диаметру круга передачи нагрузки от плиты покрытия к искусственному основанию D_r для жестких покрытий.

При этом предполагается, что плиты аэродромных покрытий являются бесконечными в плане, т.е. чаша прогиба от нагрузки не выходит за пределы плиты. Это не всегда соответствует действительности. При разрушении плит аэродромных покрытий они разбиваются на отдельные фрагменты, не связанные между собой стыковыми соединениями. В этом случае фрагменты плит работают как жесткие блоки и могут вызвать недопустимые деформации непосредственно под блоками. Деформации основания приводят к нарушению ровности аэродромных покрытий и ухудшению их работы. Кроме того, увеличивается динамическая нагрузка на конструкцию от ВС. Следует заметить, что плохая ровность аэро-

дромных покрытий прежде всего отрицательно влияет на ВС. Возникающая перегрузка покрытия приводит к еще большему его разрушению. Поэтому при наличии на плитах покрытий большого числа сквозных продольных и поперечных трещин нужно рассчитывать их конструкции по давлению на грунтовое основание.

Критерием бесконечности в данном случае является условие

$$D_{xy} > D_I, \quad (2.10)$$

где $D_{xy} = 2\sqrt{\frac{xy}{\pi}}$ – диаметр условного круга передачи нагрузки от плиты размером в плане $x \times y$ м²;

$D_I = 2,5 \cdot l$ – диаметр условного круга передачи нагрузки от плиты с упругой характеристикой l .

При его выполнении расчет максимального значения выполняется по изложенной выше методике. Невыполнение условия (2.10) означает, что диаметр чаши прогиба больше размеров плиты и нагрузка передается на основание через блок конечных размеров.

Сжимающие напряжения в грунте от собственного веса грунта определяются по формуле [97]

$$\sigma_{zg} = g \sum_{i=1}^n t_i \rho_i + a_z \rho_0 g, \quad (2.11)$$

где t_i – толщина i -го конструктивного слоя, м;

ρ_i – плотность материала i -го конструктивного слоя, кг/м³;

n – количество слоев конструкции выше подстилающего грунта;

a_z – расстояние от низа аэродромного покрытия до рассматриваемой точки грунта, м;

ρ_0 – плотность грунта, кг/м³;

g – ускорение свободного падения.

Для выбора типов ВС, оказывающих наибольшее воздействие на грунтовое основание, было рассчитано максимальное контактное давление от ВС и внекате-

горийной нагрузки. Характеристики конструкции при расчете учитывались упругой характеристикой плиты.

Графики зависимости максимального контактного давления от упругой характеристики плиты показаны на рис. 2.11.

Как видно из рис. 2.11, максимальное контактное давление от самолетов B777-300ER, B-777-300, B777-200 больше максимального контактного давления от внекатегорийной нагрузки. Для данных типов ВС были рассчитаны конструкции аэродромных покрытий по условиям (1.29, 1.30), и затем на этих конструкциях были определены параметры условия (1.33).

При расчете параметров формул (1.29, 1.30, 1.33) использовались следующие исходные данные. Аэродром расположен во II дорожно-климатической зоне. Грунтовое основание 2 типа гидрогеологических условий. Конструкция бетонного покрытия показана на рис. 2.12. Толщина упрочненного основания из мелкозернистого бетона принята для всех вариантов одинаковой: $t_f = 0,2$ м.

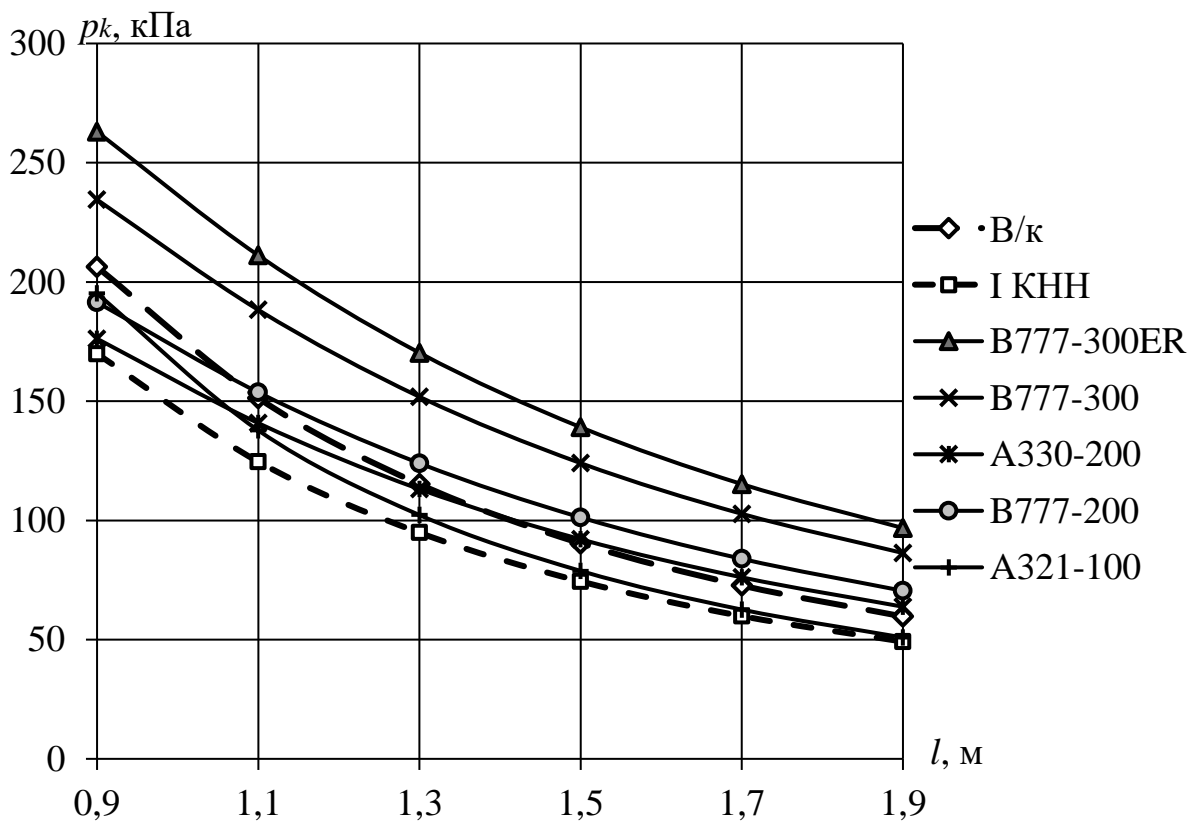


Рисунок 2.11 – Графики зависимости максимального контактного давления p_k от упругой характеристики плиты l

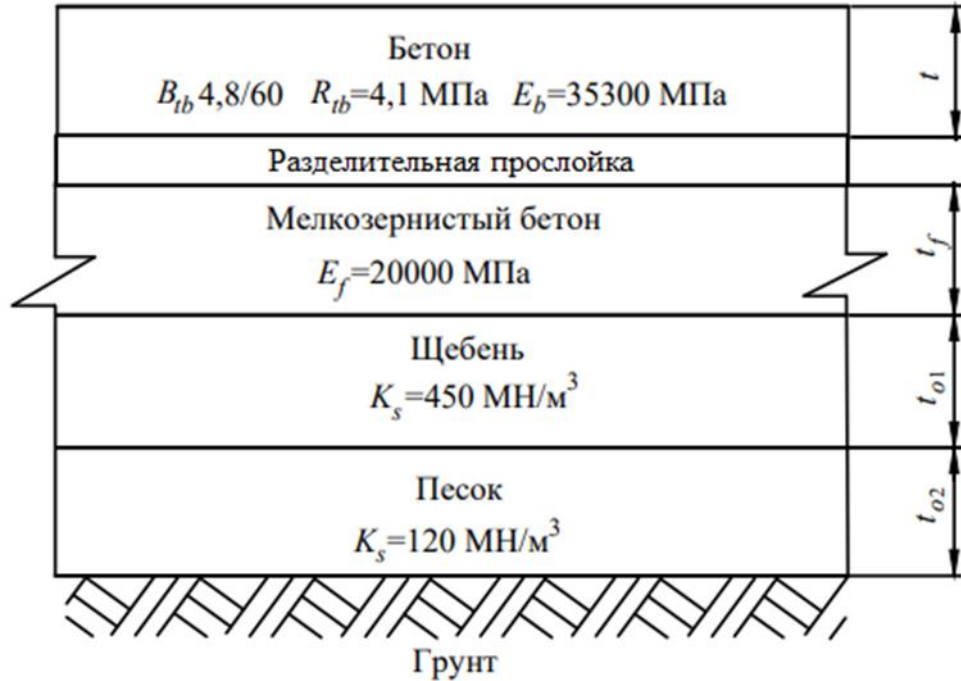


Рисунок 2.12 – Конструкция бетонного покрытия

Для определения начального просадочного давления p_{sc} (см. формулу (1.33)) в зависимости от характеристик грунта была выведена следующая формула на основе известной формулы механики грунтов [126].

Величина безопасного давления на грунт P_u определяется исходя из условия, что сдвиги в грунте не допускаются. Предельно допустимое давление на грунт от равномерно распределенной полосообразной нагрузки при наличии боковой пригрузки $q = \gamma h$ можно определить по формуле профессора Н.П. Пузыревского [126]

$$P_u = \frac{\pi(\gamma h + c \operatorname{ctg} \varphi)}{\operatorname{ctg} \varphi + \varphi - \pi/2} + \gamma h, \quad (2.12)$$

где γ – объемный вес грунта, кН/м³;

h – глубина залегания нагруженной поверхности, м;

c – общее сцепление грунта, кПа;

φ – угол внутреннего трения грунта, рад.

Принимая боковую пригрузку грунтового основания для нагрузки от ВС и конструкции аэродромного покрытия равной суммарному весу покрытия и искусственного основания $q = g \sum_{i=1}^n \rho_i t_i$, формулу (2.12) можно переписать в виде:

$$P_u = \frac{\pi(g \sum_{i=1}^n \rho_i t_i + c \operatorname{ctg} \varphi)}{\operatorname{ctg} \varphi + \varphi - \pi/2} + g \sum_{i=1}^n \rho_i t_i, \quad (2.13)$$

Приведем к общему знаменателю и раскроем скобки

$$P_u = \frac{1}{\operatorname{ctg} \varphi + \varphi - \pi/2} \cdot \left(\pi g \sum_{i=1}^n \rho_i t_i + \pi c \operatorname{ctg} \varphi + \right. \\ \left. + \operatorname{ctg} \varphi g \sum_{i=1}^n \rho_i t_i + \varphi g \sum_{i=1}^n \rho_i t_i - \frac{\pi}{2} g \sum_{i=1}^n \rho_i t_i \right). \quad (2.14)$$

Запишем отдельно слагаемое с общим сцеплением грунта. В оставшейся сумме вынесем за скобки общий множитель.

$$P_u = \left(\pi + \operatorname{ctg} \varphi + \varphi - \frac{\pi}{2} \right) \frac{g \sum_{i=1}^n \rho_i t_i}{\operatorname{ctg} \varphi + \varphi - \pi/2} + c \frac{\pi \operatorname{ctg} \varphi}{\operatorname{ctg} \varphi + \varphi - \pi/2}; \quad (2.15)$$

$$P_u = \frac{\operatorname{ctg} \varphi + \varphi + \pi/2}{\operatorname{ctg} \varphi + \varphi - \pi/2} g \sum_{i=1}^n \rho_i t_i + c \frac{\pi \operatorname{ctg} \varphi}{\operatorname{ctg} \varphi + \varphi - \pi/2}. \quad (2.16)$$

Общее сцепление грунта умножаем на коэффициент, учитывающий особенности работы грунта под искусственным покрытием. Получим формулу для определения предельно допускаемого давления на грунтовое основание аэродромного покрытия

$$P_u = \frac{\operatorname{ctg} \varphi + \varphi + \pi/2}{\operatorname{ctg} \varphi + \varphi - \pi/2} g \sum_{i=1}^n \rho_i t_i + k_o c \frac{\pi \operatorname{ctg} \varphi}{\operatorname{ctg} \varphi + \varphi - \pi/2} \quad (2.17)$$

где k_o – коэффициент, учитывающий условия работы грунта на контакте со слоем искусственного основания, тиксотропные изменения в грунте под действием повторных нагрузок, принимаемый равным [37]:

для связных грунтов (глинистых, пылеватых песков, песчано-гравийных смесей)

0,92 – на участках группы А,

1,15 – на участках группы Б и В,

1,33 – на участках группы Г,

для грунтов песчаных, галечниковых, ракушечника:

0,52 – на участках группы А,

0,65 – на участках группы Б и В,

0,76 – на участках группы Г.

Заменяя в формуле (1.33) начальное просадочное давление p_{sc} , получаемое по результатам лабораторных испытаний грунта, предельно допускаемым давлением p_u , получили формулу

$$\sigma_{zp} + \sigma_{zg} \leq p_u, \quad (2.18)$$

по которой проверяем условие давления на грунтовое основание конструкции, показанной на рис. 2.12.

Значения изгибающих моментов от ВС, удовлетворяющих условию (1.29, 1.30), и соответствующие значения толщин конструкции, приведенной на рис. 2.12, показаны в табл. 2.18. В табл. 2.19 приведен вид грунта для соответствующих вариантов конструкции. Для наглядности на рис. 2.13 значения толщин конструкции изображены в виде гистограмм.

Таблица 2.18

Вариант	Тип нагрузки	Толщины слоев, м			m_d , кН·м/м	m_u , кН·м/м
		t	t_{o1}	t_{o2}		
1	B777-300ER	0,44	0,5	0	105,59	105,84
2		0,45	0,36	0,5	109,34	110,70
3		0,43	0,5	0	101,06	101,08
4		0,43	0,5	0	99,09	101,08
5	B777-300	0,4	0,5	0	86,86	87,47
6		0,41	0,36	0,5	90,21	91,90
7		0,39	0,5	0	82,95	83,15
8		0,39	0,5	0	81,57	83,15

Вариант	Тип нагрузки	Толщины слоев, м			m_d , кН·м/м	m_u , кН·м/м
		t	t_{o1}	t_{o2}		
9	A330-200	0,37	0,5	0	73,66	74,84
10		0,37	0,36	0,5	74,29	74,84
11		0,37	0,5	0	72,67	74,84
12		0,36	0,5	0	70,14	70,85
13	B777-200	0,33	0,5	0	59,27	59,53
14		0,34	0,36	0,5	61,75	63,20
15		0,33	0,5	0	58,27	59,53
16		0,32	0,5	0	55,56	55,98
17	A321-100	0,32	0,5	0	55,76	55,98
18		0,33	0,36	0,5	57,87	59,53
19		0,32	0,5	0	55,03	55,98
20		0,32	0,5	0	54,35	55,98

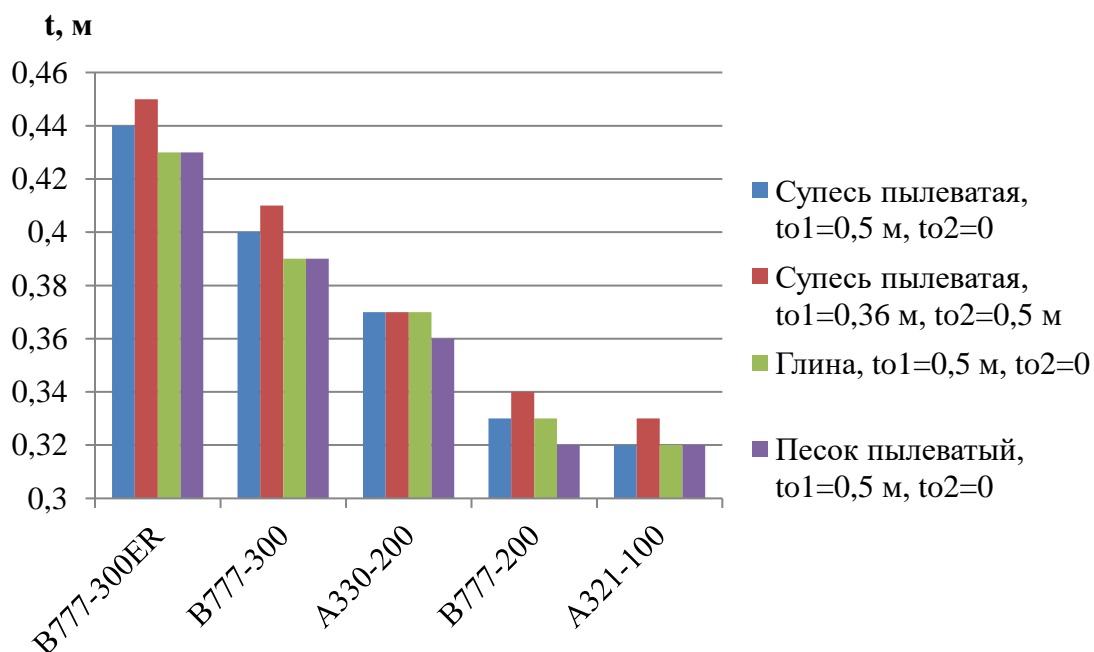


Рисунок 2.13 – Толщины конструкции, при которых выполняется условие предельного состояния по прочности бетонного покрытия

Результаты расчета сжимающих напряжений в грунте и допустимого безопасного давления приведены в табл. 2.19 и на рис. 2.14–2.17.

Таблица 2.19

Вариант	Тип нагрузки	Вид грунта	$\sigma_{zp} + \sigma_{zg}$	P_u
1	B777-300ER	Супесь пылеватая	111,97	74,27
2		Супесь пылеватая	102,77	85,44
3		Глина	113,90	93,37
4		Песок пылеватый	114,96	283,45
5	B777-300	Супесь пылеватая	104,94	72,61
6		Супесь пылеватая	95,72	83,79
7		Глина	106,48	91,52
8		Песок пылеватый	107,30	276,49
9	A330-200	Супесь пылеватая	84,25	71,37
10		Супесь пылеватая	78,29	82,13
11		Глина	84,85	90,59
12		Песок пылеватый	85,69	271,27
13	B777-200	Супесь пылеватая	92,78	69,72
14		Супесь пылеватая	84,89	80,89
15		Глина	93,33	88,74
16		Песок пылеватый	94,13	264,32
17	A321-100	Супесь пылеватая	51,37	69,30
18		Супесь пылеватая	50,19	80,48
19		Глина	51,60	88,28
20		Песок пылеватый	51,80	264,32

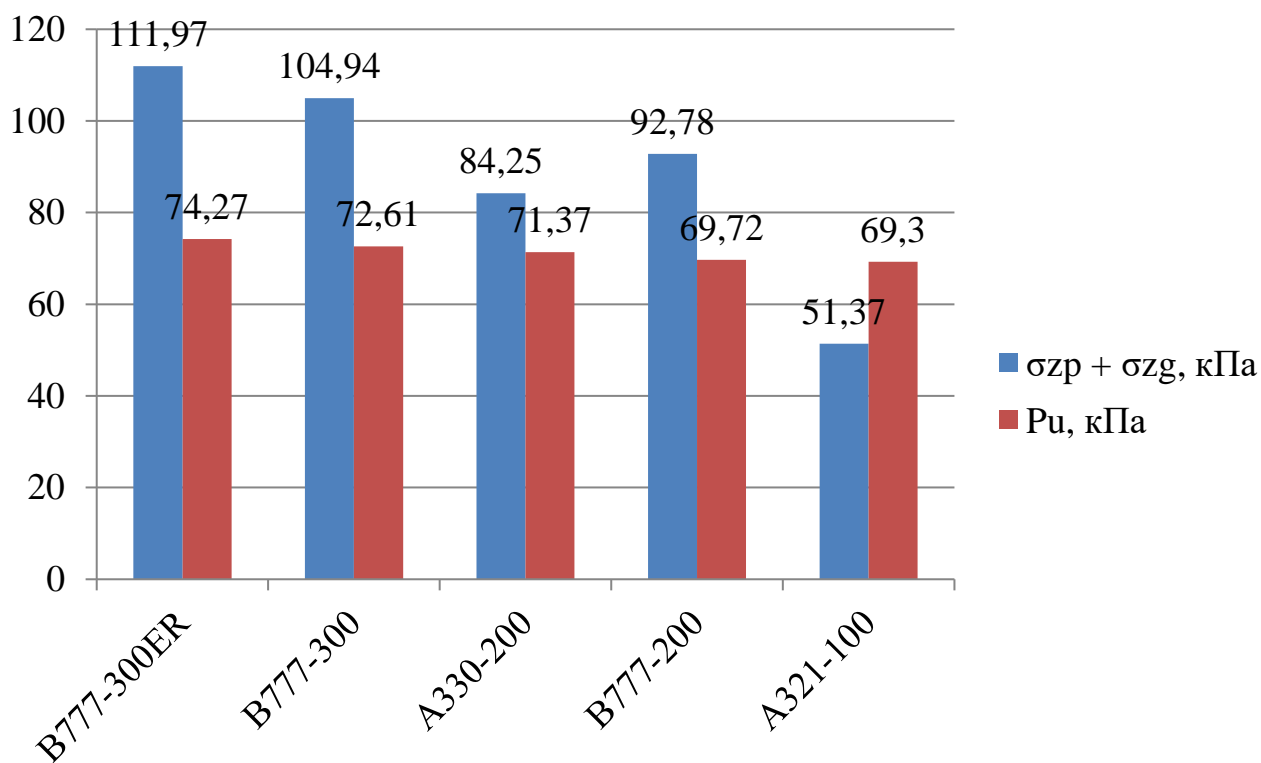


Рисунок 2.14 – Сжимающие напряжения в грунте и допустимое безопасное давление для вариантов 1, 5, 9, 13, 17 (супесь пылеватая)

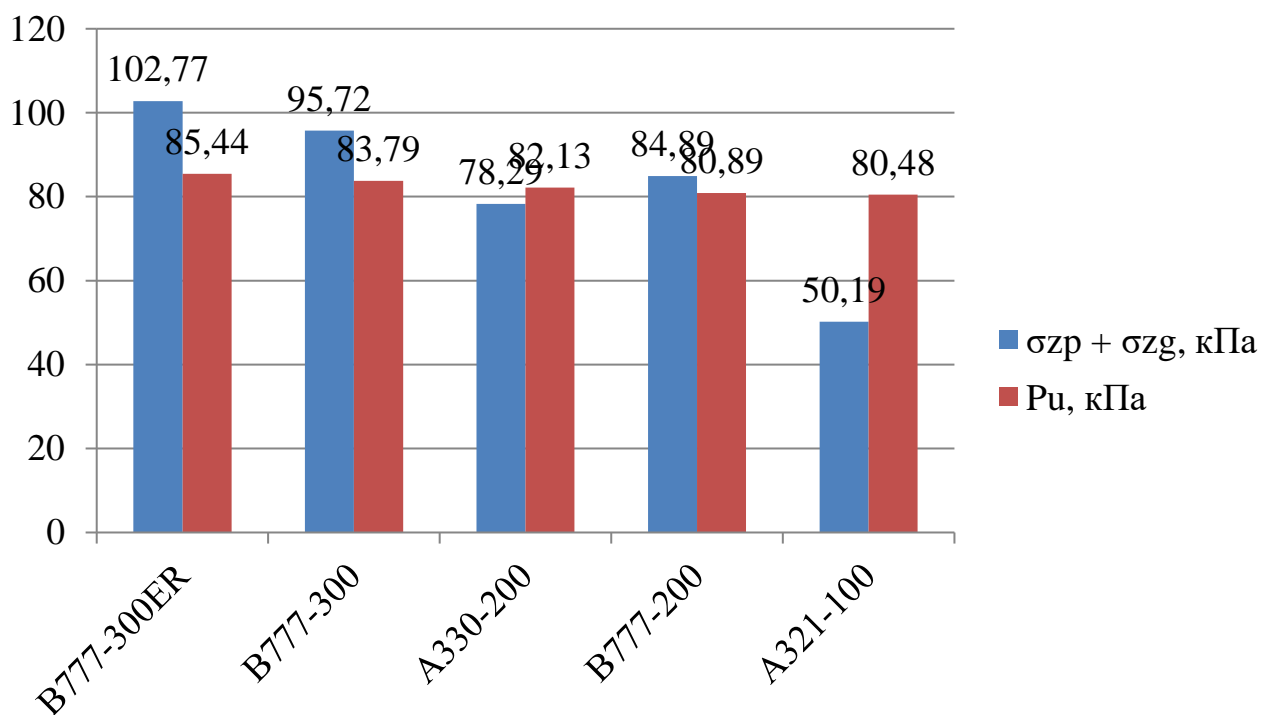


Рисунок 2.15 – Сжимающие напряжения в грунте и допустимое безопасное давление для вариантов 2, 6, 10, 14, 18 (супесь пылеватая)

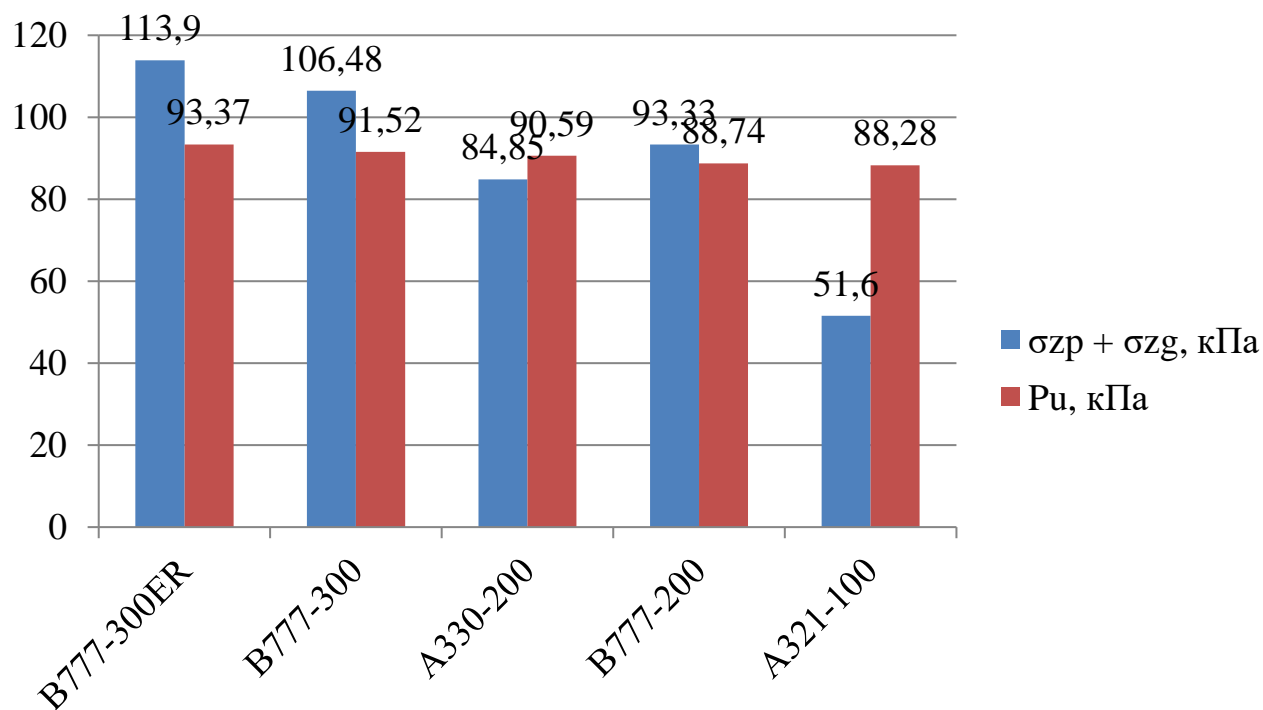


Рисунок 2.16 – Сжимающие напряжения в грунте и допустимое безопасное давление для вариантов 3, 7, 11, 15, 19 (глина)

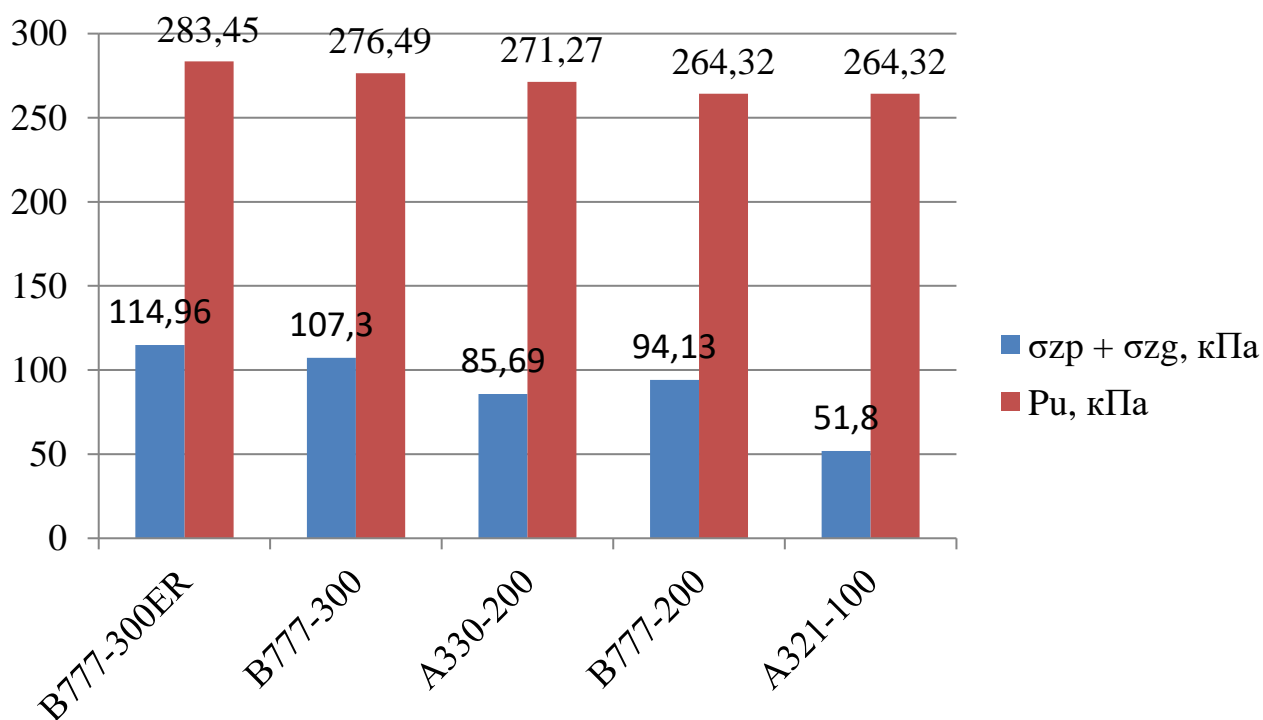


Рисунок 2.17 – Сжимающие напряжения в грунте и допустимое безопасное давление для вариантов 4, 8, 12, 16, 20 (песок пылеватый)

Из табл. 2.18 и 2.19 видно, что конструкции бетонных аэродромных покрытий, прочность которых удовлетворяет условиям (1.29, 1.30), могут быть недопустимыми по условию давления на грунтовое основание.

2.4 Выводы по главе 2

1. Выполненный анализ характеристик опор эксплуатируемых в настоящее время в отечественных аэропортах ВС показал, что характеристики опор современных ВС не соответствуют категориям нормативной нагрузки, используемым при расчете прочности жестких аэродромных покрытий. Поэтому в работе была разработана новая классификация ВС.

2. При разработке новой классификации ВС использован критерий прочности жесткого аэродромного покрытия по первому предельному состоянию для определения границ классов, соответствующих категориям нормативной нагрузки.

3. Границы классов по величине максимального изгибающего момента зависят от характеристик конструкции и основания, вида грунтов, климатических и гидрогеологических факторов. Все факторы в модели жесткого аэродромного покрытия представлены упругой характеристикой плиты.

4. Для формирования классов ВС составлена матрица планирования активного эксперимента по определению толщин бетонного покрытия и максимальных изгибающих моментов в зависимости от факторов – класса бетона и коэффициента постели основания для пяти категорий нормативной нагрузки. Определены значения функции отклика и составлены уравнения регрессии для каждой нормативной нагрузки.

5. Анализ уравнений регрессии показал, что уравнения эффективны и доминирующим фактором является коэффициент постели. Поэтому для определения границ классов приняты значения коэффициента постели 50 и 160 МН/м³ и класс бетона 4,4/55. Для этих значений по всем категориям нормативной нагрузки рас-

считаны эталонные значения упругой характеристики, используемой при определении максимальных изгибающих моментов для каждого типа ВС.

6. В результате численного анализа сформировано 6 классов нагрузок от ВС, соответствующих категориям нормативной нагрузки с четырехколесной опорой по значениям изгибающих моментов.

7. Для сравнения разработанной классификации по изгибающим моментам была выполнена классификация нагрузок от тех же типов ВС по нагрузке на одно колесо основной опоры и классификационным числам ACN. Анализ полученных классов позволяет сделать вывод, что классификация по изгибающим моментам практически совпадает с международной классификацией по ACN. Классификация по нагрузке на одно колесо дает большее расхождение результатов.

8. Согласно действующим нормам расчет бетонных и армобетонных аэродромных покрытий по давлению на грунтовое основание необходимо выполнять только для просадочных грунтов. Для проверки этого положения в работе была получена формула предельно допустимого давления на грунт и выполнен численный эксперимент по проверке прочности грунтового основания из супеси пылеватой, глины и песка пылеватого.

9. Численный анализ показал, что для конструкций бетонных аэродромных покрытий, условие прочности которых выполняется по первому предельному состоянию, может быть не выполнено условие прочности по давлению на грунтовое основание от современных тяжелых ВС. Поэтому рекомендуется для ВС 1-го класса дополнительно выполнять расчет прочности конструкции по критерию давления на грунтовое основание.

Глава 3 Разработка метода оценки несущей способности бетонного аэродромного покрытия по результатам испытаний опорами воздушных судов и автомобилей или штампами

В реальных условиях эксплуатации физико-механические характеристики конструктивных слоев аэродромных покрытий имеют стохастическую природу. В процессе эксплуатации под воздействием случайных факторов (нагрузки от ВС, климатические воздействия, условия эксплуатационного содержания) изменяются физико-механические свойства материалов конструкций аэродромных покрытий и грунтовых оснований. Изменяются геометрические характеристики грунтовых оснований (просадки, пучения). Эти воздействия изменяют случайным образом проектные характеристики конструкций.

Определить фактические характеристики для оценки несущей способности конструкций аэродромных покрытий и планирования режимов их эксплуатации возможно натурными исследованиями. Получаемые в результате натуральных испытаний данные являются случайными величинами. Поэтому для повышения надежности получаемых оценок несущей способности необходимо применение вероятностно-статистических методов.

Для аэродромов, длительное время находящихся в эксплуатации, наиболее достоверная оценка несущей способности может быть получена в результате их комплексного исследования.

Основными этапами комплексного исследования являются [11]:

обследование поверхности аэродромных покрытий с оценкой их технического состояния;

натурные испытания аэродромных покрытий нагрузками от штампов, опор ВС или других транспортных средств;

отбор кернов из конструкции покрытия и проб грунта;

лабораторные испытания образцов-кернов и грунтов;

определение характеристик несущей способности конструкций аэродромных покрытий;

оценка допустимой нагрузки на конструкции по фактическим характеристикам, полученным в результате обследования и испытаний аэродромных покрытий;

определение кода PCN участков аэродромных покрытий;

планирование режимов эксплуатации аэродромных покрытий воздушными судами по методу ACN–PCN.

Полный объем комплексного исследования выполняется, как правило, в конце проектного срока службы аэродромного покрытия. Также комплексное исследование аэродромного покрытия выполняется при резком ухудшении его технического состояния или необходимости ввода в эксплуатацию новых типов ВС, нагрузки от которых превышают нагрузки от эксплуатируемых ВС. Регулярно (не реже одного раза за пять лет) выполняется визуальное обследование поверхности аэродромных покрытий с оценкой их технического состояния, определение кода PCN участков аэродромных покрытий и планирование режимов эксплуатации аэродромных покрытий воздушными судами по методу ACN–PCN. Оценка несущей способности в этом случае выполняется по проектным данным или результатам ранее выполненных испытаний с учетом оценки технического состояния.

При оценке несущей способности по проектным данным применяется детерминированный метод расчета допустимой нагрузки на аэродромные покрытия в соответствии с проектными нормами [97].

Оценка несущей способности аэродромных покрытий при полном комплексном исследовании выполняется по вероятностно-статистической модели с использованием нормативного метода расчета допустимой нагрузки.

Результатом натурных и лабораторных испытаний конструкций аэродромных покрытий являются статистические ряды характеристик несущей способности. Оценка несущей способности по результатам испытаний выполняется с использованием методов математической статистики. Использование нормативного метода расчета при этом позволяет сопоставлять величину допустимой нагрузки на конструкцию аэродромного покрытия, определяемую при проектировании и оценке. В настоящее время при проектировании аэродромных покрытий требует-

ся определять код PCN запроектированной конструкции. Классификационное число покрытия, определенное при проектировании, является начальной точкой системы координат оценки несущей способности. Последующие оценки, выполняемые в процессе эксплуатации, должны выполняться теми же методами, чтобы измеряться в той же системе координат.

Рассмотрим более подробно основные этапы комплексного исследования бетонных аэродромных покрытий.

3.1 Обследование поверхности аэродромных покрытий с оценкой их технического состояния

Классификационное число PCN при оценке аэродромного покрытия, находящегося в стадии эксплуатации, определяется с учетом фактического технического состояния поверхности покрытия.

Согласно [38] техническое состояние поверхности покрытия – состояние покрытия, которое характеризуется наличием или отсутствием дефектов поверхности, типы и размеры которых определяются при визуальном обследовании покрытия. Одним из методов оценки технического состояния бетонного покрытия является «сигнальная оценка». По этому методу поверхность покрытия оценивается по пятибалльной шкале индексом качества поверхности S_k . Оценку S_k для жестких покрытий рассчитывают по формуле [37, 38]

$$S_k = 5 - \left(\frac{N_{\text{тр}}}{N_{\text{общее}}} \cdot S_{\text{тр}} + \frac{N_{\text{ск}}}{N_{\text{общее}}} \cdot S_{\text{ск}} + \frac{N_{\text{ш}}}{N_{\text{общее}}} \cdot S_{\text{ш}} \right), \quad (3.1)$$

где $N_{\text{тр}}, N_{\text{ск}}, N_{\text{ш}}$ – число плит соответственно с трещинами, сколами и шелушением поверхности;

$N_{\text{общее}}$ – общее количество оцениваемых плит;

$S_{\text{тр}}, S_{\text{ск}}, S_{\text{ш}}$ – коэффициенты весомости соответствующих дефектов.

Для коэффициентов весомости дефектов в [38] приняты значения:

$$S_{\text{тр}} = 0,05; S_{\text{ск}} = 0,10; S_{\text{ш}} = 0,03.$$

Фактическое эксплуатационно-техническое состояние поверхности покрытия учитывается при оценке его несущей способности понижающим коэффициентом K_e к классификационному числу PCN. В табл. 3.1 приведены значения понижающего коэффициента K_e для бетонного покрытия в зависимости от индекса качества поверхности S_k из методики [37]

Таблица 3.1

S_k	[4,5; 5]	(4,2; 4,5)	(3,9; 4,2]	(3,6; 3,9]	(3,3; 3,6]	(3,0; 3,3]	[2,5; 3,0]
K_e	1,00	0,98	0,96	0,94	0,92	0,90	0,88

При значении $S_k < 2,5$ состояние покрытия оценивается как неудовлетворительное, а стадия эксплуатации – закритическая. Поэтому при значении индекса качества меньше 2,5 оценка классификационного числа не выполняется.

Оценка технического состояния индексом качества S_k является наиболее простой по сравнению с оценкой индексом сохранения MI и индексом PCI .

Индекс сохранения MI учитывает 7 видов дефектов, каждый из которых ранжируется по размерам дефектов и степени их проявления. Оценка по индексу MI принимает значения от 0 до 5.

При оценке технического состояния жестких аэродромных покрытий индексом PCI учитывается 15 видов повреждений и дефектов.

Если в дальнейшем планируются натурные испытания, то при визуальном обследовании поверхности бетонных покрытий намечаются точки установки испытательных средств. Количество точек испытаний определяется по условию [38] $N_T \geq z_p^2 \frac{v^2}{\delta^2}$, где $z_p = 1,64$ – аргумент нормированного нормального распределения, определяемый в зависимости от заданного уровня надежности $P = 1 - \alpha/2$; v – коэффициент вариации прогибов, определяемый на основе априорной информации испытаний аналогичных объектов; δ – максимально допускаемая ошибка при измерениях, принимаемая при инженерных расчетах до 0,05(5%).

На испытываемых плитах не должно быть сквозных трещин или они должны быть расположены за пределами предполагаемой чаши прогиба от испытательной

нагрузки. Предполагаемая чаша прогиба должна также находиться полностью в пределах плиты, т.к. характеристики напряженно-деформированного состояния бетонного покрытия определяются при центральном загрузении. Изгибающий момент при краевом загрузении учитывается коэффициентом k (см. формулу 1.31).

3.2 Существующий метод определения расчетных характеристик бетонных покрытий по испытаниям штампами

Натурные испытания аэродромных покрытий выполняются для определения фактических характеристик их несущей способности. Для этой цели используются ВС или другие транспортные средства, а также штампы [36, 41, 69]. При нагружении конструкций испытательными средствами измеряются прогибы поверхности плиты, по которым определяются упругая характеристика плиты и коэффициент постели основания.

В настоящее время согласно действующему нормативному документу [38] для определения расчетных характеристик плиты при испытании штампами используется объем чаши прогиба и максимальный прогиб от нагрузки.

Величину упругой характеристики определяют по формуле [36, 38]

$$l = \sqrt{\frac{0,12V}{W_{max}}}, \quad (3.2)$$

где V – объем чаши прогиба;

W_{max} – максимальный прогиб покрытия от нагрузки.

Величину коэффициента упругой реакции основания под плитой (коэффициента постели) определяют по формуле [36, 38]

$$K_s = \frac{F}{V}, \quad (3.3)$$

где F – нагрузка, действующая на покрытие.

Объем чаши прогиба определяют по формуле усеченного конуса [36]

$$V = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^n h_i (R_i^2 + r_i R_i + r_i^2), \quad (3.4)$$

где R_i – максимальный радиус элемента усеченного конуса чаши прогиба;

r_i – минимальный радиус элемента усеченного конуса чаши прогиба;

h_i – высота элемента усеченного конуса чаши прогиба;

n – количество элементов усеченного конуса, на которые делится фактическая чаша прогиба.

Как показал опыт применения этого метода [36], точность оценки объема чаши прогиба в значительной мере зависит от точности определения величины радиуса чаши прогиба, т.е. расстояния от центра штампа до точки покрытия, в которой прогиб равен нулю. Как правило, эта точка определяется по интерполяции, что снижает точность оценки упругой характеристики и коэффициента постели.

Также следует отметить, что нагрузки от штампа не соответствуют воздействию на аэродромные покрытия многоколесных опор современных ВС. При штамповых испытаниях глубина активной зоны, т.е. деформируемой толщи грунта, меньше, чем от многоколесной опоры. Поэтому если в основании покрытия в пределах глубины активной зоны имеется слабая прослойка грунта, то нагрузки на штамп может оказаться недостаточно для ее выявления [36]. Испытания бетонных аэродромных покрытий многоколесными опорами ВС или других транспортных средств обеспечивают более точную оценку несущей способности по сравнению с испытаниями штампами. Предлагаемая в данной диссертационной работе методика предназначена для оценки несущей способности бетонных аэродромных покрытий опорами и штампами.

3.3 Методика планирования испытаний бетонных аэродромных покрытий

Перед испытаниями выбирается испытательная нагрузка, и планируются координаты точек измерения прогибов. Испытательная нагрузка не должна вызывать в конструкции недопустимые прогибы и изгибающие моменты. Для их предварительной оценки используются проектные данные о конструкции, результаты

предыдущих исследований, характеристики эксплуатируемых ВС и другая информация. С другой стороны, нагрузки от испытательных средств должны вызывать в покрытии прогибы, которые можно измерить с помощью имеющихся средств измерений. В настоящее время такие измерения выполняют высокоточными нивелирами с точностью измерения до сотых долей миллиметра.

Рассмотрим методику планирования испытаний конструкции бетонного покрытия, схема которого показана на рис. 3.1. Такая конструкция является общим случаем для конструкций однослойных бетонных покрытий. Она описывается моделью плиты на упругом основании Винклера, для которой уравнение изгиба в цилиндрических координатах имеет вид [147]

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\right) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r}\right) = \frac{q - K_{se} w}{B_{tot}}, \quad (3.5)$$

где w – прогиб плиты в точке с цилиндрической координатой r ;

q – нагрузка;

K_{se} – эквивалентный коэффициент постели естественного и искусственного основания;

B_{tot} – суммарная жесткость покрытия и упрочненного основания, определяемая при значении коэффициента Пуассона $\mu = 0,15$ по формуле

$$B_{tot} = 0,085(E_b t^3 + E_f t_f^3). \quad (3.6)$$

Эквивалентный коэффициент постели для двухслойного искусственного основания и грунта (см. рис. 3.1) определяется по формулам

$$\begin{aligned} \alpha_2 &= \frac{t_{s2}[1,6D_r - (t_{s1} + 0,5t_{s2})]}{t_{s1}(1,6D_r - 0,5t_{s1})}; \\ \alpha_3 &= \frac{0,5[1,6D_r - (t_{s1} + t_{s2})]^2}{t_{s1}(1,6D_r - 0,5t_{s1})}; \\ K_{se} &= \frac{K_{s1} + K_{s2}\alpha_2 + K_{s3}\alpha_3}{1 + \alpha_2 + \alpha_3}, \end{aligned} \quad (3.7)$$

где D_r – условный диаметр круга передачи нагрузки на основание, м.

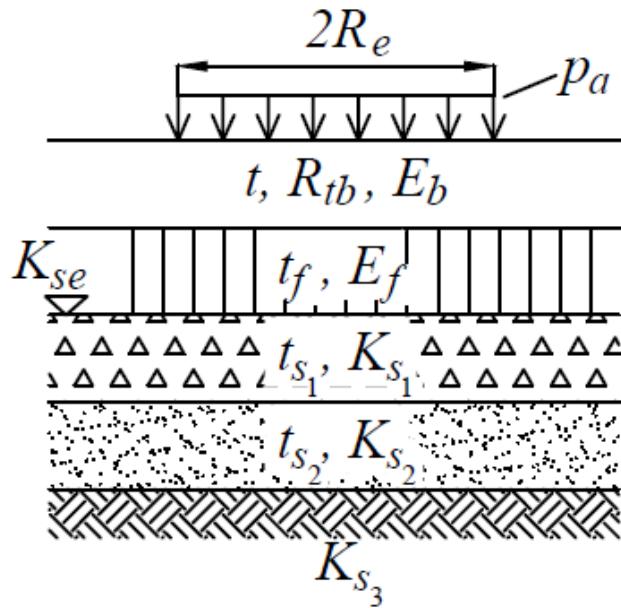


Рисунок 3.1 – Расчетная схема конструкции бетонного аэродромного покрытия на упрочненном искусственном основании:

- R_e – радиус круга нагрузки, равновеликого площади отпечатка колеса, м;
- p_a – внутреннее давление в пневматиках колес, МПа;
- t, t_f, t_{s_i} – толщины соответственно слоев бетонного покрытия, упрочненного основания и искусственного основания, м;
- R_{tb} – расчетное сопротивление бетона растяжению при изгибе, МПа;
- E_b, E_f – модули упругости бетона покрытия и материала упрочненного основания, МПа;
- K_{s_i} – коэффициенты постели искусственного и грунтового основания, $\text{МН/м}^3, i = 1, 2, 3$;
- K_{se} – эквивалентный коэффициент постели, МН/м^3 .

В зависимости от вида испытательного средства используются две методики планирования и обработки результатов испытаний:

- для испытаний опорами ВС и наземной техники;
- для испытаний штампами.

Планирование испытаний бетонных аэродромных покрытий заключается в выборе испытательной нагрузки и определении координат точек измерения прогибов, на которые при испытаниях устанавливаются марки-рейки для измерения высотных отметок поверхности покрытия.

3.3.1 Планирование испытаний опорами воздушных судов и автомобилей

Расчет допустимой нагрузки на опору предварительно выполняется по условиям прочности (1.29, 1.30). Для расчета однослойного бетонного покрытия на упрочненном основании используются следующие исходные данные:

толщины слоев покрытия и основания;
характеристики материалов конструктивных слоев, показанные на рис. 3.1;
характеристики испытательной нагрузки, необходимые для расчета радиуса круга R_e .

Радиус круга колеса испытательной нагрузки определяется по формуле

$$R_e = \sqrt{\frac{F_k}{\pi p_a}}, \quad (3.8)$$

где F_k – нагрузка на колесо, определяемая по формуле

$$F_k = \frac{k_m F_n}{n_k}, \quad (3.9)$$

где F_n – вес испытательной нагрузки;

k_m – доля веса на основную опору;

n_k – число колес на основной опоре.

Для расчета прогибов от испытательной нагрузки используется схема нагружения бетонного покрытия, которая показана на рис. 3.2.

На схеме рис. 3.2 координаты нагрузки и точек измерения прогибов записываются в двух системах координат, совмещенных по вертикальной оси. Слева записаны координаты центров колес опоры в системе (x, y) справа – координаты расстановки марок-реек для измерения прогибов в системе (x^t, y^t, w^t) . Ось w^t направлена вниз. Координаты колес обозначаются нижними индексами, координаты точек измерения прогибов – верхними.

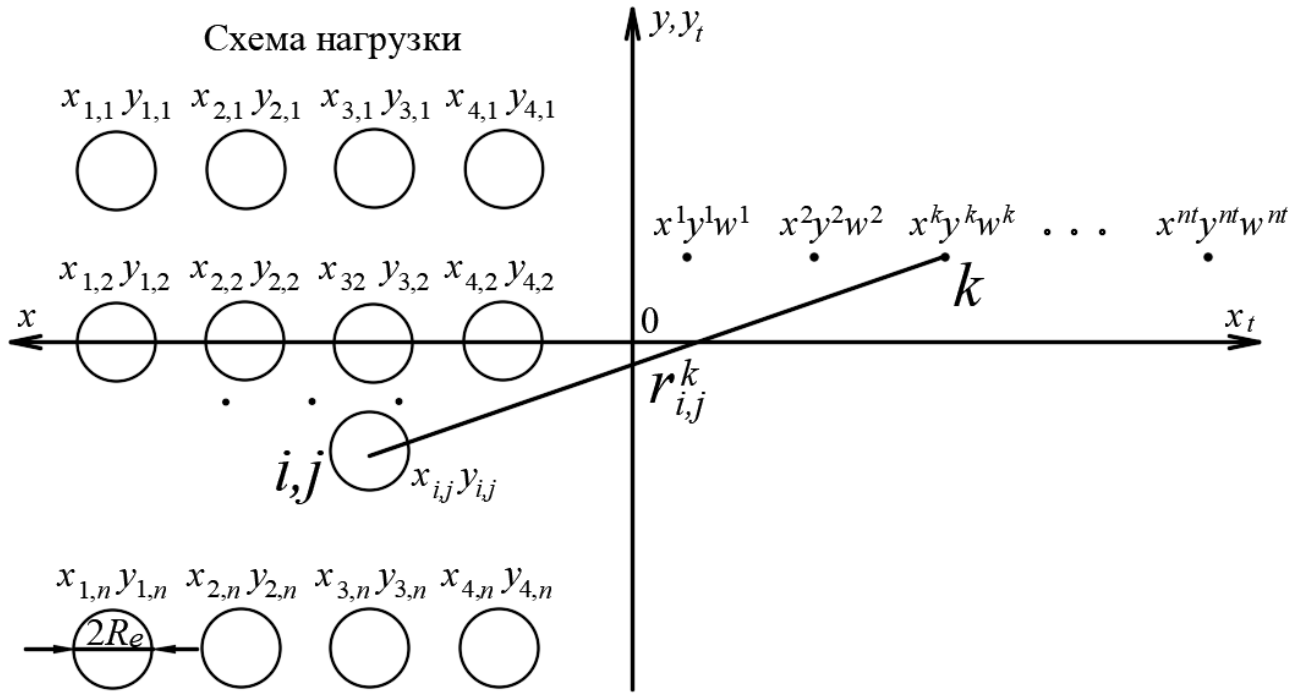


Рисунок 3.2 – Схема измерения прогибов от нагрузки

При такой схеме расстояние от i,j -го колеса до k -й точки измерения прогибов равно

$$r_{i,j}^k = \sqrt{(x_{i,j} + x^k)^2 + (y_{i,j} - y^k)^2}. \quad (3.10)$$

Так как расчетная схема рис. 3.2 используется только для определения расстояний $r_{i,j}^k$ между колесами и точками измерения прогибов, она может рассматриваться отраженной зеркально относительно оси y, y_t .

Количество точек измерения прогибов и координаты их размещения определяется таким образом, чтобы минимальное расстояние от колес опоры до наиболее удаленной точки измерения $r_{i,j}^{nt}$ (см. схему рис. 3.2) было больше прогнозируемой упругой характеристики плиты, определяемой при предварительной оценке.

Предварительный расчет прогибов в покрытии выполняется с помощью решения уравнения (3.5). Определим прогиб конструкции, изображенной на рис. 3.1, от опоры, схема которой приведена на рис. 3.2. Прогиб конструкции покрытия в точке (x, y) от нагрузок всех колес опоры равен

$$w(x, y) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n w_{i,j}(x, y), \quad (3.11)$$

где $w(x, y)$ – прогиб конструкции покрытия в точке (x, y) от опоры;

$w_{i,j}(x, y)$ – прогиб конструкции покрытия в точке (x, y) при нагрузке от i, j -го колеса опоры;

n – число колес на одной оси опоры;

m – число осей на опоре.

При планировании испытаний и обработке их результатов рассчитывается дискретное множество точек расположения марок-реек. Поэтому перейдем в формуле (3.11) от обозначений точки в координатах (x, y) к обозначениям точек номерами. Формулу (3.11) перепишем в виде

$$w^k = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n w_{i,j}^k, \quad (3.12)$$

где w^k – прогиб конструкции покрытия в точке (x^k, y^k) , см. схему рис. 3.2;

k – номер точки расположения марки-рейки, $k = 1, 2, \dots, nt$;

nt – количество марок-реек.

Для расчета прогибов в точке k определяется приведенное расстояние от точки до колес опоры по формуле

$$\xi_{i,j}^k = \frac{r_{i,j}^k}{l}, \quad (3.13)$$

где l – упругая характеристика плиты, м.

Для конструкции, показанной на рис. 3.1, упругая характеристика плиты определяется по формуле

$$l = \sqrt[4]{\frac{B_{tot}}{K_{se}}}. \quad (3.14)$$

При расчете прогибов $w_{i,j}^k$ для формулы (3.12) рассматриваются два варианта: нагрузка от колес опоры задается распределенной по площади круга радиуса R_e или сосредоточенной. Рассмотрим оба варианта.

1. При нагрузке, распределенной по площади круга, приведенный радиус круга распределения нагрузки равен

$$\alpha = \frac{R_e}{l}. \quad (3.15)$$

Прогиб в точке k от колеса с номером i, j определяется по формуле [48]

$$w_{i,j}^k = -\frac{\pi q \alpha}{2K_{se}} [v'_0(\alpha) f_0(\xi_{i,j}^k) + u'_0(\alpha) g_0(\xi_{i,j}^k)]; \quad (3.16)$$

где $q = F_k / (\pi R_e^2)$ – нагрузка на единицу площади отпечатка колеса, МПа;

$f_0(x)$, $g_0(x)$ – соответственно действительная и мнимая части функции

Ганкеля [46, 50]:

$$f_0(x) = \frac{u_0(x)}{2} + \frac{2}{\pi} \left\{ \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m \cdot x^{4m-2}}{[(2m-1)!]^2 \cdot 2^{4m-2}} \cdot \sum_{k=1}^{2m-1} \frac{1}{k} - v_0(x) \cdot \ln \frac{vx}{2} \right\};$$

$$v = \exp C;$$

C – постоянная Эйлера;

$$g_0(x) = \frac{v_0(x)}{2} + \frac{2}{\pi} \left\{ \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m \cdot x^{4m+4}}{[(2m+1)!]^2 \cdot 2^{4m+4}} \cdot \sum_{k=1}^{2m+2} \frac{1}{k} + u_0(x) \cdot \ln \frac{vx}{2} \right\};$$

$u_0(x)$, $v_0(x)$ – соответственно действительная и мнимая части функции

Бесселя [46, 50]:

$$u_0(x) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m \cdot x^{4m}}{[(2m)!]^2 \cdot 2^{4m}};$$

$$v_0(x) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m \cdot x^{4m-2}}{[(2m-1)!]^2 \cdot 2^{4m-2}};$$

$u'_0(x)$, $v'_0(x)$ – производные соответственно действительной и мнимой ча-

стей функции Бесселя:

$$u'_0(x) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m \cdot 4m \cdot x^{4m-1}}{[(2m)!]^2 \cdot 2^{4m}};$$

$$v'_0(x) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m \cdot (4m-2) \cdot x^{4m-3}}{[(2m-1)!]^2 \cdot 2^{4m-2}}.$$

Подставив выражение (3.16) в формулу (3.12), запишем прогиб конструкции в точке k в виде

$$\begin{aligned} w^k &= \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n -\frac{\pi q \alpha}{2K_{se}} [v'_0(\alpha) f_0(\xi_{i,j}^k) + u'_0(\alpha) g_0(\xi_{i,j}^k)] = \\ &= -\frac{\pi q \alpha}{2K_{se}} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n [v'_0(\alpha) f_0(\xi_{i,j}^k) + u'_0(\alpha) g_0(\xi_{i,j}^k)]. \end{aligned} \quad (3.17)$$

2. При сосредоточенной нагрузке прогиб в точке k от колеса с номером i, j определяется по формуле [48]

$$w_{i,j}^k = -\frac{F_k}{4l^2 K_{se}} f_0(\xi_{i,j}^k). \quad (3.18)$$

Суммарный прогиб конструкции в точке k от сосредоточенной нагрузки равен

$$w^k = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n -\frac{F_k}{4l^2 K_{se}} f_0(\xi_{i,j}^k) = -\frac{F_k}{4l^2 K_{se}} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n f_0(\xi_{i,j}^k). \quad (3.19)$$

При планировании испытаний опорами предварительно принимается тип и вес испытательного средства, удовлетворяющие условиям прочности (1.29, 1.30), определяется нагрузка на колесо и радиус круга распределения нагрузки. В соответствии с расчетной схемой рис. 3.2 задаются координаты точек измерения прогибов. По формуле (3.12) определяются прогибы в заданных точках измерения. Полученные значения сравниваются с минимально и максимально допустимыми. Минимальные значения w_{min} соответствуют характеристикам измерительной аппаратуры. Максимальные значения w_{max} задаются с учетом недопустимости появления в покрытии разрушений из-за превышения допустимой нагрузки. Прогибы в точках, расположенных в непосредственной близости от ближайшего колеса опоры, должны удовлетворять условию $w_{min} \leq w \leq w_{max}$. При невыполнении этого условия нагрузка от испытательного средства увеличивается или уменьшается или выбирается другое испытательное средство, и повторяется расчет прогибов w_k . Если условие выполнено, выполняются натурные испытания рассчитанной нагрузкой по схеме рис. 3.2.

3.3.2 Планирование испытаний штампами

Для испытаний может быть использован гидравлический домкрат. Нагрузка на бетонное покрытие передается через металлический штамп диаметром 35,7 см со сквозными отверстиями по центру и краям диаметром 10 мм.

Измерение прогибов поверхности покрытия выполняется индикаторами часового типа с ценой деления 0,01 мм.

Рассмотрим планирование точек испытаний и определение нагрузки на штамп для испытаний жесткого покрытия. Как видно из схемы рис. 3.3, две точки измерения находятся непосредственно под штампом, остальные $nt - 2$ точки расположены справа и слева от штампа. При решении задачи планирования испытаний прогибы, расположенные на одинаковых расстояниях справа и слева от точки «0», равны между собой. Поэтому достаточно определить теоретические прогибы в точках, расположенных правее точки «0».



Рисунок 3.3 – Схема измерения прогибов штампом

Координата последней точки nt должна быть больше упругой характеристики плиты. Это связано с физическим смыслом упругой характеристики плиты или «радиуса относительной жесткости» Вестергаарда [74]. Упругая характеристика плиты – это расстояние от центра нагрузки на плиту до точки перегиба в плите (см. рис. 3.4). Величина упругой характеристики является искомой при обработке результатов испытаний. Поэтому важно выполнить измерение прогибов поверхности покрытия, включая прогнозируемую координату точки перегиба.

Прогибы определяются в зависимости от расположения точек измерения относительно штампа. Найдем приведенный радиус нагрузки от штампа

$$\alpha = \frac{R}{l}, \quad (3.20)$$

где R – радиус штампа.

Приведенное расстояние от центра штампа до точки k равно

$$\xi_k = \frac{x_k}{l}, \quad (3.21)$$

где x_k – координата точки k (см. рис. 3.3).

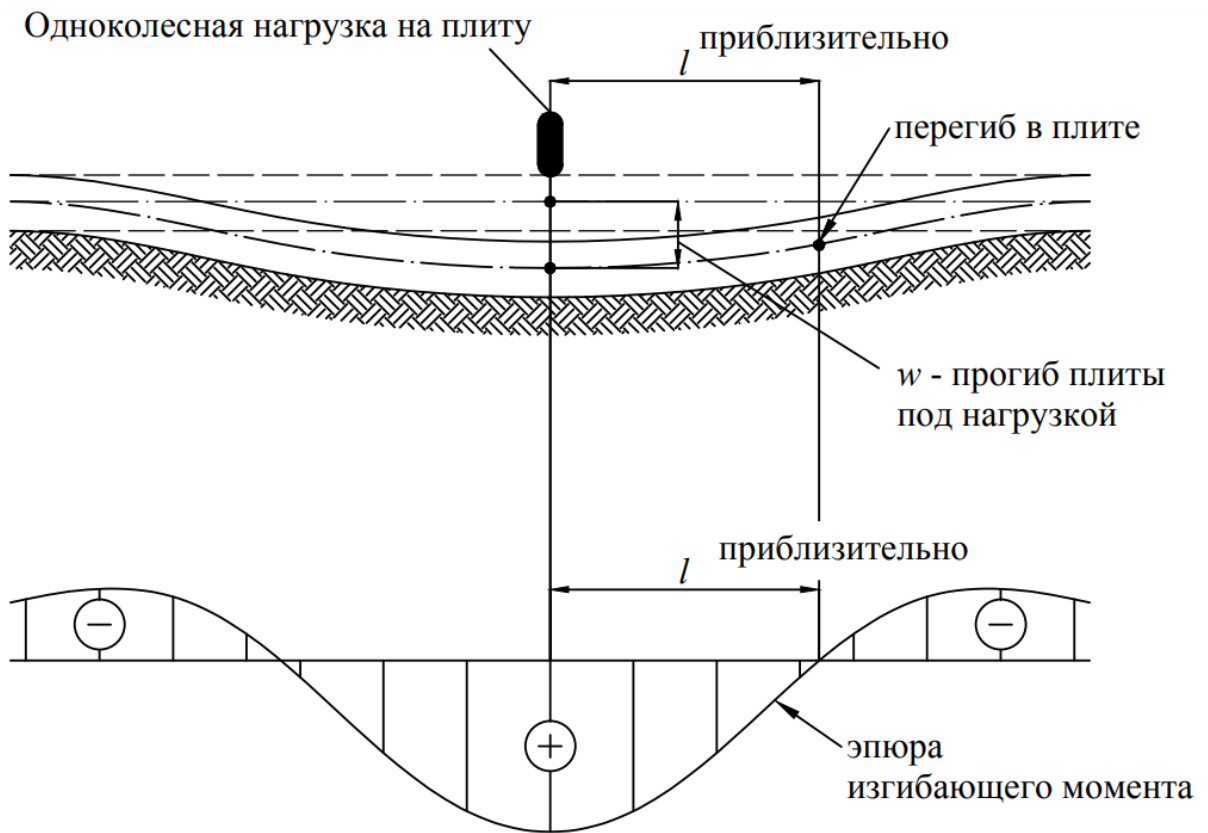


Рисунок 3.4 – Физическое значение упругой характеристики плиты

Прогибы от воздействия нагрузки от штампа, распределенной по площади круга приведенного радиуса α , определяются по формулам [48]

при $\xi_k \leq \alpha$

$$w_k = -\frac{\pi q \alpha}{2K_s} \left[-\frac{2}{\pi \alpha} + g'_0(\alpha)u_0(\xi_k) + f'_0(\alpha)v_0(\xi_k) \right]; \quad (3.22)$$

при $\xi_k > \alpha$

$$w_k = -\frac{\pi q \alpha}{2K_s} [v'_0(\alpha) f_0(\xi_k) + u'_0(\alpha) g_0(\xi_k)]; \quad (3.23)$$

где q – нагрузка на единицу площади штампа, МПа;

$f'_0(x), g'_0(x)$ – производные соответственно действительной и мнимой частей функции Ганкеля:

$$f'_0(x) = \frac{u'_0(x)}{2} + \frac{2}{\pi} \left\{ \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m \cdot (4m-2) \cdot x^{4m-3}}{[(2m-1)!]^2 \cdot 2^{4m-2}} \cdot \sum_{k=1}^{2m-1} \frac{1}{k} - v'_0(x) \cdot \frac{2}{vx} \right\};$$

$$g'_0(x) = \frac{v'_0(x)}{2} + \frac{2}{\pi} \left\{ \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m \cdot (4m+4) \cdot x^{4m+3}}{[(2m+1)!]^2 \cdot 2^{4m+4}} \cdot \sum_{k=1}^{2m+2} \frac{1}{k} + u'_0(x) \cdot \frac{2}{vx} \right\}.$$

При планировании испытаний штампом предварительно задается величина нагрузки F и определяется значение $q = F/(\pi R^2)$. По формулам (3.22, 3.23) вычисляются прогибы поверхности покрытия в заданных точках. Значения прогибов сравниваются с минимально и максимально допустимыми значениями. Минимальные и максимальные прогибы задаются аналогично планированию испытаний опорами. Прогибы в точках под штампом и в непосредственной близости от него должны удовлетворять условию $w_{min} \leq w \leq w_{max}$. При невыполнении этого условия нагрузка на штамп увеличивается или уменьшается, и повторяется расчет прогибов w_k . Если условие выполнено, выполняются натурные испытания рассчитанной нагрузкой по схеме рис. 3.3.

Для проверки адекватности применения формул (3.22, 3.23) были рассчитаны прогибы однослойного бетонного покрытия при воздействии нагрузки 200 кН от штампа диаметром 0,56 м. Характеристики покрытия и сравнение результатов расчета с данными натурных испытаний, опубликованными А.П. Степушиным [100], приведены в табл. 3.2. Теоретические значения прогибов с точностью до 20% и лишь в отдельных случаях до 30% корреспондируют с фактическими значениями. Как видно из табл. 3.2, приведенные формулы адекватны натурным испытаниям. Разница в полученных результатах незначительна и может быть связана с изменчивостью условий измерения прогибов (свойств грунтового и искусственного основания, а также бетонного покрытия).

Таблица 3.2

Толщина бетонной плиты, м	Тип и толщина искусственного основания	Среднее значение фактических прогибов, мм	Теоретические прогибы, мм
0,20	Грунтоцемент толщиной 0,3 м	0,31	0,387
0,20	Грунтоцемент толщиной 0,24 м	0,33	0,463
0,28	Песок толщиной 0,18 м	0,32	0,374
0,24	Песок толщиной 0,22 м	0,36	0,453
0,20	Песок толщиной 0,26 м	0,43	0,571

3.4 Методика определения характеристик бетонного покрытия по результатам испытаний

3.4.1 Расчет упругой характеристики плиты бетонного покрытия

В процессе испытаний бетонных аэродромных покрытий опорами ВС или наземной техники дважды высокоточными нивелирами измеряют высотные отметки в заранее определенных точках поверхности покрытия по установленным на них маркам-рейкам. Первый раз измерения выполняют при нагружении покрытия опорой. Затем нагрузка перемещается на расстояние, на котором она не может оказывать воздействие на испытываемую конструкцию, и измерения высотных отметок по тем же маркам-рейкам повторяются. Фактические прогибы от воздействия опоры вычисляются как разность между отметками после удаления нагрузки и под нагрузкой.

На рис. 3.5 показан пример измерения прогибов бетонного покрытия опорой воздушного судна.



Рисунок 3.5 – Измерение прогибов покрытия опорой ВС:

- а) фото опоры и марок-реек при измерении прогиба покрытия под нагрузкой;
 б) фото опоры и марок-реек при измерении прогиба покрытия после снятия нагрузки

В результате испытаний бетонных покрытий определяются фактические прогибы w_{fact}^k в точках измерения $k = 1, \dots, nt$, показанных на рис. 3.2.

Оценка характеристик напряженно-деформированного состояния бетонного покрытия заключается в определении фактических значений упругой характеристики плиты и коэффициента постели основания, удовлетворяющих уравнению (3.5). Искомая упругая характеристика определяется из равенства теоретических прогибов, вычисляемых по формуле (3.12), и фактических прогибов, полученных в результате испытаний:

$$w_{fact}^k = w^k. \quad (3.24)$$

Подставляя выражение w^k из формулы (3.17), получим условие для определения упругой характеристики плиты при учете нагрузки от колес опоры распределенной по площади круга

$$w_{fact}^k = -\frac{\pi q \alpha}{2K_{se}} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n [v'_0(\alpha) f_0(\xi_{i,j}^k) + u'_0(\alpha) g_0(\xi_{i,j}^k)]. \quad (3.25)$$

Упругая характеристика плиты является аргументом функций Бесселя, выражаемых бесконечными тригонометрическими рядами. Она используется для определения приведенного расстояния от точек испытаний до колес опоры $\xi_{i,j}^k$ по формуле (3.13) и определения приведенного радиуса круга распределения нагрузки α по формуле (3.15). С учетом этого условие (3.25) можно переписать в виде

$$w_{fact}^k = -\frac{\pi q R_e}{2K_{se} l} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \left[v'_0\left(\frac{R_e}{l}\right) f_0\left(\frac{r_{i,j}^k}{l}\right) + u'_0\left(\frac{R_e}{l}\right) g_0\left(\frac{r_{i,j}^k}{l}\right) \right]. \quad (3.26)$$

Очевидно, что невозможно разрешить уравнение (3.26) в явном виде относительно l , т.к. она является аргументом функций Бесселя и Ганкеля.

Будем определять упругую характеристику косвенным путем, решая обратную задачу определения прогибов в зависимости от упругой характеристики. Для этого используем полученные при испытании фактические прогибы $w_{fact}^1, w_{fact}^2, \dots, w_{fact}^{nt}$ (см. схему рис. 3.2). Учитывая, что это результаты испытаний одной плиты, для всех фактических прогибов в уравнениях (3.26) аргументы q, R_e, K_{se}, l являются постоянными величинами. Найдем отношения фактических прогибов во всех парах точек. Запишем их в виде матрицы

$$\begin{Bmatrix} w_{fact}^a \\ w_{fact}^b \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{w_{fact}^1}{w_{fact}^2} & \frac{w_{fact}^1}{w_{fact}^3} & \frac{w_{fact}^1}{w_{fact}^4} & \dots & \frac{w_{fact}^1}{w_{fact}^{nt}} \\ 0 & \frac{w_{fact}^2}{w_{fact}^3} & \frac{w_{fact}^2}{w_{fact}^4} & \dots & \frac{w_{fact}^2}{w_{fact}^{nt}} \\ & & \dots & & \\ 0 & \dots & 0 & \frac{w_{fact}^{nt-1}}{w_{fact}^{nt}} & \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

где $a = 1, \dots, nt - 1$ – номер расчетной точки (см. рис. 3.2);

$b = a + 1, \dots, nt$ – номера точек, следующих за расчетной точкой.

Соответствующие отношения теоретических прогибов при учете нагрузки распределенной по площади круга можно записать в виде

$$\begin{aligned} \frac{w^a}{w^b} &= \frac{-\frac{\pi q R_e}{2K_{se} l} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \left[v'_0 \left(\frac{R_e}{l} \right) f_0 \left(\frac{r_{i,j}^a}{l} \right) + u'_0 \left(\frac{R_e}{l} \right) g_0 \left(\frac{r_{i,j}^a}{l} \right) \right]}{-\frac{\pi q R_e}{2K_{se} l} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \left[v'_0 \left(\frac{R_e}{l} \right) f_0 \left(\frac{r_{i,j}^b}{l} \right) + u'_0 \left(\frac{R_e}{l} \right) g_0 \left(\frac{r_{i,j}^b}{l} \right) \right]} = \\ &= \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \left[v'_0 \left(\frac{R_e}{l} \right) f_0 \left(\frac{r_{i,j}^a}{l} \right) + u'_0 \left(\frac{R_e}{l} \right) g_0 \left(\frac{r_{i,j}^a}{l} \right) \right]}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \left[v'_0 \left(\frac{R_e}{l} \right) f_0 \left(\frac{r_{i,j}^b}{l} \right) + u'_0 \left(\frac{R_e}{l} \right) g_0 \left(\frac{r_{i,j}^b}{l} \right) \right]} \end{aligned} \quad (3.28)$$

Для сосредоточенной нагрузки отношения прогибов имеют вид

$$\frac{w^a}{w^b} = \frac{-\frac{F_k}{4l^2 K_{se}} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n f_0 \left(\frac{r_{i,j}^a}{l} \right)}{-\frac{F_k}{4l^2 K_{se}} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n f_0 \left(\frac{r_{i,j}^b}{l} \right)} = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n f_0 \left(\frac{r_{i,j}^a}{l} \right)}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n f_0 \left(\frac{r_{i,j}^b}{l} \right)}. \quad (3.29)$$

Введем обозначение:

$$S \left(\frac{r_{i,j}^{a(b)}}{l} \right) = \begin{cases} \text{при распределенной нагрузке} \\ \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \left[v'_0 \left(\frac{R_e}{l} \right) f_0 \left(\frac{r_{i,j}^{a(b)}}{l} \right) + u'_0 \left(\frac{R_e}{l} \right) g_0 \left(\frac{r_{i,j}^{a(b)}}{l} \right) \right] \\ \text{при сосредоточенной нагрузке} \\ \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n f_0 \left(\frac{r_{i,j}^{a(b)}}{l} \right). \end{cases}$$

Фактическое значение упругой характеристики плиты должно удовлетворять условиям равенства не только фактических и теоретических прогибов, но и их отношений. Поэтому можно записать условие (3.24) в виде

$$\frac{w_{fact}^a}{w_{fact}^b} = \frac{S \left(\frac{r_{i,j}^a}{l} \right)}{S \left(\frac{r_{i,j}^b}{l} \right)}. \quad (3.30)$$

Из последнего уравнения также невозможно выразить в явном виде переменную l , которая является аргументом функции $S^{a(b)}$. Поэтому будем опреде-

лать значение l методом последовательных приближений. Для этого перейдем от непрерывной переменной l к дискретному ряду ее значений $\{ld_n\}$. Примем значение допустимой точности определения упругой характеристики Δ и допустимые границы значений упругой характеристики l_{min}, l_{max} . Получим дискретное множество значений упругой характеристики

$$LD = \{ld_n\} = \{l_{min}, l_{min} + \Delta, l_{min} + 2\Delta, \dots, l_{max}\}. \quad (3.31)$$

Для конструкции бетонного покрытия, расчетная схема которого показана на рис. 3.1, определим минимальное и максимальное значения упругой характеристики плиты по формуле (3.14). Как видно из этой формулы, минимальное значение упругой характеристики получится при минимальном значении суммарной жесткости B_{tot} и максимальном значении эквивалентного коэффициента постели.

Для определения минимального значения суммарной жесткости примем толщину упрочненного основания равной нулю. Согласно [97] минимальная толщина бетонного покрытия равна 0,16 м; минимальный модуль упругости бетона – $E_b = 32400$ МПа для класса бетона на растяжение при изгибе $B_{tb} 4,0$. Максимальное значение коэффициента постели согласно [97] $K_{se} = 180$ МН/м³.

Соответствующее этим параметрам минимальное значение упругой характеристики равно

$$l_{min} = \sqrt[4]{\frac{B_{tot}}{K_{se}}} = \sqrt[4]{\frac{0,085 \cdot 32400 \cdot 0,16^3}{180}} = 0,5 \text{ м.}$$

Максимальное значение упругой характеристики определим при максимальном значении жесткости покрытия и минимальном значении эквивалентного коэффициента постели. Примем максимальное значение толщины для расчета жесткости $t = 0,5$ м; максимальный модуль упругости $E_b = 35300$ МПа для класса бетона $B_{tb} 4,8$. Толщину упрочненного основания примем равной 0,2 м; модуль упругости $E_f = 21000$ МПа. Для определения эквивалентного коэффициента постели примем минимальное значение коэффициента постели грунтового основания из супеси и суглинка пылеватых $K_{s_3} = 20$ МН/м³. Учитывая, что по требованиям [97] для грунта из супеси и суглинка пылеватых необходимо устраивать

дренирующий слой, примем минимальное нормативное значение толщины дренирующего слоя $t_{s_1} = 0,15$ м из песка средней крупности с коэффициентом постели $K_{s_1} = 120$ МН/м³. Толщину нижнего слоя искусственного основания t_{s_2} (см. рис. 3.1) примем равной нулю. Условный диаметр передачи нагрузки на основание примем равным $D_r = 3,6$ м. Определим при таких параметрах основания минимальный эквивалентный коэффициент постели по формуле (3.7):

$$\alpha_2 = \frac{t_{s_2}[1,6D_r - (t_{s_1} + 0,5t_{s_2})]}{t_{s_1}(1,6D_r - 0,5t_{s_1})} = 0$$

$$\alpha_3 = \frac{0,5[1,6D_r - (t_{s_1} + t_{s_2})]^2}{t_{s_1}(1,6D_r - 0,5t_{s_1})} = \frac{0,5(1,6 \cdot 3,6 - 0,15)^2}{0,15(1,6 \cdot 3,6 - 0,5 \cdot 0,15)} = 18,45;$$

$$K_{se} = \frac{120 + 20 \cdot 18,45}{1 + 18,45} = 25,14 \text{ МН/м}^3.$$

Соответствующее этим параметрам максимальное значение упругой характеристики равно

$$l_{max} = \sqrt[4]{\frac{B_{tot}}{K_{se}}} = \sqrt[4]{\frac{0,085 \cdot (35300 \cdot 0,5^3 + 21000 \cdot 0,2^3)}{25,14}} = 1,98 \text{ м.}$$

Примем область определения упругой характеристики плиты $l \in [0,5, 2,0]$.

При достаточной точности оценки упругой характеристики $\Delta = 0,01$ м максимальное число итераций для определения оптимального значения упругой характеристики равно $\frac{(2,0-0,5)}{0,01} = 150$.

Количество членов статистического ряда значений упругой характеристики плиты, полученных по всем отношениям в матрице (3.27) равно $\sum_{i=1}^{nt-1}(nt - i)$.

Общее максимальное количество итераций для определения всех значений упругой характеристики плиты равно $K = 150 \sum_{i=1}^{nt-1}(nt - i)$. Например, для четырех марок-реек, показанных на рис. 3.5, $K = 150 \sum_{i=1}^3(4 - i) = 900$ итераций. Это незначительное количество для расчета на современных компьютерах.

Для замены уравнения (3.30) с непрерывным параметром l исследуем правую часть этого уравнения численным методом. Изменяя переменную l в области определения, построим график зависимости отношений теоретических прогибов

от упругой характеристики. Для расчета зависимости отношений теоретических прогибов от упругой характеристики рассмотрим расчетную схему, показанную на рис. 3.6.

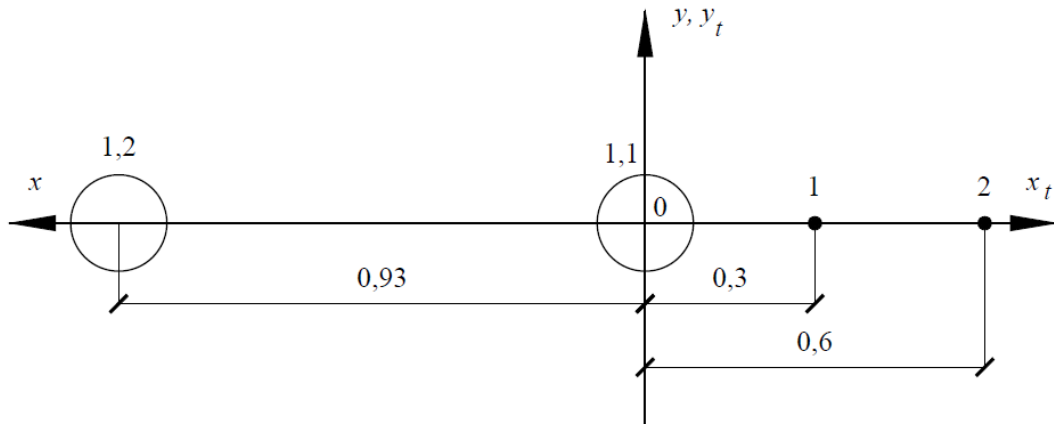


Рисунок 3.6 – Расчетная схема для исследования функции $\frac{S\left(\frac{r_{i,j}^a}{l}\right)}{S\left(\frac{r_{i,j}^b}{l}\right)}$

При такой схеме измерения расстояния от колес опоры до точек изменения равны:

$$r_{1,1}^1 = 0,3 \text{ м}; r_{1,2}^1 = 0,93 + 0,3 = 1,23 \text{ м}$$

$$r_{1,1}^2 = 0,6 \text{ м}; r_{1,2}^2 = 0,93 + 0,6 = 1,53 \text{ м}$$

Подставляя расстояния в формулу (3.28), определим отношения прогибов для схемы рис. 3.6 при распределенной нагрузке

$$\begin{aligned} \frac{S\left(\frac{r_{i,j}^a}{l}\right)}{S\left(\frac{r_{i,j}^b}{l}\right)} = & \left\{ \left[v'_0 \left(\frac{R_e}{l} \right) f_0 \left(\frac{0,3}{l} \right) + u'_0 \left(\frac{R_e}{l} \right) g_0 \left(\frac{0,3}{l} \right) \right] + \right. \\ & \left. + \left[v'_0 \left(\frac{R_e}{l} \right) f_0 \left(\frac{1,23}{l} \right) + u'_0 \left(\frac{R_e}{l} \right) g_0 \left(\frac{1,23}{l} \right) \right] \right\} / \\ & \left\{ \left[v'_0 \left(\frac{R_e}{l} \right) f_0 \left(\frac{0,6}{l} \right) + u'_0 \left(\frac{R_e}{l} \right) g_0 \left(\frac{0,6}{l} \right) \right] + \right. \\ & \left. + \left[v'_0 \left(\frac{R_e}{l} \right) f_0 \left(\frac{1,53}{l} \right) + u'_0 \left(\frac{R_e}{l} \right) g_0 \left(\frac{1,53}{l} \right) \right] \right\}. \end{aligned}$$

Для сосредоточенной нагрузки определим отношения прогибов по формуле (3.29)

$$\frac{S\left(\frac{r_{i,j}^a}{l}\right)}{S\left(\frac{r_{i,j}^b}{l}\right)} = \frac{f_0\left(\frac{0,3}{l}\right) + f_0\left(\frac{1,23}{l}\right)}{f_0\left(\frac{0,6}{l}\right) + f_0\left(\frac{1,53}{l}\right)}$$

На рис. 3.7 приведены графики отношений в зависимости от упругой характеристики при радиусе распределения нагрузки от колес $R_e = 0,22$ м и сосредоточенной нагрузке. На фрагменте графиков видно, что отношения прогибов при сосредоточенной нагрузке больше отношения при распределенной нагрузке. В данном примере наибольший процент разницы при $l = 0,5$ м составляет 1,5%. Для наиболее вероятных значений упругой характеристики (0,8 – 1,5 м) отношения прогибов практически равны. Поэтому при разработке математической модели приняты оба варианта распределения нагрузки на колесо опоры.

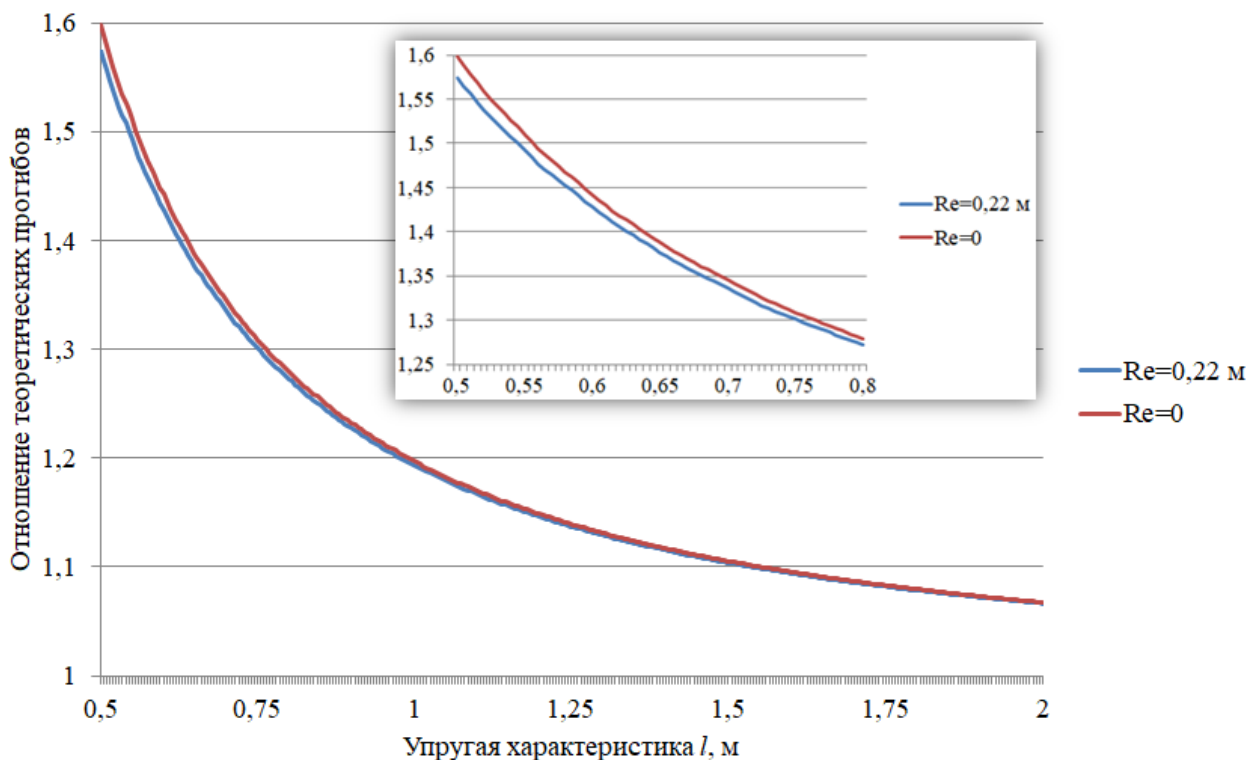


Рисунок 3.7 – Графики отношений теоретических прогибов

Из графиков видно, что функция отношений прогибов двух точек является убывающей при условии расположения точки в числителе ближе к началу координат (к опоре). Поэтому, заменяя непрерывную переменную l дискретным множеством (3.31), условие (3.30) можно записать в виде

$$\frac{S\left(\frac{r_{i,j}^a}{ld_n + \Delta}\right)}{S\left(\frac{r_{i,j}^b}{ld_n + \Delta}\right)} \leq \frac{w_{fact}^a}{w_{fact}^b} \leq \frac{S\left(\frac{r_{i,j}^a}{ld_n}\right)}{S\left(\frac{r_{i,j}^b}{ld_n}\right)}. \quad (3.32)$$

Слева в неравенствах (3.32) записано отношение теоретического прогиба в точке a к теоретическому прогибу в точке b при дискретном значении упругой характеристики $ld_n + \Delta$, справа – отношение тех же прогибов при значении упругой характеристики ld_n .

Перебирая все значения ld_n из множества (3.31), можно найти допустимое значение упругой характеристики $ld_n + \Delta$, удовлетворяющей условию (3.32). Это значение является реализацией опытного значения упругой характеристики плиты $lf_i = ld_n + \Delta$. Если на множестве LD нет значения ld_n для отношения прогибов $\frac{w_{fact}^a}{w_{fact}^b}$, то один из этих прогибов или оба считаются ошибками измерения. Соответствующее этому отношению значение упругой характеристики не учитывается в статистическом ряду.

После определения значений упругой характеристики плиты по всем точкам испытаний формируется статистический ряд $\{lf_i\}, i = 1, \dots, nl$, где nl – число значений упругой характеристики плиты.

Расчет упругой характеристики плиты при испытании штампами также выполняется по условию (3.30). В этом случае выражение для функции $S\left(\frac{r_{i,j}^{a(b)}}{l}\right)$ имеет вид

$$S\left(\frac{r_{i,j}^{a(b)}}{l}\right) = \begin{cases} -\frac{\pi q \alpha}{2K_s} \left[-\frac{2}{\pi \alpha} + g'_0(\alpha)u_0(\xi_k) + f'_0(\alpha)v_0(\xi_k) \right] & \text{при } \xi_k \leq \alpha \\ -\frac{\pi q \alpha}{2K_s} [v'_0(\alpha)f_0(\xi_k) + u'_0(\alpha)g_0(\xi_k)] & \text{при } \xi_k > \alpha. \end{cases} \quad (3.33)$$

В результате испытаний нескольких плит с одной конструкцией получается статистический ряд упругих характеристик плиты $\{lf_i\}$. Полученный статистический ряд проверяется на однородность критериями Груббса и Ирвина [45] и на соответствие нормальному закону распределения по ГОСТ Р ИСО 5479 [35]. По-

сле удаления из ряда ошибочных значений, не удовлетворяющих критериям, определяются оценки математического ожидания величины упругой характеристики плиты

$$\bar{l} = \frac{1}{nl} \sum_{i=1}^{nl} lf_i \quad (3.34)$$

и среднеквадратического отклонения

$$S_l = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{nl} (lf_i - \bar{l})^2}{nl - 1}}. \quad (3.35)$$

3.4.2 Оценка коэффициента постели основания и жесткости плиты бетонного покрытия

Для расчета коэффициентов постели основания определяются значения реактивного давления основания в точках k (см. рис. 3.2) по формуле

$$p^k = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n p_{ij}^k, \quad (3.36)$$

где p^k – реактивное давление в точке k от действия всех колес;

p_{ij}^k – реактивное давление в точке k от действия ij – го колеса.

При испытании опорой значения реактивного давления p_{ij}^k определим по оценке упругой характеристики \bar{l} для нагрузки, распределенной по площади круга, по формуле

$$\begin{aligned} p_{ij}^k &= -\frac{\pi q \alpha}{2} [v'_0(\alpha) f_0(\xi_{i,j}^k) + u'_0(\alpha) g_0(\xi_{i,j}^k)] = \\ &= -\frac{\pi q \alpha}{2} \left[v'_0 \left(\frac{R_e}{\bar{l}} \right) f_0 \left(\frac{r_{i,j}^k}{\bar{l}} \right) + u'_0 \left(\frac{R_e}{\bar{l}} \right) g_0 \left(\frac{r_{i,j}^k}{\bar{l}} \right) \right]. \end{aligned} \quad (3.37)$$

Для сосредоточенной нагрузки реактивное давление определим по формуле

$$p_{ij}^k = -\frac{F_d}{4\bar{l}^2} f_0(\xi_{i,j}^k) = -\frac{F_d}{4\bar{l}^2} f_0 \left(\frac{r_{i,j}^k}{\bar{l}} \right). \quad (3.38)$$

При испытании штампом значения реактивного давления в точках плиты, расположенных за пределами штампа, определим по формуле (3.37), а в пределах площади штампа – по формуле

$$\begin{aligned} p^k &= -\frac{\pi q \alpha}{2} \left[-\frac{2}{\pi \alpha} g'_0(\alpha) u_0(\xi_k) + f'_0(\alpha) v_0(\xi_k) \right] = \\ &= -\frac{\pi q \alpha}{2} \left[-\frac{2}{\pi \alpha} g'_0\left(\frac{R}{l}\right) u_0\left(\frac{x_k}{l}\right) + f'_0\left(\frac{R}{l}\right) v_0\left(\frac{x_k}{l}\right) \right]. \end{aligned} \quad (3.39)$$

Сравнивая формулы (3.16, 3.19, 3.22) с формулами (3.37, 3.38, 3.39), можно определить коэффициент постели основания при фактических значениях прогибов по формуле

$$K_s^k = \frac{p^k}{w_{fact}^k} k_{сез}, \quad (3.40)$$

где $k_{сез}$ – коэффициент приведения результатов испытаний к расчетному сезону (периоду с наименьшей влажностью грунтового основания), принимаемый равным по рекомендациям [69]:

- 1,0 при весенних испытаниях;
- 0,90 – для летних и осенних испытаний покрытий на среднезернистых и крупнозернистых песчаных грунтах;
- 0,85 – при осенних испытаниях покрытий на глинистых, суглинистых, пылеватых и мелкозернистых песчаных грунтах;
- 0,68 – при летних испытаниях на глинистых, суглинистых, пылеватых и мелкозернистых песчаных грунтах.

В формуле (3.40) определяются коэффициенты постели только для точек измерения прогибов, которые не были удалены при проверке статистических гипотез однородности и соответствия нормальному закону распределения упругих характеристик плиты.

Полученный статистический ряд коэффициентов постели также проверяется на однородность и соответствие нормальному закону распределения.

Определяется среднее значение коэффициента постели основания по формуле

$$\bar{K}_s = \frac{1}{nk} \sum_{i=1}^{nk} K_s^i. \quad (3.41)$$

где nk – число полученных значений коэффициента постели.

Среднеквадратическое отклонение коэффициента постели определяется по формуле

$$S_{K_s} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{nk} (K_s^i - \bar{K}_s)^2}{nk - 1}}. \quad (3.42)$$

Жесткость сечения плиты вычисляется по формуле

$$B = l^4 K_s. \quad (3.43)$$

Она является функцией двух случайных аргументов – упругой характеристики плиты и коэффициента постели основания. Поэтому для оценки жесткости разыгрываются случайные аргументы с учетом гипотезы о нормальном распределении статистических рядов этих переменных.

Разыгрывание нормально распределенных случайных величин выполняется по формулам [25]

$$\begin{aligned} l_i &= \bar{l} + r_i S_l; \\ K_{s_i} &= \bar{K}_s + r_i S_{K_s}, \end{aligned} \quad (3.44)$$

где r_i – нормально распределенное число, определяемое по таблицам взаимно независимых случайных величин, подчиняющихся нормальному распределению с параметрами распределения (0,1) [10].

Вычисляя для каждой реализации случайных аргументов значение B_i , получим статистический ряд значений жесткостей, для которого после проверки его на однородность найдем оценки – среднее значение жесткости плиты

$$\bar{B} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n B_i \quad (3.45)$$

и среднеквадратическое отклонение

$$S_B = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (B_i - \bar{B})^2}{n - 1}}. \quad (3.46)$$

Следует отметить, что приведенные выше оценки среднеквадратического отклонения определяются при количестве членов статистических рядов $n \leq 30$. При $n > 30$ для определения среднеквадратического отклонения используется формула

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}. \quad (3.47)$$

где x_i – член нормально распределенного статистического ряда;

\bar{x} – среднее значение членов статистического ряда $\{x_i\}$.

На основании приведенного метода испытаний и оценки характеристик напряженно-деформированного состояния жесткого аэродромного покрытия разработана математическая модель, исходными данными для которой являются параметры испытательной нагрузки (конфигурация опоры, давление в пневматиках колес, нагрузка на опору), схема нагружения покрытия (см. рис. 3.2), прогибы в покрытии. Выходами модели являются оценки упругой характеристики и жесткости плиты, коэффициента постели основания, которые в свою очередь являются исходными данными для вероятностной модели бетонных покрытий.

3.5 Методика оценки несущей способности бетонного аэродромного покрытия по результатам испытаний

Оценка несущей способности определяется как допустимая нагрузка на покрытие, которая представляется кодом PCN для сравнения с кодом ACN BC при планировании режимов их эксплуатации.

Разрабатываемая методика основана на математической модели бетонного однослойного аэродромного покрытия на упрочненном основании или без основания по исходным данным, полученным при обработке результатов обследования и испытания конструкции аэродромного покрытия.

Согласно определению Самарского А.А. и Михайлова А.П. [90] математическое моделирование объекта состоит из трех этапов: модель – алгоритм – программа. На первом этапе строится «эквивалент» объекта, отражающий в матема-

тической форме важнейшие его свойства. Построенная математическая модель исследуется теоретическими методами для получения математических соотношений, описывающих основные закономерности, присущие изучаемому процессу, объекту или системе. Вторым этапом является разработка алгоритма для реализации модели на компьютере. На третьем этапе создаются программы, реализующие на компьютере модель и алгоритм. После разработки триады «модель-алгоритм-программа» она тестируется и проверяется на адекватность. После удостоверения в адекватности триады исходному объекту она может быть использована для изучения характеристик объекта.

Разработанная согласно этому принципу математического моделирования методика автоматизированного расчета применяется при расчете несущей способности эксплуатируемых бетонных аэродромных покрытий, которая определяется как величина допустимой по условиям (3.48) нагрузки на основную опору расчетного ВС.

Расчетный и предельный изгибающие моменты, входящие в формулу (3.48), в этой модели вычисляются по параметрам конструкции бетонного покрытия, полученным при статистической обработке результатов испытаний аэродромных покрытий. Данная модель является стохастической, т.к. она использует статистическое описание объекта. В то же время основные расчетные формулы и параметры модели – детерминированные, принимаемые по нормативному источнику [97].

3.5.1 Исходные данные модели

Исходными данными для определения расчетного и предельного изгибающих моментов являются полученные в результате обработки результатов испытаний оценки:

- суммарной жесткости аэродромной конструкции \bar{B}, S_B ;
- коэффициента постели основания \bar{K}_S, S_{K_S} .
- расчетного сопротивления бетона растяжению при изгибе $\bar{R}_{tb}, S_{R_{tb}}$;

- модулей упругости бетона и упрочненного основания $\bar{E}_b, S_{E_b}, \bar{E}_f, S_{E_f}$;
- толщин конструктивных слоев покрытия и упрочненного основания $\bar{t}, S_t, \bar{t}_f, S_{t_f}$.

Статистические оценки суммарной жесткости и коэффициента постели основания определяются по результатам натуральных испытаний конструкции нагрузками. Статистические оценки расчетного сопротивления бетона растяжению при изгибе и модулей упругости бетона покрытия и упрочненного основания определяются по результатам лабораторных испытаний образцов-кернов, отобранных из конструкции одновременно с испытаниями нагрузками. После отбора керны испытываются на прессе на растяжение при раскалывании по ГОСТ [33]. Расчетное значение прочности на растяжение при изгибе определяется умножением значения прочности на растяжение при сжатии на переводной коэффициент. Толщины конструктивных слоев определяются измерением кернов.

Для учета степени разрушения покрытий одновременно с испытаниями составляется дефектовочный план, по которому в соответствии с [37, 38] определяется индекс качества поверхности S_k , в зависимости от которого по табл. 3.1 определяется понижающий коэффициент K_e к оценке несущей способности конструкции.

3.5.2 Расчет несущей способности по статистическим данным

Математическая модель разработана для определения допустимой нагрузки на покрытие по данным испытаний. Условие прочности бетонного покрытия (1.29) для модели можно записать в виде

$$P\{\arg \Phi[F(m_u) - F(m_d)] \geq 0\} = P_H; \quad (3.48)$$

где P – вероятность того, что прочность жесткого аэродромного покрытия по первому предельному состоянию в течение заданного срока службы будет обеспечена;

Φ – интегральная функция распределения резерва прочности покрытия;

$F(m_u)$ – интегральная функция распределения случайной величины предельного изгибающего момента;

$F(m_d)$ – интегральная функция распределения случайной величины расчетного изгибающего момента;

R_H – заданный уровень надежности, принимаемый по табл. 3.3 [37].

Предельный изгибающий момент в данной модели является функцией случайных аргументов, заданных статистическими характеристиками нормального распределения:

$$F(m_u) = f(R_{tb}, t), \quad (3.49)$$

где R_{tb} – сопротивление бетона на растяжение при изгибе, случайная величина с плотностью распределения

$$f(R_{tb}) = \frac{1}{S_{R_{tb}} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(R_{tb} - \bar{R}_{tb})^2}{2S_{R_{tb}}^2}};$$

t – толщина покрытия, случайная величина с плотностью распределения

$$f(t) = \frac{1}{S_t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t - \bar{t})^2}{2S_t^2}}.$$

Расчетный изгибающий момент однослойного бетонного покрытия является функцией случайных аргументов:

в однослойном бетонном покрытии без упрочненного основания

$$F(m_d) = f(F_n, B, K_s); \quad (3.50)$$

где F_n – случайная величина нагрузки на покрытие, которую необходимо определить;

B – случайная величина жесткости покрытия с плотностью распределения

$$f(B) = \frac{1}{S_B \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(B - \bar{B})^2}{2S_B^2}}.$$

K_s – случайная величина коэффициента постели с плотностью распределения

$$f(K_s) = \frac{1}{S_{K_s} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(K_s - \bar{K}_s)^2}{2S_{K_s}^2}}.$$

В однослойном бетонном покрытии с упрочненным основанием имеется неопределенность в расчленении суммарной жесткости на жесткость покрытия и упрочненного основания. Проблема заключается в том, что согласно нормам [97] случайные функции расчетного изгибающего момента определяются по формуле (1.31), в которой есть отношение жесткости покрытий к суммарной жесткости покрытия и упрочненного основания. Рассмотрим один из вариантов расчленения суммарной жесткости конструкции.

Для определения жесткостей слоев B, B_f требуется дополнительная информация. Возможны два источника такой информации:

1. проектные данные о модулях упругости и толщинах слоев;
2. результаты измерения и испытания кернов, взятых в точках испытаний конструкции аэродромного покрытия.

Первый источник является менее достоверным из-за разброса проектных значений характеристик материалов и толщин при строительстве и изменений, которые претерпела конструкция в течение срока эксплуатации. Проектными данными можно воспользоваться, если бурение не выполнялось. Кроме того, проектные данные могут быть использованы в качестве дополнительной информации при обработке результатов испытаний кернов.

Из дополнительных источников определяются контрольные жесткости B^1, B_f^1 . Если используются проектные данные, контрольные жесткости слоев вычисляются при детерминированных значениях по формулам

$$B^1 = 0,085E_b t^3; B_f^1 = 0,085E_f t_f^3. \quad (3.51)$$

При использовании результатов испытаний и измерения кернов выполняется статистический анализ данных, в результате которого определяются статистические оценки:

модулей упругости слоев покрытия $\bar{E}_b^k, S_{E_b^k}$ и упрочненного основания

$\bar{E}_f^k, S_{E_f^k}$;

толщин слоев покрытия \bar{t}^k, S_{t^k} и упрочненного основания $\bar{t}_f^k, S_{t_f^k}$.

В этих обозначениях индекс “ k ” означает, что статистические оценки получены при испытании кернов.

Жесткости слоев покрытия и упрочненного основания в этом случае являются функциями двух случайных величин – модуля упругости и толщины покрытия бетонного слоя и модуля упругости и толщины упрочненного основания, распределенных по нормальному закону. Их реализации могут быть получены методом статистического моделирования Монте-Карло.

Для разыгрывания случайных аргументов $E_{b_i}^k$, t_i^k , $E_{f_i}^k$, $t_{f_i}^k$, B_i^k и $B_{f_i}^k$ используются следующие формулы:

$$E_{b_i}^k = \bar{E}_b^k + r_i S_{E_b^k}; \quad (3.52)$$

$$t_i^k = \bar{t}^k + r_i S_{t^k};$$

$$E_{f_i}^k = \bar{E}_f^k + r_i S_{E_f^k}; \quad (3.53)$$

$$t_{f_i}^k = \bar{t}_f^k + r_i S_{t_f^k};$$

$$B_i^k = 0,085 E_{b_i}^k t_i^{k^3}; \quad B_{f_i}^k = 0,085 E_{f_i}^k t_{f_i}^{k^3}. \quad (3.54)$$

После статистической обработки полученных рядов определяются средние значения контрольных жесткостей покрытия и упрочненного основания

$$B^1 = \sum_{i=1}^n B_i^k; \quad B_f^1 = \sum_{i=1}^n B_{f_i}^k; \quad (3.55)$$

где n – количество членов статистических рядов (3.54).

Алгоритм расчленения суммарной жесткости на жесткости слоев покрытия и упрочненного основания состоит из следующих действий.

Определяются отношения

$$k_1 = \frac{B^1}{\bar{B}}; \quad k_2 = \frac{B_f^1}{\bar{B}}; \quad (3.56)$$

где \bar{B} – оценка величины жесткости, полученная при испытании конструкции нагружением.

С учетом отношений (3.56) полученная при испытании суммарная жесткость конструкции $B_{tot} = \bar{B}$ расчленяется по слоям:

$$B = k_1 B_{tot}; B_f = k_2 B_{tot}. \quad (3.57)$$

Таким образом, результаты натуральных испытаний конструкции нагрузками уточняются результатами испытаний кернов или проектными данными.

Следует отметить, что разбиение (3.57) не является единственным. На практике принимаются во внимание дополнительные исследования и эвристические соображения, например, данные георадиолокационного исследования аэродромных покрытий, дефектовочные планы, состояние кернов и др.

Так как жесткость упрочненного основания значительно меньше жесткости бетонного слоя конструкции, примем жесткость B_f , определенную по формуле (3.57) постоянной, а жесткость B будем рассматривать в вероятностной модели как случайную величину. Для определения статистических оценок жесткости покрытия умножим все члены ряда B_i , (формула 3.45) на коэффициент k_1 и определим статистические оценки жесткости бетонного слоя для конструкции на упрочненном основании:

среднее значение жесткости бетонного слоя

$$\bar{B}_b = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_1 B_i = k_1 \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n B_i = k_1 \bar{B}, \quad (3.58)$$

и среднеквадратическое отклонение

$$S_{B_b} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (k_1 B_i - k_1 \bar{B})^2}{n-1}} = k_1 S_B. \quad (3.59)$$

С учетом уточнения жесткостей слоев покрытия и упрочненного основания расчетный изгибающий момент однослойного бетонного покрытия на упрочненном основании можно записать в виде

$$F(m_d) = f(F_n, B_b, B_f, K_s); \quad (3.60)$$

где B_b – случайная величина жесткости покрытия с плотностью распределения

$$f(B) = \frac{1}{k_1 S_B \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(B - k_1 \bar{B})^2}{2(k_1 S_B)^2}},$$

$B_f = k_2 \bar{B}$ – жесткость упрочненного основания, постоянная величина;

\bar{B}, S_B – оценки величины жесткости, полученные при испытании конструкции нагружением (см. формулы (3.45, 3.46)).

Параметры F_n и K_s определяются аналогично формуле (3.50).

Формулу (3.60) можно применять и для расчета бетонного покрытия без упрочненного основания. При этом $k_1 = 1$; $k_2 = 0$.

3.5.3 Определение величины допустимой нагрузки методом статистического моделирования Монте-Карло

Статистическое моделирование заключается в формировании статистического ряда допустимых нагрузок $\{F_{n_i}\}$ в зависимости от разыгранных по нормальному закону распределения случайных параметров бетонного аэродромного покрытия.

Для каждого варианта разыгранных параметров выполняется поиск допустимой нагрузки F_{n_i} на основную опору расчетного ВС по условиям (1.29, 1.30).

Для поиска значений случайной величины нагрузки решается обратная задача: задавая значения F_{n_i} , проверяются условия (1.29, 1.30). При невыполнении этих условий значения F_{n_i} корректируются до тех пор, пока не будет найдена допустимая нагрузка.

Расчетный и предельный изгибающие моменты вычисляются в зависимости от параметров, которые определяются методом статистического моделирования Монте-Карло по вычисленным в результате испытаний оценкам:

$$\begin{aligned} B_i &= \bar{B}_b + r_i S_{B_b}; \\ K_{s_i} &= \bar{K}_s + r_i S_{K_s}; \\ t_i &= \bar{t} + r_i S_t; \\ R_{tb_i} &= \bar{R}_{tb} + r_i S_{R_{tb}}, \end{aligned} \tag{3.61}$$

где $i = 1, \dots, I$ – номер розыгрыша.

В данной модели при определении предельного изгибающего момента температурные напряжения учитываются нормативным коэффициентом условий ра-

боты, полученным по многолетним наблюдениям и принимаемом по [97] для бетонных или армобетонных покрытий в зависимости от широты расположения аэродрома и группы участков покрытия.

Для формирования статистического ряда $\{F_{n_i}\}$ определим границы изменения нагрузки. Вычислим максимальное значение ряда $\{F_{n_i}\}$:

$$F_{max} = \max_{i=1, I} F_{n_i} \quad (3.62)$$

Для конструкции, показанной на рис. 3.1, максимальное значение допустимой нагрузки будет при следующих значениях характеристик:

$$\begin{aligned} B_{max} &= \max_{i=1, I} B_i; \\ K_{s_{max}} &= \max_{i=1, I} K_{s_i}; \\ t_{max} &= \max_{i=1, I} t_i; \\ R_{tb_{max}} &= \max_{i=1, I} R_{tb_i}. \end{aligned} \quad (3.63)$$

Поэтому перед началом моделирования реализаций F_{n_i} необходимо разыграть по формулам (3.61) элементы статистических рядов $\{B_i\}$, $\{K_{s_i}\}$, $\{t_i\}$, $\{R_{tb_i}\}$, $i = 1, \dots, I$ и в каждом из них найти максимальный элемент. Затем по максимальным значениям аргументов определить величину нагрузки F_{max} , для которой выполняются условия (1.29, 1.30).

Значение F_{max} является начальным приближением при определении случайной величины допустимой нагрузки $F_{n_i}(B_i, K_{s_i}, t_i, R_{tb_i})$.

Так как при статистическом моделировании величины допустимой нагрузки на компьютере можно сформировать статистический ряд $\{F_{n_i}\}$ намного большей размерности статистических рядов, которые можно получить при натуральных испытаниях, для проверки гипотезы о нормальном распределении ряда $\{F_{n_i}\}$ проверяются критерии асимметрии и кривизны согласно [35] и используется критерий Пирсона [25].

После статистического анализа и приведения ряда к нормальному распределению вычисляются среднее значение допустимой нагрузки

$$\bar{F}_n = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k F_{n_i} \quad (3.64)$$

и среднеквадратическое отклонение

$$S_{F_n} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (F_{n_i} - \bar{F}_n)^2}{k}}, \quad (3.65)$$

где $k \leq I$ – число элементов статистического ряда допустимых нагрузок при нормальном распределении.

В качестве оценки несущей способности бетонного покрытия принимается действительное значение допустимой нагрузки. Согласно нормативному документу по метрологии РМГ 29-2013 действительное значение величины – это значение величины, полученное экспериментальным путем и настолько близкое к истинному значению, что в поставленной задаче может быть использовано вместо него.

Действительное значение несущей способности бетонного покрытия (допустимая нагрузка) F_n определяется по формуле

$$F_n = \bar{F}_n - z_{1-\alpha} \cdot S_{F_n}, \quad (3.66)$$

где $z_{1-\alpha}$ – параметр нормированного нормального распределения при уровне значимости α .

Параметр $z_{1-\alpha}$ определяется в зависимости от надежности P . В табл. 3.3 приведены рекомендуемые [37] значения параметра нормированного распределения.

Действительное значение допустимой нагрузки F_n используется в дальнейшем в модели метода ACN–PCN для определения режима нагружения аэродромного покрытия: допустимыми сочетаниями взлетных масс и количества взлетно-посадочных операций парка эксплуатируемых на аэродроме ВС.

Таблица 3.3

Остаточный срок службы покрытия, годы	Надежность, P	Параметр нормированного распределения $Z_{1-\alpha}$
3	0,75	0,67
4	0,77	0,73
5	0,80	0,84
6	0,82	0,90
7	0,85	1,05
8	0,87	1,14
9	0,88	1,22
10	0,90	1,30
11	0,91	1,35
12	0,92	1,40
15	0,93	1,52
20 и более	0,95	1,64

3.6 Выводы по главе 3

1. Оценка несущей способности аэродромных покрытий выполняется на стадии эксплуатации, при этом характеристики конструкции изменяются под воздействием многократного приложения нагрузок от ВС, природных и эксплуатационных факторов. Наиболее адекватная оценка несущей способности аэродромных покрытий может быть получена при исследовании их фактического состояния и натурных испытаний.

2. Для натурных испытаний бетонных и армобетонных аэродромных покрытий применяются ВС, автомобили или штампы. При нагружении испытательной нагрузкой измеряются прогибы поверхности покрытия, по которым рассчитываются упругая характеристика плиты и коэффициент постели основания.

3. Согласно действующей методике при испытаниях штампами значения упругой характеристики и коэффициента постели рассчитываются по объему ча-

ши прогиба, точность определения которого зависит от точности интерполяции расстояния от центра штампа до точки покрытия с нулевым прогибом. Это снижает точность оценки характеристик напряженно-деформированного состояния покрытия.

4. Нагрузки от штампа не соответствуют воздействию на аэродромные покрытия многоколесных опор ВС. Испытания бетонных и армобетонных аэродромных покрытий опорами ВС обеспечивают более точную оценку несущей способности по сравнению со штампами. Но методика расчета упругой характеристики и коэффициента постели по объему чаши прогиба при испытаниях многоколесными опорами неприменима из-за наложения прогибов от нескольких колес опоры.

5. Для определения расчетной нагрузки и координат измерений прогибов в данном исследовании разработана методика планирования испытаний на основе решения уравнения плиты на упругом основании Винклера. Прогибы от воздействия нагрузок определяются с помощью функций Бесселя и Ганкеля.

6. Основными критериями выбора испытательной нагрузки и определения координат точек измерения прогибов являются условие прочности конструкции по изгибающим моментам под испытательной нагрузкой и возможность измерения прогибов принятым измерительным прибором. Максимальное расстояние от нагрузки до точки измерения прогиба должно быть больше ожидаемой величины упругой характеристики плиты.

7. Разработана методика определения упругой характеристики плиты, коэффициента постели и жесткости сечения плиты бетонного покрытия по измеренным прогибам на основе решения уравнения плиты на упругом основании Винклера. В процессе расчета по данной методике для каждого параметра формируются статистические ряды.

8. В результате статистического анализа полученных рядов характеристик покрытия определяются их статистические оценки: средние значения и среднеквадратические отклонения, используемые для определения допустимой нагрузки на опору испытательного средства.

9. Разработана методика оценки несущей способности бетонного и армобетонного аэродромного покрытия. Расчет допустимой нагрузки на опору ВС выполняется методом статистического моделирования Монте-Карло по полученным при обработке результатов испытаний статистическим оценкам характеристик конструкции. Обработка результатов статистического моделирования выполняется методами математической статистики.

10. Оценка несущей способности бетонного аэродромного покрытия определяется по формуле $F_n = \bar{F}_n - z_{1-\alpha} \cdot S_{F_n}$, где \bar{F}_n и S_{F_n} – среднее значение и среднеквадратическое отклонение смоделированного ряда допустимых нагрузок; $z_{1-\alpha}$ – параметр нормированного нормального распределения при уровне значимости α , определяемом в зависимости от остаточного срока службы покрытия.

Глава 4 Автоматизированная оценка несущей способности бетонных и армобетонных покрытий

Метод оценки несущей способности бетонных и армобетонных аэродромных покрытий разработан на основе математического моделирования. Как отмечено в главе 3, математическое моделирование состоит из триады «модель-алгоритм-программа». В главе 3 были рассмотрены методики определения характеристик напряженно-деформированного состояния и несущей способности бетонных аэродромных для формирования модели допустимой нагрузки.

Для реализации разработанных методик на компьютере были разработаны алгоритмы и специализированные программы: Tesaf, Statis и ModFn. Программы разработаны на языке Delphi как приложения операционной системы Windows.

Программа Tesaf работает в двух режимах. В режиме планирования испытаний выполняет предварительный расчет прогибов от выбранной испытательной нагрузки на основе априорной информации о конструкции (проектная документация, результаты предыдущих исследований и т.д.). В режиме расчета характеристик жесткого покрытия по прогибам формирует статистические ряды значений упругой характеристики плиты, коэффициента постели основания и жесткости плиты.

Программа Statis выполняет статистический анализ сформированных рядов и рассчитывает их статистические оценки.

Программа ModFn формирует статистический ряд допустимых нагрузок методом статистического моделирования Монте-Карло разыгрыванием характеристик бетонного покрытия по вычисленным в результате обработки испытаний оценкам.

Разработка нескольких специализированных программ обусловлена тем, что при определении допустимой нагрузки решается несколько различных задач, с одной стороны, и одна задача (статистический анализ) повторяется несколько раз.

Алгоритмы программ разработаны в соответствии с приведенными в главе 3 методиками, поэтому в данной главе они не повторяются.

В данной главе показаны примеры расчетов по разработанным программам.

Оценка несущей способности жесткого аэродромного покрытия заключается в определении допустимой нагрузки на покрытие. Величина допустимой нагрузки, как отмечалось в главе 1, при эксплуатации аэродромных покрытий ВС характеризуется кодом PCN. На рис. 4.1 приведена схема определения допустимой нагрузки и кода PCN на основе результатов испытаний жестких аэродромных покрытий.

Для выбора испытательной нагрузки используется модуль из разработанной ранее программы Agar [81]. С помощью этого модуля предварительно рассчитывается код PCN конструкции с использованием проектных характеристик или предыдущих оценок ее несущей способности. Расчет допустимой нагрузки выполняется по условиям (1.29, 1.30). Кроме выбора испытательной нагрузки в данном модуле определяется эквивалентный коэффициент постели K_{se} и упругая характеристика плиты l .

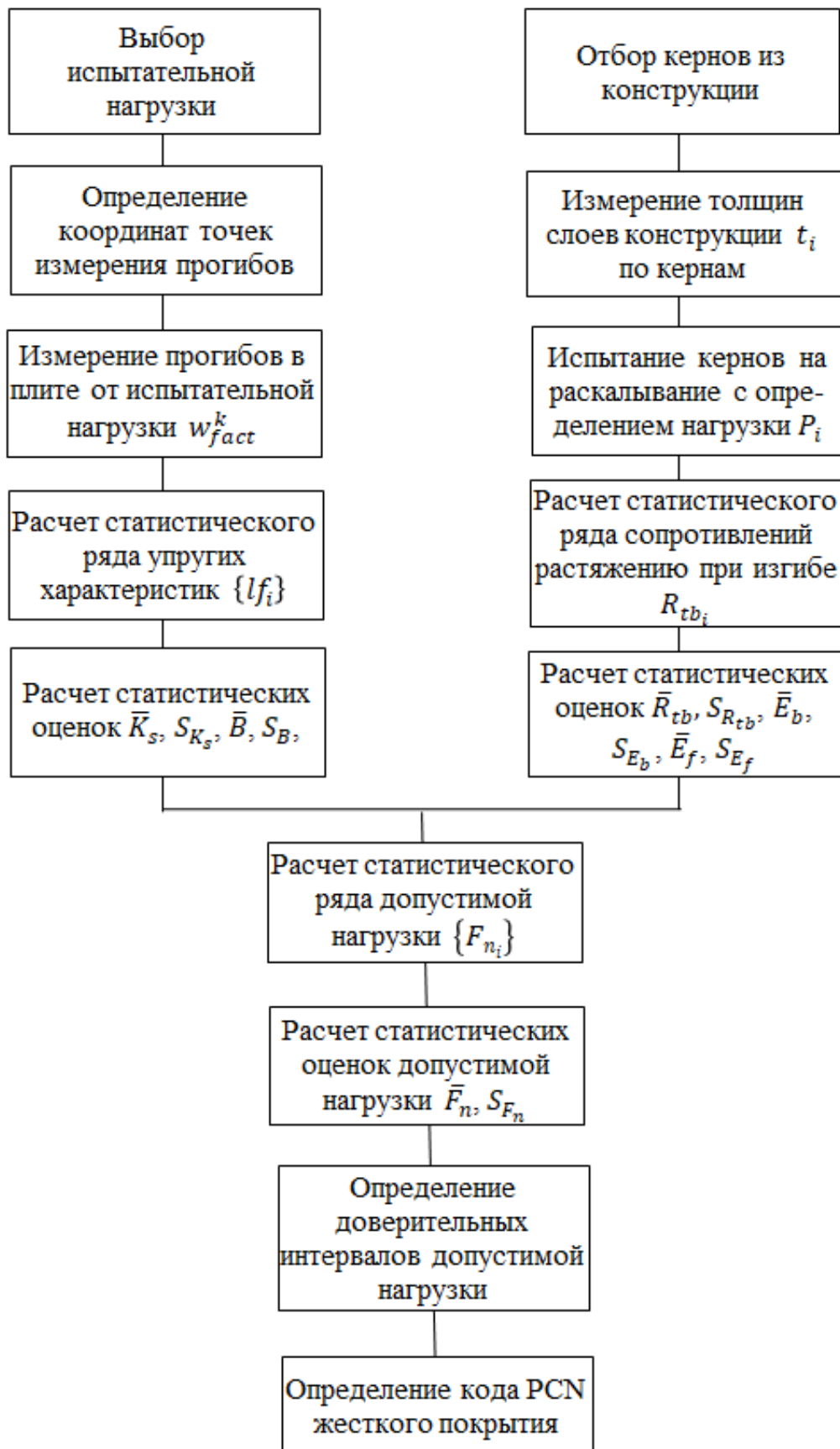


Рисунок 4.1 – Схема определения допустимой нагрузки по результатам испытаний жестких аэродромных покрытий

4.1 Расчет прогибов от испытательной нагрузки

Для определения координат точек измерения прогибов и расчета статистического ряда упругих характеристик разработана программа Tesaf с двумя режимами работы: планирования испытаний и обработки их результатов. Это связано с тем, что для решения этих задач используются одни и те же формулы, приведенные в главе 3. В режиме планирования испытаний по проектным или полученным в результате ранее выполненного обследования конструкции исходным данным проверяется выбранная испытательная нагрузка и рассчитываются ожидаемые прогибы конструкции.

Рассмотрим пример моделирования линии упругого прогиба в жестком покрытии от нагрузки основной опорой ВС В747-400D, характеристики которой показаны на рис. 4.2.

Исходные данные программы Tesaf в режиме планирования:

- тип ВС;
- радиус круга испытательной нагрузки R_e ;
- эквивалентный коэффициент постели K_{se} (см. рис. 3.1, формулу 3.7);
- упругая характеристика плиты l .

После исходных данных нагрузки и конструкции покрытия в форме исходных данных записываются координаты точек, в которых необходимо рассчитать прогибы в соответствии со схемой рис. 3.2, рис. 3.3.

Прогибы конструкции рассчитываются по методике, приведенной в параграфе 3.3.

Для примера рассчитаем прогиб w^1 плиты в точке $x^1 = 0,4$ м; $y^1 = 0$ в соответствии с расчетной схемой рис. 4.3 при следующих исходных данных:

эквивалентный коэффициент постели $K_{se} = 50 \frac{\text{МН}}{\text{м}^3}$;

упругая характеристика плиты $l = 1,5$ м.

1. Нагрузка на колесо определяется по формуле (3.9):

$$F_k = \frac{k_m F_n}{n_k} = \frac{0,238 \cdot 2729}{4} = 162,376 \text{ кН.}$$

2. Радиус круга колеса испытательной нагрузки рассчитывается по формуле (3.8):





$$R_e = \sqrt{\frac{F_k}{\pi p_a}} = \sqrt{\frac{162,38}{\pi \cdot 1,04}} = 0,223 \text{ м.}$$

B747-400D

Взлетный вес : 2729 кН
 Доля веса на основную опору: 23,8%
 Давление в пневматиках: 1,04 МПа
 Число колес на основной опоре: 4
 Число осей на основной опоре: 2

Расстояния между колесами основной опоры:
 $a_d=1,848 \text{ м}; \quad a_t=1,12 \text{ м}$
 Координаты центра тяжести
 площади контакта колес основной опоры:
 $x_c=0,56 \text{ м}; \quad y_c=0,735 \text{ м}$

Схема основной опоры

	
0; 1,47	1,12; 1,47
	
0; 0	1,12; 0

ACN

Масса, кг max/пустого	Давление, МПа	Жесткие покрытия				Нежесткие покрытия			
		A	B	C	D	A	B	C	D
272900	1.04	30	36	43	51	36	39	47	65
178200		22	23	26	34	23	24	27	35

Рисунок 4.2 – Характеристики опоры ВС B747D

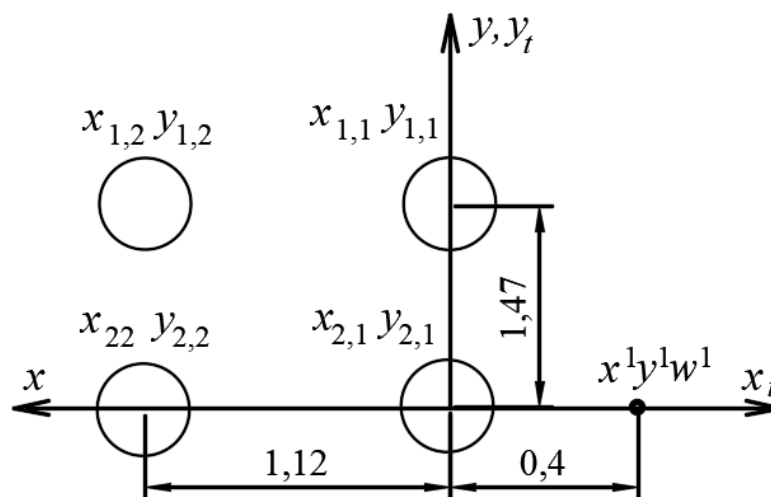


Рисунок 4.3 – Схема расчета прогиба плиты от опоры ВС B747D

2. Расстояния от колес (см. расчетную схему рис. 4.3) до точки (0,4; 0,0) рассчитываются по формуле (3.10):

$$r_{1,1}^1 = \sqrt{0,4^2 + 1,47^2} = 1,523 \text{ м};$$

$$r_{1,2}^1 = \sqrt{(1,12 + 0,40)^2 + 1,47^2} = 2,115 \text{ м};$$

$$r_{2,1}^1 = 0,4 \text{ м};$$

$$r_{2,2}^1 = 1,12 + 0,40 = 1,52 \text{ м};$$

3. Приведенные расстояния рассчитываются по формуле (3.13):

$$\xi_{1,1}^1 = \frac{r_{1,1}^1}{l} = \frac{1,523}{1,5} = 1,015; \quad \xi_{1,2}^1 = \frac{r_{1,2}^1}{l} = \frac{2,115}{1,5} = 1,41;$$

$$\xi_{2,1}^1 = \frac{r_{2,1}^1}{l} = \frac{0,4}{1,5} = 0,267; \quad \xi_{2,2}^1 = \frac{r_{2,2}^1}{l} = \frac{1,52}{1,5} = 1,013;$$

4. Нагрузка на единицу площади отпечатка колеса равна

$$q = \frac{F_k}{\pi R_e^2} = \frac{162376}{\pi \cdot 0,223^2} = 1,0679 \text{ МПа.}$$

5. Приведенный радиус круга распределения нагрузки определяется по формуле (3.15):

$$\alpha = \frac{R_e}{l} = \frac{0,223}{1,5} = 0,1467.$$

6. Прогибы от колес определяются по формуле (3.16):

$$\begin{aligned} w_{1,1}^1 &= -\frac{\pi q \alpha}{2K_{se}} [v'_0(\alpha) f_0(\xi_{i,j}^k) + u'_0(\alpha) g_0(\xi_{i,j}^k)] = \\ &= -\frac{\pi \cdot 1,0679 \cdot 0,1467}{2 \cdot 50} [(-0,0733) \cdot 0,3117 + (-0,0002) \cdot (-0,1762)] = \\ &= 0,000112 \text{ м}; \\ w_{1,2}^1 &= -\frac{\pi q \alpha}{2K_{se}} [v'_0(\alpha) f_0(\xi_{i,j}^k) + u'_0(\alpha) g_0(\xi_{i,j}^k)] = \\ &= -\frac{\pi \cdot 1,0679 \cdot 0,1467}{2 \cdot 50} [(-0,0733) \cdot 0,2284 + (-0,0002) \cdot (-0,0522)] = \\ &= 0,000082 \text{ м}; \\ w_{2,1}^1 &= -\frac{\pi q \alpha}{2K_{se}} [v'_0(\alpha) f_0(\xi_{i,j}^k) + u'_0(\alpha) g_0(\xi_{i,j}^k)] = \\ &= -\frac{\pi \cdot 1,0679 \cdot 0,1467}{2 \cdot 50} [(-0,0733) \cdot 0,4724 + (-0,0002) \cdot (-0,9244)] = \\ &= 0,000364 \text{ м}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 w_{2,2}^1 &= -\frac{\pi q \alpha}{2K_{se}} [v'_0(\alpha) f_0(\xi_{i,j}^k) + u'_0(\alpha) g_0(\xi_{i,j}^k)] = \\
 &= -\frac{\pi \cdot 1,0679 \cdot 0,1467}{2 \cdot 50} [(-0,0733) \cdot 0,3122 + (-0,0002) \cdot (-0,1771)] = \\
 &= 0,000476 \text{ м};
 \end{aligned}$$

7. Суммарный прогиб в точке (0,4; 0,0) вычисляется по формуле (3.12):

$$\begin{aligned}
 w^1 &= w_{1,1}^1 + w_{1,2}^1 + w_{1,1}^1 + w_{1,2}^1 \\
 &= 0,000112 + 0,000082 + 0,000364 + 0,000476 = 0,0004789 \text{ м} \\
 &= 0,479 \text{ мм}.
 \end{aligned}$$

Аналогично рассчитываются прогибы во всех точках с заданными координатами. По их значениям можно построить графики линий упругого прогиба, на которых можно задать точки установки марок-реек для измерения прогибов.

На рис. 4.4 показаны графики прогибов бетонного покрытия от опоры ВС В747-400D для коэффициента постели 50 МН/м³ и значений упругой характеристики плиты 1,0, 1,5, 2,0 м. При расчете прогибов в данном случае условие прочности покрытия по изгибающим моментам не проверялось.

Для планирования натуральных испытаний необходимо для исследуемой конструкции выбрать испытательную нагрузку, удовлетворяющую условиям (1.29, 1.30). Рассмотрим пример выбора типа ВС, используемого для испытания бетонного покрытия на упрочненном основании из мелкозернистого бетона для остаточного срока службы 8 лет. Исходные данные приведены в табл. 4.1 и на рис. 4.5.

Таблица 4.1

Параметр	Значение
Дорожно-климатическая зона	II
Широта	52° северной широты
Группа участков покрытия	A

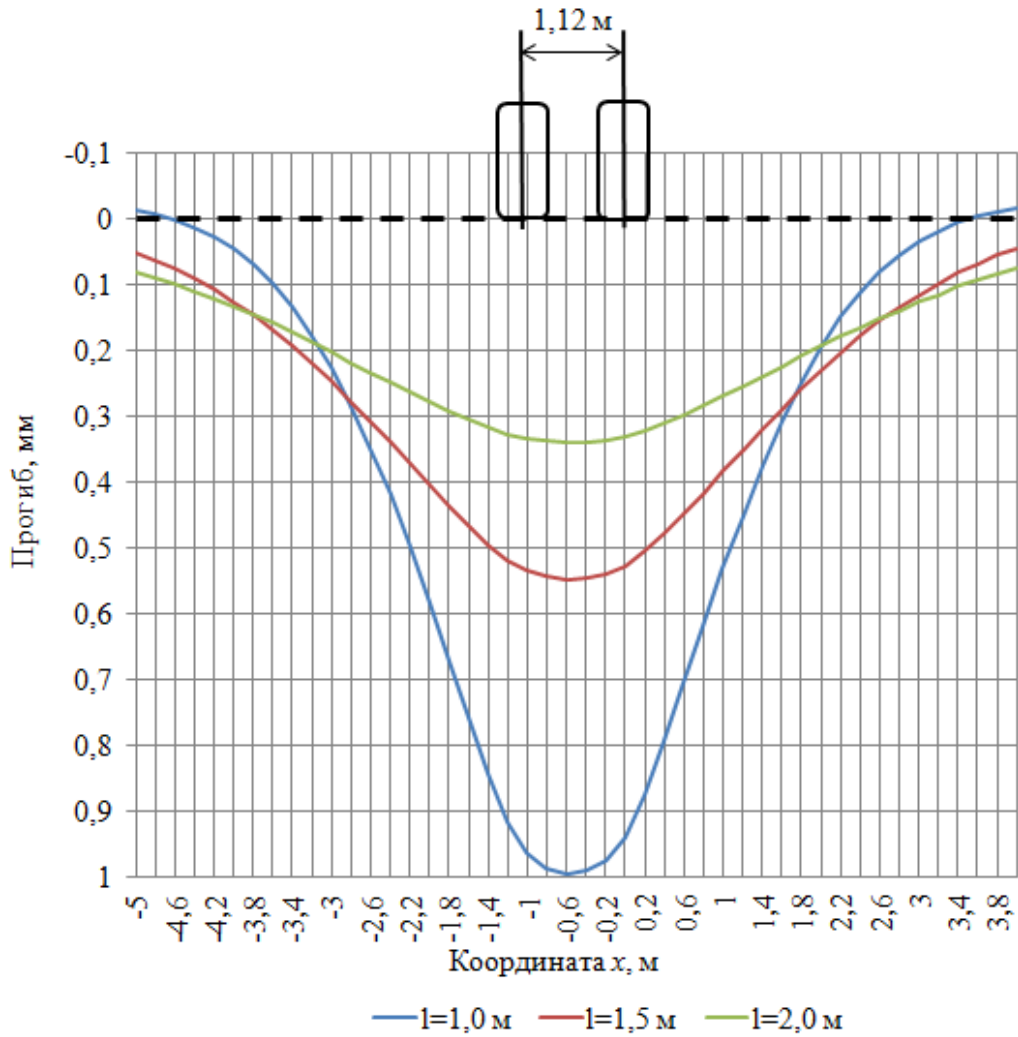


Рисунок 4.4 – Линии упругого прогиба под нагрузкой под опорой ВС В747-400D в зависимости от упругой характеристики плиты

Приведенная конструкция предварительно оценивается кодом PCN 47/R/C/W/T. Для ее испытаний выбрано ВС В747-400D, характеристики которого представлены на рис. 4.2. Сравнение кодов ACN В747-400D и PCN покрытия показывает, что В747-400D может эксплуатировать аэродромное покрытие без ограничений, т.к. выполняется условие (1.34).

Определим исходные данные для предварительной оценки прогибов покрытия.



Рисунок 4.5 – Конструкция испытываемого покрытия

Эквивалентный коэффициент постели определим по формуле (3.7):

$$\alpha_2 = \frac{t_{s2}[1,6D_r - (t_{s1} + 0,5t_{s2})]}{t_{s1}(1,6D_r - 0,5t_{s1})} = 0$$

$$\alpha_3 = \frac{0,5[1,6D_r - (t_{s1} + t_{s2})]^2}{t_{s1}(1,6D_r - 0,5t_{s1})} = \frac{0,5(1,6 \cdot 3,6 - 0,5)^2}{0,5(1,6 \cdot 3,6 - 0,5 \cdot 0,5)} = 5,02;$$

$$K_{se} = \frac{120 + 48 \cdot 5,02}{1 + 5,02} = 59,96 \text{ МН/м}^3.$$

Для расчета упругой характеристики плиты определим суммарную жесткость конструкции по формуле (3.6):

$$\begin{aligned} B_{tot} &= 0,085(E_b t^3 + E_f t_f^3) = 0,085(32400 \cdot 0,34^3 + 14000 \cdot 0,2^3) = \\ &= 117,763 \text{ МПа} \cdot \frac{\text{м}^4}{\text{м}}. \end{aligned}$$

Упругая характеристика плиты равна:

$$l = \sqrt[4]{\frac{B_{tot}}{K_{se}}} = \sqrt[4]{\frac{117,763}{59,96}} = 1,184 \text{ м}.$$

При таких исходных данных прогибы от воздействия опоры ВС В747-400D показаны на рис. 4.6. Расчетная схема опоры и координат плиты приведена на рис. 4.3. Как видно, линия упругого прогиба имеет перегиб на расстоянии 1,184 м, что соответствует физическому смыслу упругой характеристики плиты (см. рис. 3.4).

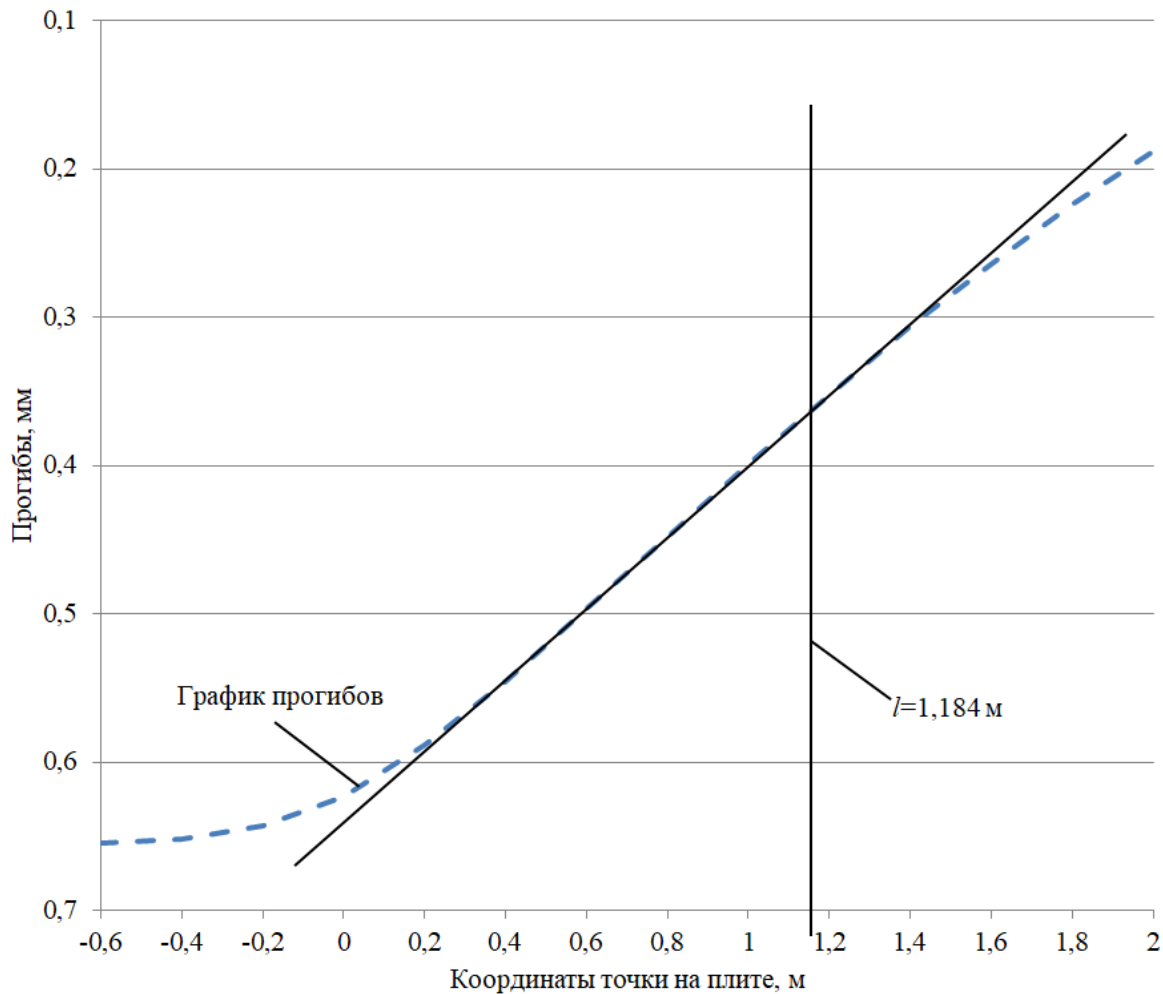


Рисунок 4.6 – Линии упругого прогиба от нагрузки опорой В747-400D

Прогибы покрытия от В747-400D в пределах упругой характеристики плиты $l = 1,184$ м составляют от 0,65 до 0,36 мм. Такие прогибы соответствуют разрешающей способности измерительного прибора (нивелира). Следовательно, это ВС можно использовать для испытаний данной конструкции. На рис. 4.7 приведена схема испытаний конструкции.

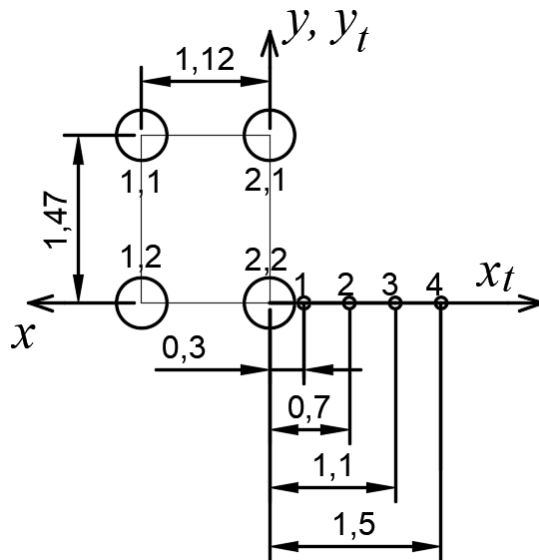


Рисунок 4.7 – Схема измерения прогибов покрытия опорой В747-400D

4.2 Расчет характеристик жесткого покрытия по измеренным прогибам

В режиме обработки результатов испытаний программа Tesaf по измеренным прогибам выполняет оценку расчетных характеристик жесткого аэродромного покрытия. Исходными данными программы являются характеристики опоры испытательного средства и координаты точек измерения прогибов в системе координат рис. 3.2.

В табл. 4.2 для примера приведены значения прогибов в точках измерения, показанных на схеме рис. 4.7 при испытании конструкции ВС В747-400D в весенний период.

Программа определяет упругую характеристику плиты по формуле (3.32). Для этого она рассчитывает отношения прогибов (3.27) для каждой точки испытаний. Приведем пример расчета матрицы отношений прогибов для первой точки испытаний (см. первую строку табл. 4.2).

$$\begin{bmatrix} 0,63 & 0,63 & 0,63 \\ 0,52 & 0,41 & 0,31 \\ 0 & 0,52 & 0,51 \\ 0 & 0 & 0,41 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,212 & 1,534 & 2,029 \\ 0 & 1,267 & 1,673 \\ 0 & 0 & 1,322 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Таблица 4.2

Номер испытания	Прогиб (мм) плиты на расстоянии (м) от начала координат			
	0,3	0,7	1,1	1,5
1	0,63	0,52	0,41	0,31
2	0,61	0,5	0,39	0,29
3	0,58	0,47	0,36	0,26
4	0,6	0,49	0,37	0,27
5	0,62	0,51	0,4	0,3
6	0,58	0,47	0,36	0,26
7	0,69	0,58	0,47	0,37
8	0,62	0,51	0,4	0,29
9	0,53	0,42	0,31	0,21
10	0,61	0,5	0,38	0,28
11	0,56	0,45	0,34	0,24
12	0,59	0,48	0,37	0,26
13	0,64	0,53	0,42	0,32
14	0,61	0,5	0,39	0,29
15	0,52	0,41	0,3	0,19
16	0,6	0,49	0,38	0,28
17	0,64	0,53	0,42	0,31
18	0,71	0,6	0,48	0,38
19	0,58	0,47	0,35	0,25
20	0,56	0,45	0,33	0,23
21	0,65	0,54	0,43	0,33
22	0,67	0,56	0,44	0,34

Для каждой пары прогибов вычисляется их отношение, по которому на заданном интервале производится поиск упругой характеристики плиты, удовлетворяющей условию (3.32).

Как видно на рис. 4.8, процесс поиска начинается с $l_{min} = 0,5$ м и заканчивается при пересечении прямой линий отношений фактических прогибов 1,212 (первое значение отношений матрицы (4.1)) с линией отношений теоретических прогибов при $l = 1,14$ м.

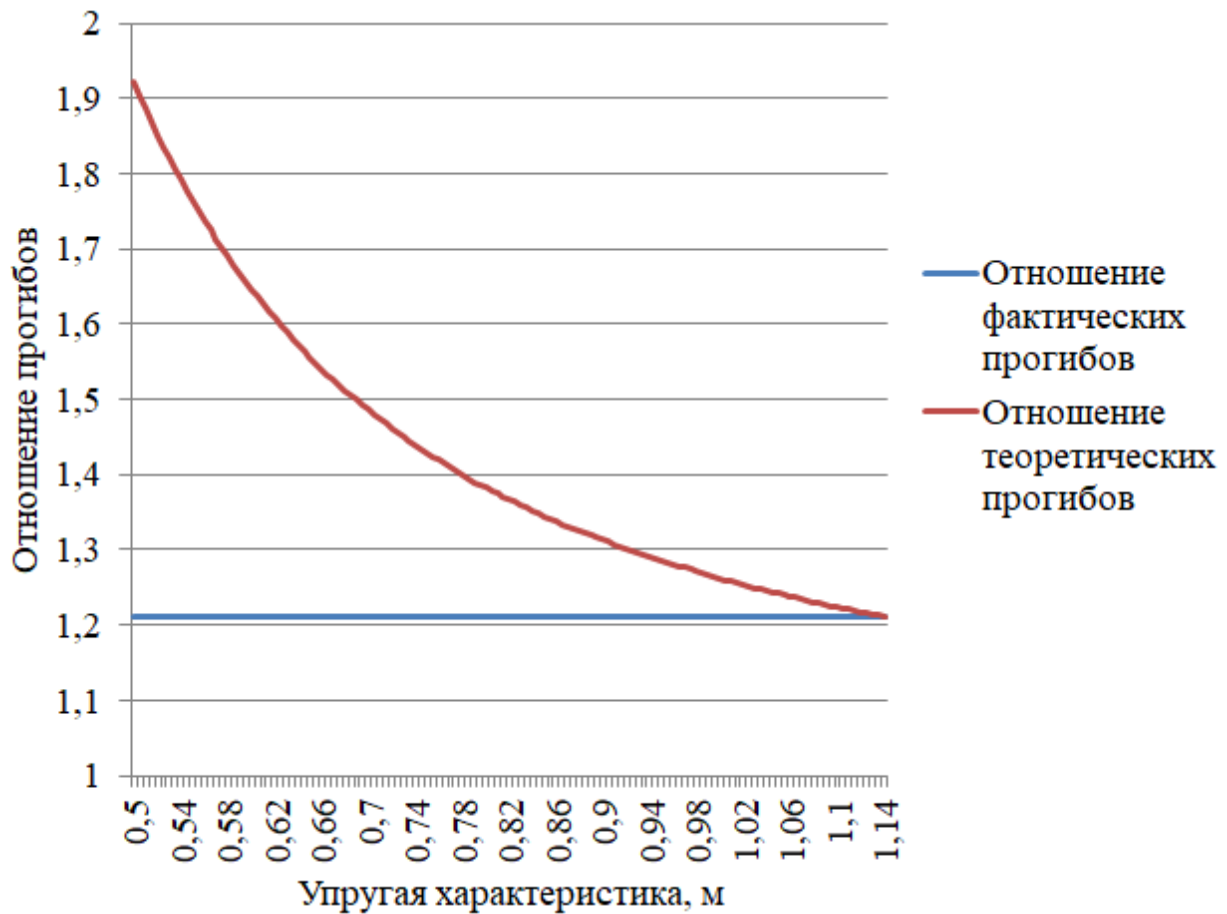


Рисунок 4.8 – Поиск значения упругой характеристики плиты по отношению прогибов

На каждом шаге поиска вычисляется отношение теоретических прогибов по формулам (3.28), (3.29), (3.33) с помощью функций Бесселя [47, 50].

В табл. 4.3 приведен пример расчета функции $S\left(\frac{r_{i,j}^{a(b)}}{l}\right) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n f_0\left(\frac{r_{i,j}^{a(b)}}{l}\right)$ (см. описание формулы (3.29)) для $l = 1,14$ м при сосредоточенной нагрузке.

Таблица 4.3

Номер колеса i, j	Номер точки k	$r_{i,j}^k$	$\xi_{i,j}^k = \frac{r_{i,j}^k}{l}$	$f_0(\xi_{i,j}^k)$
1,1	1	2,044	1,793	0,160
1,2	1	1,42	1,246	0,262
2,1	1	1,50	1,316	0,247
2,2	1	0,3	0,263	0,473
$\sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 f_0(\xi_{i,j}^1)$				1,142
1,1	2	2,340	2,052	0,122
1,2	2	1,820	1,597	0,193
2,1	2	1,628	1,428	0,225
2,2	2	0,7	0,614	0,403
$\sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 f_0(\xi_{i,j}^2)$				0,944

Отношение прогибов для схемы рис. 4.7 при $l = 1,14$ м равно

$$\frac{S\left(\frac{r_{i,j}^a}{ld_n}\right)}{S\left(\frac{r_{i,j}^b}{ld_n}\right)} = \frac{\sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 f_0(\xi_{i,j}^1)}{\sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 f_0(\xi_{i,j}^2)} = \frac{1,142}{0,944} = 1,211.$$

Сравним полученное отношение прогибов при $l = 1,14$ м с отношением фактических прогибов (см. первое значение матрицы (4.1)). Погрешность отношений прогибов при определении упругой характеристики составила

$$\frac{1,212 - 1,211}{1,212} \cdot 100 = 0,07\%.$$

Это незначительная погрешность для решаемой задачи.

В результате поиска по каждому отношению прогибов из матрицы (4.1) получается ряд значений упругой характеристики:

$$1,140 \quad 1,155 \quad 1,165 \quad 1,165 \quad 1,175 \quad 1,180.$$

Среднее значение упругой характеристики в точке испытаний 1 равно 1,163 м.

Соответствующие значения коэффициента постели рассчитываются по формуле (3.40). Приведем пример расчета коэффициента постели для сосредоточенной нагрузки. Для прогиба 0,63 мм при среднем в точке 1 значении упругой характеристики $\bar{l} = 1,163$ м коэффициент постели равен

$$\begin{aligned}
 K_s^1 &= \frac{p^1}{w_{fact}^1} = \frac{1}{w_{fact}^1} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n p_{ij}^1 = \frac{1}{w_{fact}^1} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n -\frac{F_d}{4l^2} f_0 \left(\frac{r_{i,j}^1}{\bar{l}} \right) = \\
 &= -\frac{F_d}{4l^2 w_{fact}^1} \left[f_0 \left(\frac{r_{1,1}^1}{\bar{l}} \right) + f_0 \left(\frac{r_{2,1}^1}{\bar{l}} \right) + f_0 \left(\frac{r_{1,2}^1}{\bar{l}} \right) + f_0 \left(\frac{r_{2,2}^1}{\bar{l}} \right) \right] = \\
 &= -\frac{162,38}{4 \cdot 1,163^2 \cdot 0,63} \left[f_0 \left(\frac{2,044}{1,163} \right) + f_0 \left(\frac{1,500}{1,163} \right) + f_0 \left(\frac{1,420}{1,163} \right) + f_0 \left(\frac{0,300}{1,163} \right) \right] = \\
 &= \frac{162,38}{4 \cdot 1,163^2 \cdot 0,63} [f_0(1,757) + f_0(1,290) + f_0(1,221) + f_0(0,258)] = \\
 &= 47,64 \cdot (0,166 + 0,252 + 0,267 + 0,474) = 55,213 \frac{\text{МН}}{\text{м}^3}.
 \end{aligned}$$

Аналогично рассчитываются значения коэффициента постели для остальных точек измерения прогибов. В результате получился ряд:

$$55,213 \quad 55,526 \quad 55,531 \quad 55,195 \quad 55,366.$$

Среднее значение коэффициента постели в первой точке испытаний равно 55,366 МН/м³, оно записано в первой строке табл. 4.4.

Жесткость конструкции программа Tesaf вычисляет для каждой точки измерения прогибов по формуле (3.43). Статистические ряды значений упругой характеристики плиты, коэффициента постели и жесткости приведены для рассматриваемого примера в табл. 4.4.

Следует отметить, что в табл. 4.2 и 4.4 содержатся значения статистических рядов, в которых были удалены элементы, не удовлетворяющие критериям нормального распределения.

Таблица 4.4

Номер испытания	Упругая характери- стика плиты, м	Коэффициент по- стели, МН/м ³	Жесткость конструк- ции, МПа · $\frac{м^4}{м}$
1	1,163	55,366	101,289
2	1,129	59,336	96,404
3	1,076	66,066	88,558
4	1,077	63,747	85,767
5	1,147	57,267	99,12
6	1,076	66,065	88,558
7	1,265	45,424	116,319
8	1,121	58,728	92,74
9	0,987	79,836	75,765
10	1,093	61,589	87,899
11	1,04	71,191	83,284
12	1,069	65,264	85,228
13	1,181	53,487	104,051
14	1,129	59,336	96,404
15	0,945	84,952	67,749
16	1,111	61,484	93,674
17	1,153	54,917	97,057
18	1,259	44,376	111,494
19	1,044	68,448	81,314
20	1,008	73,687	76,074
21	1,197	51,757	106,254
22	1,193	50,369	102,029
Среднее	1,124	60,364	94,411

4.3 Статистическая обработка результатов испытаний

4.3.1 Методика анализа статистического ряда

Для статистической обработки результатов испытаний разработана программа Statist.

Так как разрабатываемая методика оценки несущей способности жестких аэродромных покрытий предусматривается при планировании режимов эксплуатации аэродромов ВС, она должна основываться на действующих нормах. Поэтому для статистической обработки результатов испытаний аэродромных покрытий используется ГОСТ [35].

В соответствии с [35] программа Statist вычисляет оценки:

- среднего арифметического \bar{x} ряда x_j ($j = 1, 2, \dots, n$);
- асимметрии совокупности (нормированного центрального момента третьего порядка)

$$\sqrt{\beta_1} = \frac{\mu_3}{\sigma^3}, \quad (4.2)$$

где μ_3 – центральный момент третьего порядка;

$\sigma = \sqrt{\mu_2}$ – стандартное отклонение совокупности;

μ_2 – дисперсия совокупности (центральный момент второго порядка);

- эмпирической кривизны совокупности (нормированного центрального момента четвертого порядка)

$$\beta_2 = \frac{\mu_4}{\mu_2^2}, \quad (4.3)$$

где μ_4 – центральный момент четвертого порядка.

Проверка гипотезы нормальности распределения статистических рядов выполняется направленными и многосторонними критериями.

При анализе ряда направленным критерием $\sqrt{\beta_1}$ нулевая гипотеза о нормальном распределении не отклоняется, если выполняется условие

$$|\sqrt{\beta_1}| \leq [\sqrt{\beta_1}]_{n,\alpha}, \quad (4.4)$$

где $[\sqrt{\beta_1}]_{n,\alpha}$ – p -квантиль при уровне значимости α и объеме выборки n .

При анализе ряда направленным критерием β_2 нулевая гипотеза о нормальном распределении не отклоняется, если выполняется условие

$$\beta_2 < 3 \wedge \beta_2 \geq [\sqrt{\beta_2}]_{n,p=\alpha} \vee \beta_2 > 3 \wedge \beta_2 \leq [\sqrt{\beta_2}]_{n,p=1-\alpha} \quad (4.5)$$

где $[\sqrt{\beta_2}]_{n,p}$ – p -квантиль при уровне значимости α и объеме выборки n .

Согласно [35] для проверки выборки, имеющей объем $8 \leq n \leq 50$, применяются многосторонние критерии Шапиро – Уилка и Эпса – Палли.

Критерий Шапиро – Уилка выбирается при условии

$$|\sqrt{\beta_1}| < \frac{1}{2} \wedge \beta_2 < 3 \vee |\sqrt{\beta_1}| > \frac{1}{2}. \quad (4.6)$$

В противном случае выбирается критерий Эпса – Палли. В программе Statis могут быть вычислены эти критерии при выборе соответствующего режима работы.

Статистика критерия Шапиро – Уилка имеет вид [35]

$$W = \frac{S^2}{n\mu_2}, \quad (4.7)$$

где $S = \sum_{k=1}^m a_k [x_{n+1-k} - x_k]$;

k – индекс, имеющий значения от 1 до $n/2$ при четном n и от 1 до $(n-1)/2$ при нечетном;

a_k – коэффициент, определяемый по таблице [35] в зависимости от объема выборки и индекса k .

Нулевая гипотеза о нормальном распределении ряда не отклоняется по критерию Шапиро – Уилка, если

$$W > [W]_{n,0,05}. \quad (4.8)$$

Нулевая гипотеза о нормальном распределении ряда не отклоняется по критерию Эпса – Палли если

$$T_{EP} \leq [T_{EP}]_{n,\alpha} \quad (4.9)$$

где $[T_{EP}]_{n,\alpha}$ – p -квантиль статистики критерия Эпса – Палли при уровне значимости α и объеме выборки n ;

T_{EP} – статистика критерия Эппса – Палли, вычисляемая по формуле [35]

$$T_{EP} = 1 + \frac{n}{\sqrt{3}} + \frac{2}{n} \sum_{k=2}^n \sum_{j=1}^{k-1} \exp \left[\frac{-(x_j - x_k)^2}{2\mu_2} \right] - \sqrt{2} \sum_{j=1}^n \exp \left[\frac{-(x_j - \bar{x})^2}{4\mu_2} \right]. \quad (4.10)$$

Для проверки соответствия эмпирического распределения теоретическому нормальному распределению в программе Statis используется метод хи-квадрат критерия Пирсона. В этом методе расхождение между эмпирическими частотами распределения исследуемой величины и теоретическими частотами нормального распределения оценивается критерием χ^2 :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - n'_i)^2}{n'_i}; \quad (4.11)$$

где k – количество интервалов;

n_i – эмпирическая частота;

n'_i – теоретическая частота попадания наблюдений в i -й интервал:

$$n'_i = N \cdot P_i; \quad (4.12)$$

N – объем наблюдений;

P_i – теоретическая вероятность, численно равная площади, ограниченной сверху кривой распределения Гаусса, а снизу – верхней и нижней границами i -го интервала:

$$P_i = P(x_{iH} \leq x \leq x_{iB}) = \Phi(z_{i+1}) - \Phi(z_i); \quad (4.13)$$

x_{iH} и x_{iB} – соответственно нижняя и верхняя границы i -го интервала;

z_i и z_{i+1} – нормированные случайные величины:

$$z_i = \frac{x_{iH} - \bar{x}}{S_x}; \quad (4.14)$$

$$z_{i+1} = \frac{x_{iB} - \bar{x}}{S_x};$$

$\Phi(z_i)$ и $\Phi(z_{i+1})$ – интегралы вероятностей [10]:

$$\Phi(z_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{z_i} e^{-\frac{z^2}{2}} dz; \quad (4.15)$$

$$\Phi(z_{i+1}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{z_{i+1}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz.$$

Гипотеза о нормальном распределении не отклоняется по критерию Пирсона при выполнении условия

$$\chi^2 < \chi_{\text{кр}}^2; \quad (4.16)$$

где $\chi_{\text{кр}}^2$ – критическое значение критерия хи-квадрат, определяемое по таблице [10] при уровне значимости α и числе степеней свободы f :

$$f = k - r - 1; \quad (4.17)$$

где r – число выборочных оценок, использованное для расчета теоретических частот n'_i , равное двум.

После приведения статистического ряда к нормальному закону распределения вычисляются действительные значения исследуемых величин по формуле

$$x = \bar{x} - z_{1-\alpha} \cdot S_x, \quad (4.18)$$

где \bar{x}, S_x – среднее значение и среднеквадратическое отклонение случайной величины;

$z_{1-\alpha}$ – параметр нормированного нормального распределения при уровне значимости α , определяемый по табл. 3.3.

4.3.2 Расчет статистических оценок характеристик напряженно-деформированного состояния бетонного и армобетонного покрытия

Рассмотрим пример оценки статистических рядов коэффициента постели и жесткости конструкции из табл. 4.4 с помощью программы Statist.

Среднее значение коэффициента постели

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j = \frac{1}{22} \sum_{j=1}^{22} x_j = 61,486 \frac{\text{МН}}{\text{м}^3}.$$

Смещенные центральные моменты равны:

– второго порядка

$$m_2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2 = \frac{1}{22} \sum_{j=1}^{22} (x_j - 61,486)^2 = 99,475 \frac{\text{МН}^2}{\text{М}^6}.$$

– третьего порядка (оценка асимметрии)

$$m_3 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^3 = \frac{1}{22} \sum_{j=1}^{22} (x_j - 61,486)^3 = 447,174$$

– четвертого порядка (оценка эксцесса)

$$m_4 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^4 = \frac{1}{22} \sum_{j=1}^{22} (x_j - 61,486)^4 = 28880,115$$

Соответствующие несмещенные моменты равны:

– второго порядка

$$\mu_2 = \frac{n}{n-1} m_2 = \frac{22}{21} \cdot 99,475 = 104,212.$$

– третьего порядка

$$\mu_3 = \frac{n^2}{(n-1)(n-2)} m_3 = \frac{22^2}{21 \cdot 20} \cdot 447,174 = 515,315$$

– четвертого порядка

$$\begin{aligned} \mu_4 &= \frac{n(n^2 - 2n + 3)m_4 - 3n(2n - 3)m_2^2}{(n-1)(n-2)(n-3)} = \\ &= \frac{22(22^2 - 2 \cdot 22 + 3) \cdot 28880,115 - 3 \cdot 22 \cdot (2 \cdot 22 - 3) \cdot 99,475^2}{21 \cdot 20 \cdot 19} = \\ &= 31915,886. \end{aligned}$$

Асимметрия совокупности рассчитывается по формуле (4.2)

$$\sqrt{\beta_1} = \frac{\mu_3}{\sigma^3} = \frac{\mu_3}{\mu_2^{3/2}} = \frac{515,315}{104,212^{3/2}} = 0,484.$$

Эмпирическая кривизна совокупности рассчитывается по формуле (4.3)

$$\beta_2 = \frac{\mu_4}{\mu_2^2} = \frac{31915,886}{104,212^2} = 2,939.$$

Проверка условия (4.4) при $n = 22, \alpha = 0,05$

$$|0,484| \leq 0,746$$

При анализе ряда направленным критерием $\sqrt{\beta_1}$ нулевая гипотеза о нормальном распределении не отклоняется.

Проверка условия (4.5) при $n = 22, \alpha = 0,05$

$$2,939 < 3 \wedge 2,9391 \geq 1,856 \vee 2,939 > 3 \wedge 2,939 \leq 4,166.$$

Условие выполняется, нулевая гипотеза о нормальном распределении не отклоняется.

Для выбора многостороннего критерия проверяется условие (4.6)

$$0,484 < 0,5 \wedge 2,939 < 3 \vee 0,484 > 0,5.$$

Условие выполняется, поэтому производится проверка многосторонним критерием Шапиро – Уилка.

$$W = \frac{S^2}{n\mu_2} = \frac{46,221^2}{22 \cdot 104,212} = 0,932$$

Проверка условия (4.8) при $n = 22, \alpha = 0,05$

$$0,932 > 0,911.$$

Условие выполняется. В результате проверки статистического ряда направленными и многосторонними критериями принимается гипотеза о нормальном распределении ряда коэффициентов постели с оценками:

$$\bar{K}_s = 61,486 \frac{\text{МН}}{\text{м}^3}; S_{K_s} = 10,208 \frac{\text{МН}}{\text{м}^3}; V_{K_s} = 0,166.$$

Аналогично анализу статистического ряда коэффициентов постели программой Statis выполняется оценка характеристик конструкции бетонного покрытия, расчетная схема которого показана на рис. 3.1. Как видно из схемы определения допустимой нагрузки (рис. 4.1), для ее определения необходимы оценки жесткостей и толщин слоев конструкции, а также характеристик бетона, полученных при обработке результатов испытаний кернов.

В результате анализа соответствующих статистических рядов получены следующие оценки:

жесткости бетонного покрытия

$$\bar{B}_b = 83,072 \text{ МПа} \cdot \text{м}^4/\text{м}; S_{B_b} = 11,023 \text{ МПа} \cdot \text{м}^4/\text{м}; V_{B_b} = 0,133;$$

жесткости упрочненного основания

$$B_f = 9,52 \text{ МПа} \cdot \text{м}^4/\text{м};$$

коэффициента постели

$$\bar{K}_S = 61,486 \frac{\text{МН}}{\text{м}^3}; S_{K_S} = 10,208 \frac{\text{МН}}{\text{м}^3}; V_{K_S} = 0,166;$$

толщины бетонного слоя покрытия

$$\bar{t} = 0,32 \text{ м}; S_t = 0,012 \text{ м}; V_t = 0,038;$$

расчетного сопротивления бетона растяжению при изгибе

$$\bar{R}_{tb} = 3,51 \text{ МПа}; S_{R_{tb}} = 0,14 \text{ МПа}; V_{R_{tb}} = 0,04.$$

Полученные оценки используются для разыгрывания аргументов расчетного и предельного изгибающих моментов по формулам (1.29, 1.30) при расчете допустимой нагрузки на покрытие.

Действительные значения характеристик бетонного покрытия и основания определены по формуле (4.18). При остаточном сроке службы 8 лет надежность, определенная по табл. 3.3, $P = 0,87$. Соответствующее значение $z_{1-\alpha} = 1,14$. При этих значениях

$$B_b = \bar{B}_b - z_{1-\alpha} \cdot S_{B_b} = 83,072 - 1,14 \cdot 11,023 = 70,506 \text{ МПа} \cdot \text{м}^4/\text{м};$$

$$K_S = \bar{K}_S - z_{1-\alpha} \cdot S_{K_S} = 61,486 - 1,14 \cdot 10,208 = 49,849 \frac{\text{МН}}{\text{м}^3};$$

$$t = \bar{t} - z_{1-\alpha} \cdot S_t = 0,32 - 1,14 \cdot 0,012 = 0,31 \text{ м};$$

$$R_{tb} = \bar{R}_{tb} - z_{1-\alpha} \cdot S_{R_{tb}} = 3,51 - 1,14 \cdot 0,14 = 3,35 \text{ МПа}.$$

4.4 Статистическое моделирование допустимой нагрузки

Математическая модель бетонных аэродромных покрытий, использующая полученные в результате испытаний статистические характеристики, приведена в п. 3.5. Для расчета допустимой нагрузки методом статистического моделирования Монте-Карло формируется статистический ряд допустимых нагрузок F_{n_i} , удовлетворяющих условию (3.48). Моделирование выполняется с помощью программы ModFn разработанной в соответствии с п.3.5.3. Полученный ряд приводится в соответствие с нормальным законом распределения.

Рассмотрим пример статистического моделирования допустимой нагрузки на опору ВС В747-400D при исходных данных, приведенных в табл. 4.5. Характеристики опоры показаны на рис. 4.2.

Таблица 4.5

Наименование	Обозначение	Значение	Единица измерения
Переходный коэффициент от изгибающего момента при центральном нагружении к моменту при краевом нагружении плиты	k	1,2	–
Коэффициент, учитывающий накопление остаточных прогибов в основании из материалов, не обработанных вяжущими	k_N	1	–
Коэффициент, учитывающий число приложений колесных нагрузок воздушных судов за проектный срок службы покрытия	k_u	1	–
Число колес на опоре	n_k	4	–
Внутреннее давление воздуха в пневматиках колес	p_a	1,04	МПа
Коэффициент динамичности	k_d	1,25	–
Среднее значение жесткости сечения плиты, отнесенной к единице ширины ее сечения	\bar{B}_b	83,072	МПа · м ⁴ /м
Среднеквадратическое отклонение жесткости сечения плиты	S_{B_b}	11,023	МПа · м ⁴ /м
Жесткость сечения упрочненного основания	B_f	9,52	МПа · м ⁴ /м
Среднее значение коэффициента постели	\bar{K}_s	61,486	МН/м ³

Наименование	Обозначение	Значение	Единица измерения
Среднеквадратическое отклонение коэффициента постели	S_{K_s}	10,208	МН/м ³
Среднее значение толщины покрытия	\bar{t}	0,32	м
Среднеквадратическое отклонение толщины покрытия	S_t	0,012	м
Среднее значение расчетного сопротивления бетона растяжению при изгибе	\bar{R}_{tb}	3,51	МПа
Среднеквадратическое отклонение сопротивления бетона растяжению при изгибе	$S_{R_{tb}}$	0,14	МПа
Число разыгрываемых вариантов	n	200	—

Результаты моделирования статистического ряда размерностью 200 элементов приведены в приложении В.

Для анализа рядов с такой размерностью использован критерий Пирсона. Как показала проверка по критерию Пирсона, ряд не соответствует нормальному закону:

$$\chi^2 = 37,5 > \chi_{кр}^2(0,05; 6) = 12,6.$$

Поэтому из ряда был удален максимальный элемент, который вносил самый весомый вклад в сумму χ^2 .

После удаления максимального элемента программой Statis были рассчитаны критерии асимметрии и кривизны и критерий хи-квадрат.

Проверка асимметрии не отклонила нулевую гипотезу о нормальном распределении ряда.

Асимметрия, рассчитанная по формуле (4.2), равна

$$\sqrt{\beta_1} = \frac{\mu_3}{\sigma^3} = \frac{\mu_3}{\mu_2^{3/2}} = \frac{104808,6}{6467,1^{3/2}} = 0,202.$$

Эмпирическая кривизна совокупности рассчитывается по формуле (4.3)

$$\beta_2 = \frac{\mu_4}{\mu_2^2} = \frac{13029862}{6467,1^2} = 3,116.$$

Выполняется условие [35]

$$\beta_2 = 3,116 > (\sqrt{\beta_1})^2 + 1 = 1,041.$$

Проверка условия (4.4) при $n = 199, \alpha = 0,05$

$$0,202 < 0,28$$

не отклоняет нулевую гипотезу о нормальном распределении.

Проверка ряда по критерию кривизны:

$$\beta_2 = 3,116 < [\beta_2]_{199;0,95} = 3,57$$

показала соответствие статистического ряда гипотезе о нормальном распределении.

Дальнейший анализ был выполнен критерием Пирсона, расчет которого приведен в табл. 4.6. На рис. 4.9 показана гистограмма распределения допустимой нагрузки. Характер распределения эмпирических и теоретических частот свидетельствует в пользу гипотезы о нормальном распределении статистического ряда смоделированных нагрузок. Проверка критерия Пирсона была выполнена при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $f = 9 - 3 = 6$:

$$\chi^2 = 3,522 < \chi_{кр}^2(0,05; 6) = 12,6.$$

По результатам этой проверки принята гипотеза о нормальном распределении смоделированного по результатам испытаний ряда допустимых для конструкции бетонного покрытия нагрузок. Вычислены статистические оценки:

- среднее значение допустимой нагрузки от опоры ВС В747-400D равно $\bar{F} = 616,624$ кН
- среднеквадратическое отклонение $S_F = 80,418$ кН.

Таблица 4.6

Интервал		Эмпирическая частота n_i	Нормированные случайные величины		Интегралы вероятностей		Вероятность попадания в интервал $P_i = \Phi(z_{i+1}) - \Phi(z_i)$	Теоретическая частота $n'_i = NP_i$	$\frac{(n_i - n'_i)^2}{n'_i}$
№	середина		$z_i = \frac{x_{iH} - \bar{F}}{S_F}$	$z_{i+1} = \frac{x_{iB} - \bar{F}}{S_F}$	$\Phi(z_i)$	$\Phi(z_{i+1})$			
1	455,67	8	-2,342	-1,671	0,01	0,047	0,038	7,519	0,031
2	509,509	21	-1,671	-1	0,047	0,159	0,111	22,158	0,061
3	563,349	46	-1	-0,329	0,159	0,371	0,213	42,293	0,325
4	617,188	52	-0,329	0,343	0,371	0,634	0,263	52,3	0,002
5	671,028	40	0,343	1,014	0,634	0,845	0,211	41,909	0,087
6	724,867	23	1,014	1,685	0,845	0,954	0,109	21,76	0,071
7	778,707	7	1,685	2,356	0,954	0,991	0,037	7,315	0,014
8	832,546	1	2,356	3,027	0,991	0,999	0,008	1,593	0,221
9	886,386	1	3,027	3,699	0,999	1	0,001	0,223	2,71
	$N = \sum n_i$	199					$\chi^2 = \sum \frac{(n_i - n'_i)^2}{n'_i}$		3,522

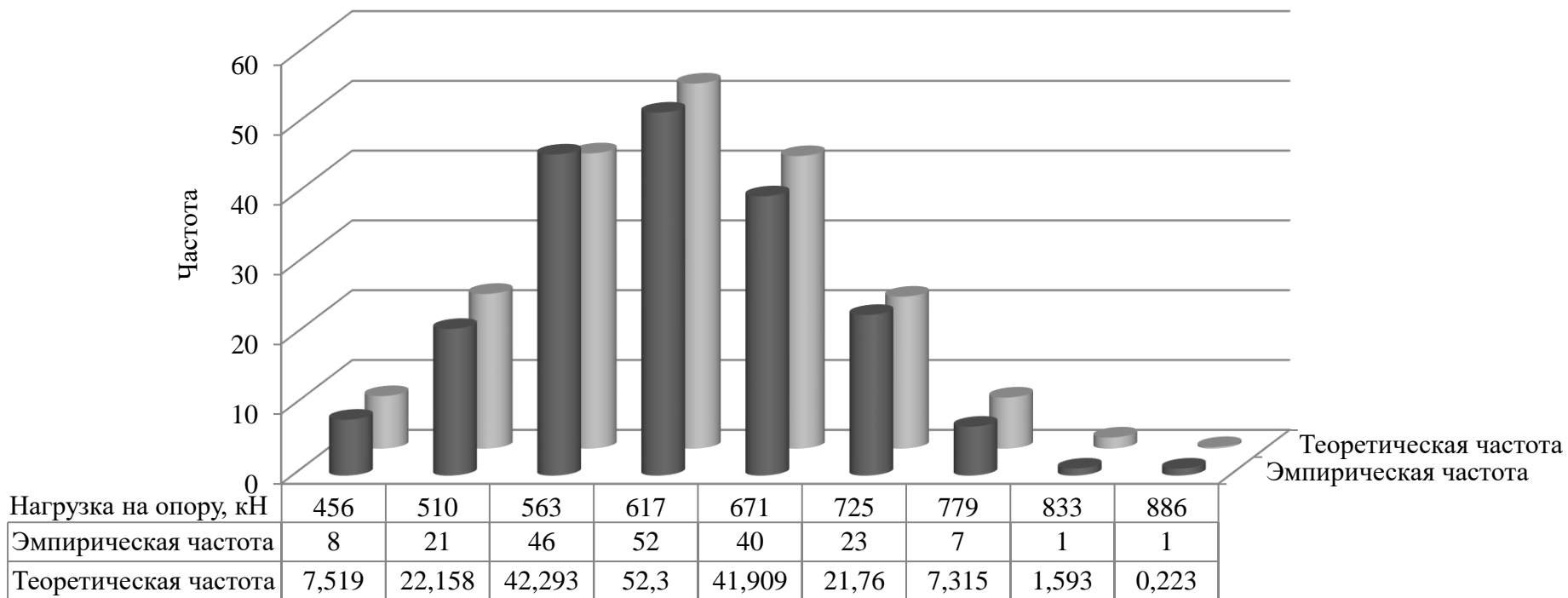


Рисунок 4.9 – Гистограмма распределения допустимой нагрузки

Действительное значение допустимой нагрузки рассчитано по формуле (3.66) при остаточном сроке службы 8 лет. При этом значении надежность $P = 0,87$, параметр нормированного нормального распределения $z_{1-\alpha} = 1,14$ (см. табл. 3.3). Действительное значение допустимой нагрузки от опоры ВС В747-400D равно

$$F_n = 616,624 - 1,14 \cdot 80,418 = 524,947 \text{ кН.}$$

Таким образом, получена оценка несущей способности жесткого аэродромного покрытия $F_n = 524,947$ кН, что является целью данного диссертационного исследования.

В рассмотренном примере оценка выполнена с использованием опоры ВС В747-400D, регулярно эксплуатирующего покрытие и оказывающего наибольшее силовое воздействие на него. Такая оценка является более адекватной по сравнению с использованием нормативной опоры.

Как видно из схемы рис. 4.1, оценка несущей способности аэродромных покрытий должна завершаться определением кода PCN. При использовании для оценки несущей способности конкретного типа ВС методом ACN–PCN классификационное число PCN принимается равным классификационному числу ACN данного типа ВС при действительном значении допустимой нагрузки. В данном случае при $F_n = 524,947$ кН код PCN 34/R/C/W/T.

В табл. 4.7 приведены результаты определения PCN различными методами для покрытия в данном примере.

Таблица 4.7

Вариант	Метод расчета	PCN
1	Расчет по допустимой нагрузке на нормативную опору с учетом проектных исходных данных	47/R/C/W/T
2	Расчет по допустимой нагрузке на нормативную опору с учетом действительных значений B_b, K_S, t, R_{tb}	38/R/C/W/T
3	Расчет по допустимой нагрузке на главную опору ВС с учетом действительных значений B_b, K_S, t, R_{tb}	36/R/C/W/T

Вариант	Метод расчета	PCN
4	Вероятностный расчет по допустимой нагрузке на нормативную опору	37/R/C/W/T
5	Вероятностный расчет по допустимой нагрузке на главную опору ВС (предлагаемый метод)	34/R/C/W/T

Для полученных кодов PCN определены допустимые режимы эксплуатации для В747-400D, В757-200 и В737-400. Они представлены в табл. 4.8, на рис. 4.10 и рис. 4.11.

Таблица 4.8

Вариант	В747-400D	В757-200	В737-400
1	без ограничений	без ограничений	без ограничений
2	10 в сутки; без ограничения интенсивности при массе 245047 кг	2 в сутки; без ограничения интенсивности при массе 98778 кг; 10 в сутки при массе 112786 кг	2 в сутки; без ограничения интенсивности при массе 54637 кг; 10 в сутки при массе 63849 кг
3	2 в сутки; без ограничения интенсивности при массе 233906 кг; 10 в сутки при массе 269295 кг	2 в сутки; без ограничения интенсивности при массе 94600 кг; 10 в сутки при массе 107871 кг	1 в сутки; без ограничения интенсивности при массе 51890 кг; 10 в сутки при массе 60617 кг
4	10 в сутки; без ограничения интенсивности при массе 239476 кг	2 в сутки; без ограничения интенсивности при массе 96689 кг; 10 в сутки при массе 110328 кг	1 в сутки; без ограничения интенсивности при массе 53264 кг; 10 в сутки при массе 62233 кг
5	1 в сутки; без ограничения интенсивности при массе 222765 кг; 10 в сутки при массе 256188 кг	1 в сутки; без ограничения интенсивности при массе 90422 кг; 10 в сутки при массе 102956 кг	2 в неделю; без ограничения интенсивности при массе 49143 кг; 10 в сутки при массе 57385 кг

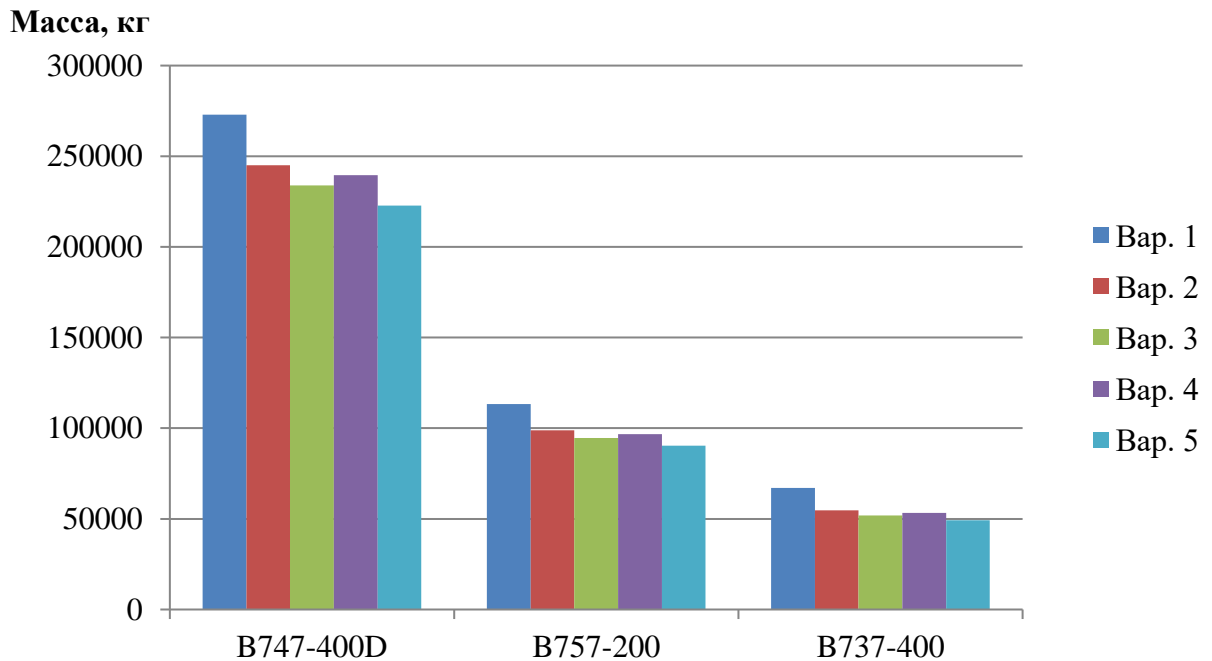


Рисунок 4.10 – Допустимая масса ВС для эксплуатации без ограничения интенсивности движения

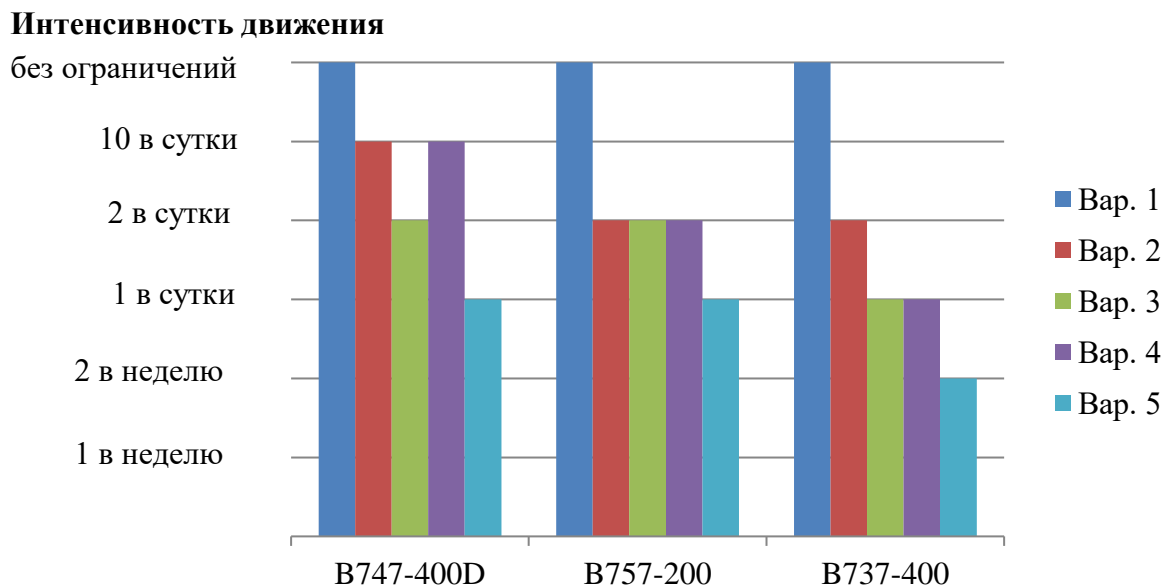


Рисунок 4.11 – Допустимая интенсивность движения для эксплуатации ВС без ограничения по массе

Как видно из табл. 4.8, рис. 4.10 и рис. 4.11, для кода PCN, определенного вероятностным методом по нагрузке на главную опору ВС, требуются большие ограничения интенсивности или массы, чем для PCN, определенных другими методами. Режимы эксплуатации с меньшими ограничениями могут привести к преждевременному разрушению покрытия.

4.5 Расчет несущей способности покрытий взлетно-посадочной полосы аэродрома Ростов-на-Дону по результатам натурных испытаний

В последние несколько лет натурных испытаний аэродромных покрытий не проводилось. Поэтому сравним расчеты несущей способности жесткого аэродромного покрытия по результатам натурных испытаний ВПП аэропорта Ростов-на-Дону Центральный. В 2008-2009 году на ВПП появилось большое количество дефектов. Для установления причин такого явления было выполнено несколько испытаний покрытий институтами ФГУП ГПИ и НИИ ГА «Аэропроект», ОАО «ПИИНИИ ВТ «Ленаэропроект», ОАО «26 ЦНИИ». Испытания ФГУП ГПИ и НИИ ГА «Аэропроект» и ОАО «26 ЦНИИ» выполнялись нагружением покрытия ВС ТУ-154, ОАО «ПИИНИИ ВТ «Ленаэропроект» – ВС В737-400. В результате были получены оценки несущей способности:

ФГУП ГПИ и НИИ ГА «Аэропроект» – PCN 29/R/C/X/T;

ОАО «26 ЦНИИ» – PCN 30/R/C/X/T;

ОАО «ПИИНИИ ВТ «Ленаэропроект» – PCN 35/R/C/X/T.

Одной из причин появления дефектов было превышение нагрузок на покрытия. В дальнейшем, как известно, в Ростове-на-Дону в 2017 году был построен новый аэродром – Платов, т.к. аэропорт Центральный было неэффективно эксплуатировать из-за большой скорости появления дефектов, и у него не было перспектив расширения в связи с расположением в черте города.

Для проверки достоверности разработанных методик и компьютерных программ выполнен расчет допустимой нагрузки на ВПП аэродрома Ростов-на-Дону разработанным вероятностно-статистическим методом и сравнение полученных результатов с выполненными ранее расчетами традиционным нормативным методом вышеуказанными организациями.

При испытаниях ФГУП ГПИ и НИИ ГА «Аэропроект» и ОАО «26 ЦНИИ» было выполнено визуальное обследование покрытий, намечены места испытаний, а также в местах испытаний покрытий ВС были отобраны керны из конструкции, которые были испытаны в лаборатории.

Покрытие ВПП имеет разные конструкции по длине, поэтому рассмотрим среднюю по длине часть ВПП. При отборе кернов были определены толщины слоев. По этим данным конструкция аэродромного покрытия состоит из верхнего слоя армобетона толщинами 20,5 – 23 см, нижнего слоя цементобетона толщиной 15 – 23 см и песка, характеристики которого невозможно определить при бурении. По данным отчета ФГУП ГПИ и НИИ ГА «Аэропроект» нами были определены статистические характеристики толщин конструктивных слоев, представленные в табл. 4.9.

Таблица 4.9

Вид конструктивного слоя	Среднее значение толщины \bar{t} , м	Среднеквадратическое отклонение толщины S_t , м
Армобетон	0,207	0,014
Цементобетон	0,195	0,019

Отобранные керны были испытаны в лаборатории ОАО «26 ЦНИИ» по показателю прочность на растяжение при раскалывании. Испытания на растяжение при раскалывании производились в соответствии с ГОСТ 28570-90 «Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобранным из конструкций». В отчете отмечается, что прочностные характеристики армобетона соответствуют классу бетона на растяжение при изгибе $B_{tb}4,4$, цементобетона – классу бетона на растяжение при изгибе $B_{tb}4,0$. Значения растяжения при изгибе, соответствующие этим классам, были приняты в данной работе при разыгрывании предельных изгибающих моментов в слоях.

При испытании рассматриваемого участка ВПП ВС ТУ-154 были получены значения прогибов, приведенные в табл. 4.10.

Таблица 4.10

№	Прогибы, мм, на расстоянии от расчетного колеса опоры, м		
	0,2	0,6	1,0
1	0,76	0,6	0,44
2	0,82	0,55	0,45
3	0,87	0,74	0,55
4	0,80	0,65	0,46
5	1,04	0,88	0,69
6	1,06	0,8	0,68
7	0,92	0,78	0,61
8	1,0	0,88	0,65
9	0,77	0,65	0,45
10	0,87	0,65	0,55
11	0,86	0,65	0,55
12	1,04	0,73	0,63
13	1,02	0,93	0,65
14	0,97	0,85	0,6
15	1,04	0,81	0,7

В табл. 4.11 приведены значения характеристик конструкции, рассчитанные по данным табл. 4.10 программой Tesaf.

Таблица 4.11

№	Упругая характеристика, м	Коэффициент постели основания, МН/м ³	Суммарная жесткость конструкции, МПа·м ⁴ /м
1	0,887	56,876	35,207
2	0,885	56,919	34,916
3	1,012	41,368	43,390
4	0,888	53,589	33,322
5	1,072	32,003	42,263
6	1,055	33,625	41,656
7	1,072	36,161	47,755
8	1,085	32,633	45,225
9	0,930	52,426	39,218
10	1,035	42,202	48,427
11	1,047	41,820	50,254
12	1,027	36,925	41,077
13	1,147	29,828	51,628
14	1,025	36,523	40,315
15	1,137	30,571	51,093

По результатам статистического анализа ряда суммарных жесткостей конструкции из табл. 4.11 были получены оценки: среднее значение $43,05 \text{ МПа}\cdot\text{м}^4/\text{м}$, среднеквадратическое отклонение $5,958 \text{ МПа}\cdot\text{м}^4/\text{м}$. Эти значения характеризуют жесткости слоев армобетона и цементобетона.

Для разбиения жесткости по слоям использована дополнительно информация о приведенных выше классах бетона и толщинах слоев. С учетом этого были приняты средние значения жесткостей конструктивных слоев:

армобетона – $27,084 \text{ МПа}\cdot\text{м}^4/\text{м}$;

цементобетона – $15,966 \text{ МПа}\cdot\text{м}^4/\text{м}$.

По результатам статистического анализа ряда коэффициентов постели основания были получены статистические оценки:

среднее значение – $40,898 \text{ МН}/\text{м}^3$;

среднеквадратическое отклонение – $9,620 \text{ МН}/\text{м}^3$.

Полученные статистические оценки были использованы программой ModFn для моделирования ряда допустимых нагрузок F_n . В результате розыгрыша методом статистического моделирования Монте-Карло с помощью нормально распределенных случайных чисел по рассчитанным выше значениям средних значений и среднеквадратических отклонений характеристик конструкции был сформирован статический ряд, показанный для наглядности в виде гистограммы рис. 4.12.

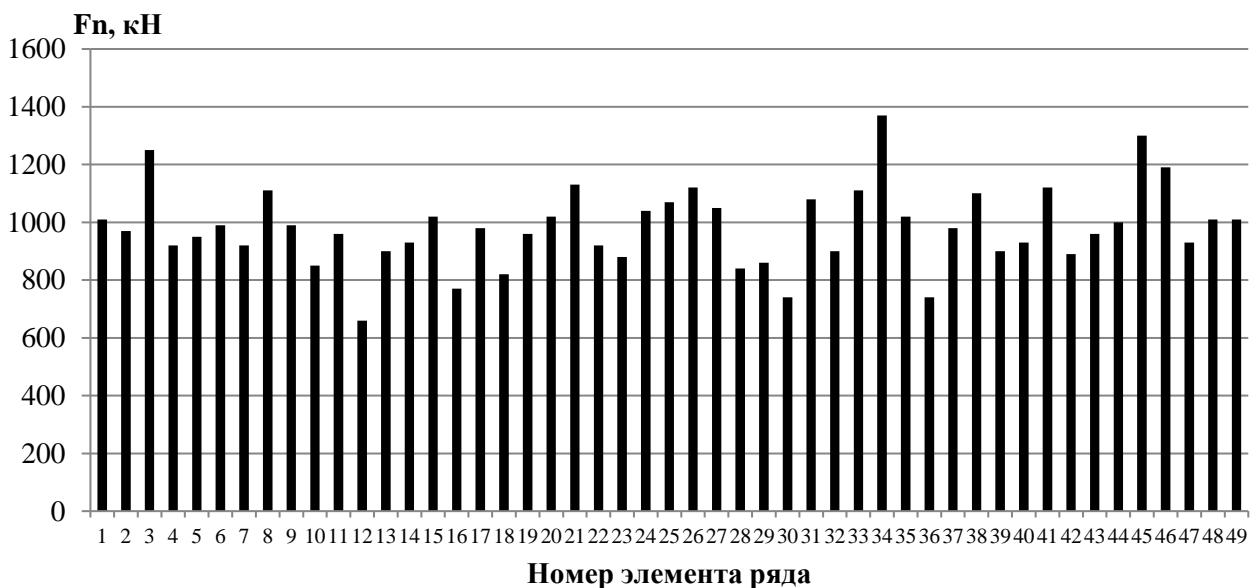


Рисунок 4.12 – Ряд допустимых нагрузок на покрытие от ВС ТУ-154

Полученный ряд был исследован с помощью программы Statis.

Среднее значение допустимой нагрузки от опоры ВС ТУ-154

$$\bar{F}_n = 982,4 \text{ кН.}$$

Среднеквадратическое отклонение допустимой нагрузки

$$S_{F_n} = 135,108 \text{ кН.}$$

Смещенные центральные моменты равны:

– второго порядка

$$m_2 = 18254,240 \text{ кН}^2;$$

– третьего порядка (оценка асимметрии)

$$m_3 = 944115,648.$$

– четвертого порядка (оценка эксцесса)

$$m_4 = 1272149990,067.$$

Соответствующие несмещенные моменты равны:

– второго порядка

$$\mu_2 = 18626,776;$$

– третьего порядка

$$\mu_3 = 1003524,286;$$

– четвертого порядка

$$\mu_4 = 1338838018,454.$$

Асимметрия совокупности

$$\sqrt{\beta_1} = 0,395.$$

Проверка условия (4.4) при $n = 50, \alpha = 0,05$

$$|0,395| \leq 0,53$$

показала, что при анализе ряда направленным критерием $\sqrt{\beta_1}$ нулевая гипотеза о нормальном распределении не отклоняется.

Эмпирическая кривизна совокупности

$$\beta_2 = 3,859.$$

Проверка условия (4.5) при $n = 50, \alpha = 0,05, \beta_2 = 3,859 > 3$

$$3,859 > 3 \wedge 3,859 \leq 3,99.$$

Условие выполняется, нулевая гипотеза о нормальном распределении не отклоняется.

Для выбора многостороннего критерия проверяется условие (4.6)

$$0,395 < 0,5 \wedge 3,859 < 3 \vee 0,395 > 0,5.$$

Условие не выполняется, поэтому производится проверка многосторонним критерием Эппса – Палли.

Статистика критерия Эппса – Палли

$$T_{EP} = 0,240.$$

Проверка условия (4.9) при $n = 50, \alpha = 0,05$

$$0,240 \leq 0,374.$$

Условие выполняется, нулевая гипотеза о нормальном распределении ряда не отклоняется.

Дальнейший анализ был выполнен критерием Пирсона, расчет которого приведен в табл. 4.12. На рис. 4.13 показана гистограмма распределения допустимой нагрузки. Характер распределения эмпирических и теоретических частот свидетельствует в пользу гипотезы о нормальном распределении статистического ряда смоделированных нагрузок. Проверка критерия Пирсона была выполнена при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $f = 7 - 3 = 4$:

$$\chi^2 = 3,944 < \chi_{кр}^2(0,05; 4) = 9,49.$$

По результатам этой проверки принята гипотеза о нормальном распределении смоделированного по результатам испытаний ряда допустимых для конструкции покрытия нагрузок.

По результатам статистического моделирования и анализа полученного ряда приняты оценки допустимой нагрузки на аэродромное покрытие от ТУ-154:

- среднее значение $\bar{F} = 982,4$ кН;
- среднеквадратическое отклонение $S_F = 135,108$ кН.

Соответствующий среднему значению код PCN 32/R/C/X/T. Сравнивая этот код с кодами PCN, полученными вышеперечисленными организациями, можно сделать вывод, что значения классификационных чисел близки.

Таблица 4.12

Интервал		Эмпирическая частота n_i	Нормированные случайные величины		Интегралы вероятностей		Вероятность попадания в интервал $P_i = \Phi(z_{i+1}) - \Phi(z_i)$	Теоретическая частота $n'_i = NP_i$	$\frac{(n_i - n'_i)^2}{n'_i}$
№	середина		$z_i = \frac{x_{iH} - \bar{F}}{S_F}$	$z_{i+1} = \frac{x_{iB} - \bar{F}}{S_F}$	$\Phi(z_i)$	$\Phi(z_{i+1})$			
1	713,432	3	-2,386	-1,595	0,009	0,055	0,047	2,341	0,186
2	820,296	5	-1,595	-0,804	0,055	0,211	0,155	7,764	0,984
3	927,159	19	-0,804	-0,013	0,211	0,495	0,284	14,203	1,620
4	1034,023	13	-0,013	0,778	0,495	0,782	0,287	14,346	0,126
5	1140,887	7	0,778	1,569	0,782	0,942	0,160	8,002	0,125
6	1247,750	2	1,569	2,359	0,942	0,991	0,049	2,462	0,087
7	1354,614	1	2,359	3,150	0,991	0,999	0,008	0,417	0,816
	$N = \sum n_i$	50					$\chi^2 = \sum \frac{(n_i - n'_i)^2}{n'_i}$		3,944

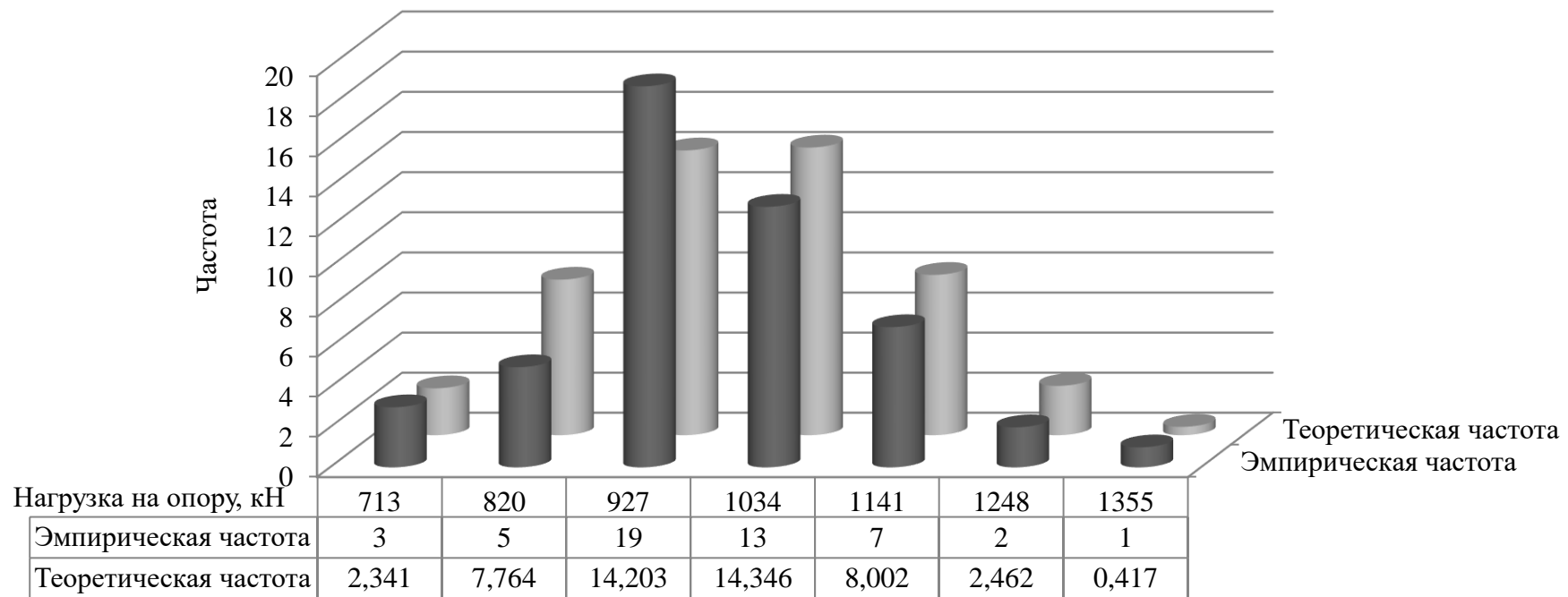


Рисунок 4.13 – Гистограмма распределения допустимой нагрузки

Но все четыре значения не учитывают того, что согласно [37] при оценке несущей способности аэродромных покрытий по данным испытаний расчетное значение PCN нужно определять с учетом статистических оценок по формуле (3.66). Так как при испытаниях определяются статистические оценки нескольких параметров (толщины слоев, упругая характеристика и жесткость конструкции, сопротивления растяжению при изгибе кернов, коэффициент постели), необходимо при определении несущей способности учитывать случайное сочетание значений каждого фактора. Это возможно при статистическом моделировании Монте-Карло путем разыгрывания вариантов сочетаний случайных факторов по нормальному закону распределения и определению допустимой нагрузки для каждого варианта, как это было выполнено в данном параграфе.

Действительное значение допустимой нагрузки согласно [37] определяется в зависимости от надежности, принимаемой по табл. 3.3 при заданном остаточном сроке службы. Принимая остаточный срок службы равным 3 годам, получим надежность $P = 0,75$ и соответствующее значение параметра $z_{1-\alpha} = 0,67$.

Учитывая полученные статистические оценки, определим по формуле (3.66) действительное значение допустимой нагрузки на покрытие от ВС ТУ-154.

$$F_n = \bar{F}_n - z_{1-\alpha} \cdot S_{F_n} = 982,4 - 0,67 \cdot 135,108 = 891,878 \text{ кН.}$$

Этому значению нагрузки соответствует PCN 28/R/C/X/T, на одну единицу меньше оценки ФГУП ГПИ и НИИ ГА «Аэропроект». Как свидетельствует обследование аэродромных покрытий и определение фактических нагрузок от эксплуатируемых ВС, последняя оценка является наиболее адекватной, т.к. при режимах эксплуатации, основанных на приведенных выше оценках, в аэродромном покрытии возникали дефекты, связанные с перегрузками.

Рассмотрим, как влияют сравниваемые классификационные числа на интенсивность выполнения взлетов ВС, эксплуатируемых в аэропорту Ростов-на-Дону в то время, когда проводились испытания. Допустимое количество самолетовывлетов в зависимости от классификационных чисел приведено в табл. 4.13.

Таблица 4.13

Тип ВС	ACN на коде основания «С»	PCN=30		PCN=29		PCN=28	
		PCN/ACN	Количество самолетовылетов (св)	PCN/ACN	Количество самолетовылетов	PCN/ACN	Количество самолетовылетов
В-737-500	40	0,75	1 св/сут	0,73	2 св/неделю	0,7	2 св/неделю
А-319-100	39	0,77	1 св/сут	0,74	2 св/неделю	0,72	2 св/неделю
В-757-200	38	0,79	1 св/сут	0,76	1 св/сут	0,74	2 св/неделю
Ту-204	38	0,79	1 св/сут	0,76	1 св/сут	0,74	2 св/неделю
А-318	36	0,83	10 св/сут	0,81	2 св/сут	0,78	1 св/сут
Ил-76	35	0,86	10 св/сут	0,83	2 св/сут	0,8	2 св/сут
GLF-5	32	0,94	10 св/сут	0,91	10 св/сут	0,88	10 св/сут
F-100	31	0,97	10 св/сут	0,94	10 св/сут	0,9	10 св/сут
Ту-154	30	1	без ограничений	0,97	10 св/сут	0,93	10 св/сут
Ту-154М	30	1	без ограничений	0,97	10 св/сут	0,93	10 св/сут

4.6 Выводы по главе 4

1. Для автоматизации расчета оценки несущей способности бетонных аэродромных покрытий по предлагаемым методикам разработаны алгоритмы и компьютерные программы Tesaf, Statis и ModFn.

2. Определение координат точек измерения прогибов и формирование статистических рядов упругих характеристик плиты, коэффициентов постели основания и жесткости конструкции выполняет программа Tesaf, алгоритм которой разработан на основании предлагаемых методик планирования испытаний и определения характеристик бетонного покрытия по результатам испытаний.

3. Статистическую обработку результатов полученных рядов выполняет программа Statis, разработанная по ГОСТ Р ИСО 54-2002 и дополненная критерием Пирсона. В результате статистической обработки программа Statis определяет оценки – средние значения и среднеквадратические отклонения характеристик конструктивных слоев покрытия и коэффициента постели основания.

4. Расчет допустимой нагрузки выполняется методом статистического моделирования Монте-Карло разыгрыванием аргументов расчетного и предельного изгибающих моментов по полученным программой Statis оценкам. Для формирования статистического ряда допустимых по изгибающим моментам нагрузок методом статистического моделирования Монте-Карло разработана программа ModFn.

5. Сравнение выполненной разработанным методом оценки несущей способности аэродромного покрытия ВПП аэропорта Ростов-на-Дону Центральным с оценками ФГУП ГПИ и НИИ ГА «Аэропроект», ОАО «ПИиНИИ ВТ «Ленаэропроект», ОАО «26 ЦНИИ» свидетельствуют о его достоверности. Разработанный вероятностный метод полнее учитывает стохастическую природу полученных в результате испытаний данных по сравнению с детерминированными оценками вышеуказанных институтов. По статистическим оценкам можно определить несущую способность аэродромного покрытия с учетом остаточного срока службы.

Заключение

Результаты выполненных исследований позволяют сформулировать следующие итоги, рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы:

1. Выявлено, что существующие методы оценки несущей способности аэродромных покрытий не учитывают характеристики современных ВС и стохастическую природу характеристик эксплуатируемых аэродромных покрытий.

2. Разработана методика классификации ВС по изгибающим моментам в покрытии, учитывающая характеристики ВС по силовому воздействию на покрытия и позволяющая сопоставлять нагрузки от ВС с категориями нормативной нагрузки.

3. Численный эксперимент по проверке прочности грунтового основания показал, что тяжелые типы ВС могут вызывать в грунтовом основании бетонного покрытия недопустимые напряжения. Рекомендуется для ВС 1-го класса дополнительно выполнять расчет прочности грунтового основания бетонных и армобетонных покрытий.

4. Разработаны методики планирования и обработки результатов испытаний бетонных и армобетонных покрытий для определения статистических характеристик: упругой характеристики плиты, коэффициента постели основания и жесткости сечения плиты.

5. Усовершенствована методика определения несущей способности бетонных и армобетонных покрытий по результатам натурных испытаний с учетом характеристик опор ВС.

6. Разработан пакет программ для оценки несущей способности бетонных и армобетонных покрытий с учетом вероятностно-статистической изменчивости базисных аргументов. Рекомендуется использовать программы в организациях, занимающихся испытаниями бетонных и армобетонных покрытий и оценкой их несущей способности.

7. Рекомендуется использовать предлагаемый метод при разработке новой редакции Единой методики оценки технического состояния искусственных по-

крытий гражданских аэродромов, находящихся в собственности Российской Федерации.

8. Перспективой дальнейшей разработки является совершенствование методов оценки несущей способности железобетонных монолитных и сборных аэродромных покрытий, а также асфальтобетонных покрытий.

Список литературы

1. Апестина, В. П. Диктует опыт / В. П. Апестина, В. А. Сабуренкова // Автомобильные дороги. – 2008. – №8. – С. 84–87.
2. Апестина, В. П. К вопросу о бесконечности плит жестких аэродромных покрытий / В. П. Апестина, В. А. Сабуренкова // Расчет и исследование несущей способности сооружений аэропортов: сб. науч. тр. – М.: ротاپринт МАДИ (ГТУ), 2000. – С. 99.
3. Апестина, В. П. Усовершенствованная методика испытаний аэродромных покрытий / В. П. Апестина, В. А. Сабуренкова // Проектирование, строительство и эксплуатация аэродромно–технических комплексов аэропортов: сб. науч. тр. – М.: ротاپринт МАДИ (ГТУ), 2003. – С. 99.
4. Ашфорд, Н. Проектирование аэропортов / Н. Ашфорд, П. Х. Райт ; пер. с англ. Степушин А. П. – М.: Транспорт, 1988. – 328 с.
5. Аэродромные покрытия. Современный взгляд / В. А. Кульчицкий, В. А. Макагонов, Н. Б. Васильев, А. Н. Чеков, Н. И. Романков. – М.: Физико-математическая литература, 2002. – 528 с.
6. Барит, Ю. С. Технический ресурс жестких покрытий аэродромов / Ю. С. Барит // Труды ГосНИИ ГА. – М.:ОНТИ ГосНИИ ГА. – 1986. – Вып. 252. – С. 31–38.
7. Бартошевич, Э. С. О расчете конструкций, лежащих на упругом основании / Э. С. Бартошевич, А. И. Цейтлин // Строительная механика и расчет сооружений. – 1965. – №4. – с. 44–46.
8. Безелянский, В. Б. Решение задачи определения напряжений и деформаций в жестких многослойных аэродромных покрытиях : дис. ... канд. техн. наук. : 05.23.11 / Владимир Борисович Безелянский. – М.: МАДИ. – 1984. – 168 с.
9. Болотин, В. В. Статистические методы в строительной механике / В. В. Болотин. – М.: Госстройиздат, 1961. – 202 с.
10. Большев, Л. Н. Таблицы математической статистики / Л. Н. Большев, Н. В. Смирнов. – М.: Наука, 1983. – 416 с.

11. Бочарова, А. Ю. Комплексные исследования искусственных покрытий аэродромов / А. Ю. Бочарова, В. А. Сабуренкова // Актуальные вопросы проектирования, строительства и эксплуатации зданий, сооружений аэропортов: сборник трудов участников научно–практической конференции, посвященной 80-летию ФГУП ГПИ и НИИ ГА «Аэропроект»; под общей редакцией д.т.н., проф. В. Н. Иванова. – М.: ЗАО «Светлица», 2014 – 172 с.

12. Виноградов, А. П. Надежность и сертификация прочности цементобетонных покрытий аэродромов / А. П. Виноградов. – Минск: изд-во ИПП Минэкономики РБ. – 1994. – 124 с.

13. Виноградов, А. П. Нормирование прочности бетона для аэродромных покрытий / А. П. Виноградов, В. П. Апестина // Автомобильные дороги. – 1988. – № 4. – С. 23.

14. Виноградов, А. П. Оценка прочности, эксплуатационной пригодности покрытий аэродромов в СССР / А. П. Виноградов // Труды Гос. НИИГА. Сооружения и оборудование аэропортов. – 1988. – Вып. 276. – С. 43 – 48.

15. Виноградов, А. П. Оценка эксплуатационно-технического состояния цементобетонных покрытий аэродромов / А. П. Виноградов // Труды ГосНИИ ГА. – М.: ОНТИ ГосНИИ ГА. – 1984. – Вып. 327. – С. 43–48.

16. Виноградов, А. П. Проблемы создания единой методики оценки возможности эксплуатации аэродромных покрытий / А. П. Виноградов // Аэропорты. Прогрессивные технологии. – 1998. – №1. – С. 12 – 13.

17. Виноградов, А. П. Прогнозирование силовой деструкции аэродромных покрытий / А. П. Виноградов // Труды ГПИ и НИИ Аэропроект ГА. – М.: ОНТИ Аэропроект. – 1973. – Вып. 12. – С. 71–81.

18. Виноградов, А. П. Расчет бетонных и армобетонных покрытий аэродромов / А. П. Виноградов // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2020. – № 2 (92). – С. 30–31.

19. Виноградов, А. П. Расчет, конструирование, оценка жестких покрытий аэродромов с учетом заданной долговечности / А. П. Виноградов. – Москва: ЗАО «Светлица», 2014. – 152 с.

20. Власов, В. З. Балки, плиты и оболочки на упругом основании / В. З. Власов, Н. Н. Леонтьев. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1960. – 491 с.
21. Глушков, Г. И. Жесткие покрытия аэродромов и автомобильных дорог / В. Ф. Бабков, И. А. Медников [и др.] : под ред. Глушкова Г. И. – М.: Транспорт, 1987. – 255 с.
22. Глушков, Г. И. Повышение долговечности цементобетонных покрытий / Г. И. Глушков // Автомобильные дороги. – 1981. – №9. – С. 23–27.
23. Глушков, Г. И. Расчет аэродромных покрытий с учетом остаточных деформаций основания / Г. И. Глушков // Тр. МАДИ. – М.: МАДИ. – 1974. – Вып. 57. – С. 25 – 33.
24. Глушков, Г. И. Расчет жестких аэродромных покрытий с учетом интенсивности движения самолетов / Г. И. Глушков, А. П. Степушин // Труды МАДИ. – М.: МАДИ. – 1976. – Вып. 117. – С. 18–30.
25. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман. – М.: Высшая школа, 2003. – 479 с.
26. Горбунов-Посадов, М. И. Балки и плиты на упругом основании / М. И. Горбунов-Посадов. – М.: Машстройиздат, 1949. – 239 с.
27. Горбунов-Посадов, М. И. Плиты на упругом основании / М. И. Горбунов-Посадов. – М.: Госстройиздат, 1941. – 76 с.
28. Горбунов-Посадов, М. И. Расчет конструкций на упругом основании / М. И. Горбунов-Посадов, Т. А. Маликова. – М.: Стройиздат, 1973. – 627 с.
29. Горбунов-Посадов, М. И. Таблица для расчета тонких плит на упругом основании / М. И. Горбунов-Посадов. – М.: Госстройиздат, 1959. – 99 с.
30. Горецкий, Л. И. Бетонные покрытия на аэродромах / Л. И. Горецкий. – М.: Военное издательство Военного Министерства Союза ССР, 1950. – 200 с.
31. Горецкий, Л. И. Оценка температурных воздействий при определении несущей способности цементобетонных покрытий с целью выявления резервов прочности / Л. И. Горецкий // Проектирование аэродромов и эксплуатационная оценка прочности сооружений. – М.: МАДИ, 1985. – С. 14–19.

32. Горецкий, Л. И. Теория и расчет цементобетонных покрытий на температурные воздействия / Л. И. Горецкий. – М.: Транспорт, 1965. – 284 с.
33. ГОСТ 10180–2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. – М.: Стандартинформ, 2013. – 31 с.
34. ГОСТ 25100–2011. Грунты. Классификация. – М.: Стандартинформ, 2013. – 49 с.
35. ГОСТ Р ИСО 5479–2002. Статистические методы. Проверка отклонения распределения вероятностей от нормального распределения. – М.: Госстандарт России, 2002. – 26 с.
36. Гражданские аэродромы / В. П. Апестина [и др.]; под общ. ред. В. Н. Иванова. – М.: Воздуш. трансп., 2005. – 280 с.
37. Единая методика оценки возможности эксплуатации аэродромных покрытий, разработанная институтами ГПИ и НИИ ГА «Аэропроект», 26 НИИ МО РФ, Ленаэропроект, ЗАО ГипроНИИАвиапром, ЗАО «Прогресс ЛТД. – М., 1999. – 66 с.
38. Единая методика оценки технического состояния искусственных аэродромных покрытий. – М.: Минтранс России, 2015. – 48 с.
39. Жемочкин, Б. Н. Расчет круглых плит на упругом основании на осесимметричную нагрузку / Б. Н. Жемочкин. – Изд. ВИА, 1938. – 136 с.
40. Жесткие покрытия аэродромов / Б. С. Раев-Богословский, Г. И. Глушков, А. С. Ткаченко [и др.]. – М.: НТИ министерства автомобильного транспорта и шоссейных дорог РСФСР, 1961. – 322 с.
41. Иванов, В. Н. Управление состоянием жестких покрытий аэродромов / В. И. Березин, А. П. Виноградов, В. Н. Иванов, Е. Н. Игнатенко, В. Л. Куликов, А. А. Курбанов, М. И. Пугачев ; под общей редакцией В. Н. Иванова. – М.: Воздушный транспорт, 2010. – 124 с.
42. Иванов, Н. Н. Надежность бетонных дорог и аэродромов в аспекте температурно-транспортного режима работы / Н. Н. Иванов, В. Е. Тригопи, В. Д. Садовой // Известия высших учебных заведений. – Строительство и архитектура. – 1969. – № 12. – С. 143–148.

43. Изыскания и проектирование аэродромов. / Д. А. Могилевский, В. Ф. Бабков, А. С. Смирнов, Л. Т. Абрамов, Ф. Я. Зайцев, М. С. Замахаяев, С. М. Никитин. – М.: Транспорт, 1963. – 704 с.
44. Изыскания и проектирование аэродромов: учеб. для вузов / Г. И. Глушков, В. Ф. Бабков, В. Е. Тригопи [и др.] : под ред. Г. И. Глушкова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1992. – 463 с.
45. Козбарь, А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / А. И. Козбарь. – М.: Физматлит, 2006. – 816 с.
46. Коренев, Б. Г. Введение в теорию бесселевых функций / Б. Г. Коренев. – М.: Наука, 1971. – 287 с.
47. Коренев, Б. Г. Вопросы расчета балок и плит на упругом основании / Б. Г. Коренев – М.: Госстройиздат, 1954. – 232 с.
48. Коренев, Б. Г. Расчет плит на упругом основании / Б. Г. Коренев, Е. И. Черниговская. – М.: Госстройиздат, 1962. – 355 с.
49. Коренев, Б. Г. Экспериментальные исследования моделей плит на упругом основании / Б. Г. Коренев, М. Н. Ручимский // Вопросы расчета балок и плит на упругом основании. – М.: Госстройиздат, 1958. – С. 5–40.
50. Кузнецов, Д. С. Специальные функции / Д. С. Кузнецов. – М.: Высшая школа, 1965. – 423 с.
51. Манвелов, Л. И. О выборе расчетной модели упругого основания / Л. И. Манвелов, Э. С. Бартошевич // Строительная механика и расчет сооружений. – 1961. – №4. – с. 14–18.
52. Матвеев, С. А. Расчет жестких аэродромных покрытий численным методом на действие самолетных нагрузок и температуры : автореферат дис. ... канд. техн. наук : 05.23.11 / МАДИ. – Москва, 1979. – 17 с.
53. Медников, И. А. Исследования по теории расчета бетонных покрытий автомобильных дорог : автореферат дис. ... доктора техн. наук / МАДИ. – М., 1965. – 65 с.

54. Медников, И. А. Расчет свободного угла плиты бетонных покрытий / И. А. Медников, В. Д. Садовой // Сб. научн. трудов ГПИ и НИИ ГА Аэропроект. – 1970. – Вып. 5. – С. 17–33.

55. Медников, И. А. Связь коэффициента сопротивления малым горизонтальным температурным смещениям плит по основанию с коэффициентом трения скольжения / И. А. Медников // Сб. научн. тр. МАДИ «Строительная механика дорожных одежд и сооружений на автомобильных дорогах». – М.: МАДИ, 1981. – С. 29–33.

56. Медников, И. А. Связь между коэффициентом постели и модулем деформации грунта основания в условиях работы плиты под нагрузкой / И. А. Медников // Труды МАДИ. – М.: Дориздат. – 1953. – Вып. 15. – С. 35–40.

57. Методика определения классификационных чисел воздушных судов и жестких покрытий аэродромов авиации Вооруженных сил / В. А. Кульчицкий, Н. Б. Васильев, И. А. Онопа, С. А. Буянов, Б. И. Демин, Г. Ю. Муранова. – Воениздат, 1992. – 29 с.

58. Методики оценки соответствия нормам годности к эксплуатации в СССР гражданских аэродромов (МОС НГЭА СССР). – М.: Воздушный транспорт, 1992. – 144 с.

59. Нормы годности к эксплуатации аэродромов НГЭА. – М.: Воздушный транспорт, 1992. – 136 с.

60. Носов, В. П. Прогнозирование повреждений жестких слоев дорожных одежд на основе математического моделирования : автореферат дис. ... доктора техн. наук : 05.23.11. – Москва, 1996. – 33 с.

61. Палатников, Е. А. Некоторые вопросы расчета плит на упругом основании : автореферат дис. ... доктора техн. наук / Моск. инж.-строит. ин-т им. В. В. Куйбышева. – Москва, 1973. – 37 с.

62. Палатников, Е. А. Прямоугольная плита на упругом основании / Е. А. Палатников. – М.: Стройиздат, 1964. – 236 с.

63. Палатников, Е. А. Расчет железобетонных плит покрытий аэропортов / Е. А. Палатников. – Оборонгиз, 1961. – 96 с.

64. Палатников, Е. А. Экспериментальные исследования обычно армированных железобетонных плит / Е. А. Палатников // Труды ГИПРОНИИАВИАПРОМ. – 1968. – Вып. 3. – С. 7–54.

65. Палатников, Е. А. Экспериментальные исследования плит на грунтовом основании / Е. А. Палатников, А. А. Тепляков // Труды ГИПРОНИИАВИАПРОМ. – 1971. – Вып. 8. – С. 42–44.

66. Пастернак, П. Л. Основы нового метода расчета фундаментов на упругом основании при помощи двух коэффициентов постели / П. Л. Пастернак. – М.: Госстройиздат, 1954. – 56 с.

67. Предварительно напряженные покрытия аэродромов и дорог / Б. С. Раев-Богословский, А. Н. Защепин, Б. И. Демин [и др.]. – М.: Транспорт, 1972. – 200 с.

68. Проблема надежности и долговечности жестких аэродромных покрытий / В. Е. Тригоны, В. П. Апестина, А. А. Морозов, В. Д. Садовой // Труды ГПИ и НИИ Аэропроект. – М.: ОНТИ Аэропроект. – 1968. – Вып. 2. – С. 5–18.

69. Рекомендации по методике оценки прочностных свойств покрытий на основе данных испытаний / ГПИ и НИИ ГА Аэропроект. – Арх. № 5453. – Москва, 1989. – 83 с.

70. Рекомендации по расчету многослойных покрытий аэродромов / О. Н. Тоцкий, В. Б. Безелянский [и др.]. – ГПИ и НИИ ГА Аэропроект, 1982. – 56 с.

71. Рекомендации по эксплуатационной оценке и выявлению резервов прочности жестких аэродромных покрытий / Глушков Г. И., В. Е. Тригоны, А. П. Виноградов, Л. И. Горецкий [и др.]. – М.: Аэропроект, 1986. – 64 с.

72. Реконструкция бетонных покрытий аэропортов / Г. И. Глушков, Л. И. Манвелов, А. В. Михайлов, Б. С. Раев-Богословский. – М.: Транспорт, 1965. – 222 с.

73. Ржаницын, А. Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность / А. Р. Ржаницын. – М.: Стройиздат, 1978. – 239 с.

74. Руководство по проектированию аэродромов. Дос. 9157–АН/901. Часть 3. Покрытия. – 2-е изд. – Монреаль: ИКАО, 1983. – 349 с.

75. Руководство по эксплуатации гражданских аэродромов Российской Федерации (РЭГА РФ-94) : утв. Департаментом воздуш. трансп. 19.09.94. – М. : Воздушный транспорт, 1995. – 117 с.

76. Сабуренкова, В. А. Автоматизированный расчет характеристик несущей способности жестких аэродромных покрытий по данным испытаний / В. А. Сабуренкова // Транспортное строительство. – 2008. – №1. – С. 11–13.

77. Сабуренкова, В. А. Вероятностный метод оценки несущей способности бетонных аэродромных покрытий / В. А. Сабуренкова, Я. Н. Цаплин // Транспортное строительство. – 2021. – № 4. – С. 30–32.

78. Сабуренкова, В. А. Исследование расчетных нагрузок на аэродромные покрытия / В. А. Сабуренкова, Я. Н. Цаплин // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2021. – № 2. – С. 10–12.

79. Сабуренкова, В. А. Жесткие аэродромные покрытия в процессе эксплуатации / В. А. Сабуренкова, А. Ю. Бочарова // Автомобильные дороги. – 2014. – № 7. – С. 68-70.

80. Сабуренкова, В. А. Методические рекомендации по реконструкции аэродромов / В. А. Сабуренкова. – М.: МАДИ, 2003. – 35 с.

81. Сабуренкова, В. А. Методы расчета конструкций аэродромных покрытий : учеб. пособие / В. А. Сабуренкова, А. П. Степушин. – М: МАДИ, 2015. – 134 с.

82. Сабуренкова, В. А. Оценка несущей способности аэродромных покрытий / В. А. Сабуренкова, Я. Н. Цаплин // Автомобильные дороги. – 2019. – № 1. – С. 118–121.

83. Сабуренкова, В. А. Разработка метода оптимизации конструкций жестких аэродромных покрытий : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.11 / Сабуренкова Валентина Александровна. – Москва. – 1983. – 231 с.

84. Сабуренкова, В. А. Расчет прочности грунтовых оснований бетонных аэродромных покрытий / В. А. Сабуренкова, Я. Н. Цаплин // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2021. – №1. – С. 80–85.

85. Садовой, В. Д. Анализ причин возникновения дефектов жестких аэродромных покрытий. / В. Д. Садовой, А. И. Дон, В. Н. Авдеев // Труды Гос. НИИ ГА. – М.: ОНТИ Гос. НИИ ГА. – 1979. – Вып. 187. – С. 11–18.

86. Садовой, В. Д. Изгиб двухслойных балок с упругой прокладкой, лежащих на упругом основании под воздействием сосредоточенной силы / В. Д. Садовой, В. Б. Безелянский // Труды МАДИ. – 1978. – Вып. 153. – С. 93–101.

87. Садовой, В. Д. Исследование некоторых вопросов надежности работы и эксплуатационной оценки прочности жестких аэродромных покрытий : автореферат дис. ... канд. техн. наук / Садовой Владимир Дмитриевич. – М.: ГПИ и НИИ ГА Аэропроект. – 1975. – 27 с.

88. Садовой, В. Д. Метод оценки и выявление резервов прочности жестких покрытий по данным натурных испытаний / В. Д. Садовой // Труды Гос. НИИ ГА. Сооружения и оборудование аэропортов. – 1985. – Вып. 247. – С. 24–28.

89. Садовой, В. Д. Современные проблемы эксплуатационной оценки прочности жестких аэродромных покрытий / В. Д. Садовой // Сборник научных трудов МАДИ. – М.: МАДИ. – 1979. – Вып. 169. – С. 55–60.

90. Самарский, А. А. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры / А. А. Самарский, А. П. Михайлов – 2-е изд., испр. – М.: Физматлит, 2001. – 320 с.

91. СН 120–60. Технические условия проектирования аэродромных покрытий / Госстрой СССР. – М.: Госстройиздат, 1961. – 79 с.

92. СН 120–70. Указания по проектированию аэродромных покрытий / Госстрой СССР. – М.: Стройиздат, 1970. – 111 с.

93. СНиП 2.05.08-85. Аэродромы / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985. – 59 с.

94. СНиП 32-03-96 Аэродромы / Министерство строительства РФ. – М., 1996. – 22 с.

95. СНиП II–47–80. Аэродромы. – М.: Стройиздат, 1981. – 57 с.

96. СП 121.13330.2012. Аэродромы. Актуализированная редакция СНиП 32-03-96. – М.: ФАУ ФЦС, 2012. – 96 с.

97. СП 121.13330.2019. Аэродромы. СНиП 32-03-96. – М.: ФАУ ФСЦ, 2019. – 170 с.

98. Степушин, А. П. Вероятностный метод расчета и оценки несущей способности жесткого аэродромного покрытия / А. П. Степушин // Проектирование и эксплуатационная оценка прочности сооружений. – Деп. ВИНТИ. – 22.07.93. – № 2080–В93. – С. 21–23.

99. Степушин, А. П. Изменчивость коэффициента постели оснований жестких аэродромных покрытий / А. П. Степушин // Сборник научных трудов МАДИ. Надежность, работоспособность и пропускная способность сооружений аэропортов. – М.: МАДИ, 1981. – С. 76–80.

100. Степушин, А. П. Исследование несущей способности жестких аэродромных покрытий на двухслойных основаниях при многократном воздействии самолетных нагрузок : дис. ... канд. техн. наук / Степушин Александр Петрович. – М.: МАДИ, 1973. – 288 с.

101. Степушин, А. П. К обоснованию сроков службы жестких аэродромных покрытий из цементобетона / А. П. Степушин // Сборник научных трудов МАДИ. – М.: МАДИ, 2001. – С. 12–28.

102. Степушин, А. П. К определению толщины искусственных оснований под жесткие аэродромные покрытия / А. П. Степушин // Сборник научных трудов МАДИ. – М.: МАДИ, 1979. – Вып. 169. – С. 49–54.

103. Степушин, А. П. О коэффициенте условий работы аэродромных покрытий из цементобетона / А. П. Степушин // Сборник научных трудов МАДИ. – М.: МАДИ, 1977. – Вып. 136. – С. 76–80.

104. Степушин, А. П. Обеспечение надежности жесткого аэродромного покрытия методом Монте–Карло / А. П. Степушин // Автомобильные дороги. – 1993. – № 10 – С. 10–12.

105. Степушин, А. П. Обоснование параметров модели аэродромного покрытия из цементобетона / А. П. Степушин // Сборник научных трудов МАДИ. – М.: МАДИ. – 1978. – Вып. 153 – С. 118–223.

106. Степушин, А. П. Определение количества воздействий нагрузок от колес самолетов на плиту жесткого аэродромного покрытия / А. П. Степушин // Труды ГПИ и НИИ Аэропроект ГА. – М.: ОНТИ Аэропроект. – 1973. – Вып. 11. – С. 37–51.

107. Степушин, А. П. Определение модуля упругости бетона в конструкциях жестких покрытий / А. П. Степушин // Автомобильные дороги. – 1980. – №2. – С. 25–26.

108. Степушин, А. П. Определение модуля упругости бетона по величине прогиба жесткого аэродромного покрытия от воздействия вертикальной нагрузки в центре плиты / А. П. Степушин // Сборник научных трудов МАДИ. – М.: МАДИ. – 1979. – Вып. 169. – С. 61–66.

109. Степушин, А. П. Определение числовых характеристик функции распределения предельного изгибающего момента плиты монолитного железобетонного покрытия / А. П. Степушин // В кн. Конструктивные и планировочные решения аэродромов. – М.: МАДИ, 1989. – С. 42–46.

110. Степушин, А. П. Повторность воздействия самолетных нагрузок на отдельных участках аэродромных покрытий / А. П. Степушин // Сборник научных трудов МАДИ. – М.: МАДИ. – 1977. – Вып. 136. – С. 81–90.

111. Степушин, А. П. Применение методов теории случайных функций к определению несущей способности плиты армобетонного покрытия / А. П. Степушин // Проектирование аэродромов и эксплуатационная оценка прочности сооружений. – М.: МАДИ, 1985. – С. 20–33.

112. Степушин, А. П. Разработка вероятностно-статистического метода расчета прочности жестких покрытий аэродромов и автомобильных дорог : дис. ... доктора техн. наук : 05.23.11 / Степушин Александр Петрович. – М., 1996. – 408 с.

113. Степушин, А. П. Расчет жестких аэродромных покрытий с учетом изменчивости коэффициента постели грунтового основания по сезонам года. / А. П. Степушин // Сборник научных трудов МАДИ. Проектирование и эксплуатационная оценка прочности сооружений. – М.: МАДИ, 1983. – С. 15–27.

114. Степушин, А. П. Статистическая оценка прочности цементобетона / А. П. Степушин, Т. В. Жидкова // Автомобильные дороги. – 1989. – № 5. – С. 4–5.
115. Татаринов, В. В. Метод динамического расчета жестких аэродромных покрытий : дис. ... канд. техн. наук / Татаринов Владимир Владимирович. – М., 1986. – 174 с.
116. Татаринов, В. В. О количестве решений задачи прочностного расчета жестких аэродромных покрытий / В. В. Татаринов, Е. А. Макарова // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2018. – № 3. – С. 31–33.
117. Татаринов, В. В. Расчет прогибов плиты аэродромного покрытия с учетом размера отпечатка авиационной шины / В. В. Татаринов, А. В. Фомин // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2017. – № 4 (14). – С. 4.
118. Тригоны, В. Е. Струйная эрозия аэродромов / В. Е. Тригоны. – М.: Транспорт, 1981. – 248 с.
119. Тригоны, В. Е. Структурная схема для анализа надежности капитальных аэродромных покрытий / В. Е. Тригоны, В. П. Апестина // Труды ГПИ и НИИ ГА Аэропроект. – М.: ОНТИ Аэропроект, 1970. – Вып. 5. – С. 51–61.
120. Учет вязкопластических свойств оснований при расчете жестких аэродромных покрытий / Г. И. Глушков, А. В. Кульчицкий, В. И. Смолка, А. П. Степушин // Тр. МАДИ. – М.: МАДИ. – 1976. – Вып. 117. – С. 7 – 17.
121. Ушаков, В. В. Физико-технические основы повышения эффективности проектирования и устройства автомобильных дорог горнопромышленных предприятий Забайкалья : автореферат дис. ... доктора техн. наук : 05.15.11 / Ин-т горного дела. – Хабаровск, 1995. – 36 с.
122. ФАП 262. Федеральные авиационные правила «Требования, предъявляемые к аэродромам, предназначенным для взлета, посадки, руления и стоянки гражданских воздушных судов». : Утверждены приказом Минтранса России 25.08.2015. – 147 с.
123. Фомин, А. В. Оценка и прогнозирование эксплуатационно-технического состояния жестких аэродромных покрытий : дис. ... канд. техн. наук / Фомин Андрей Викторович. – М., 2007 – 186 с.

124. Фомин, А. В. Оценка несущей способности жестких аэродромных покрытий аэропортов / А. В. Фомин // Актуальные вопросы проектирования, строительства и эксплуатации зданий, сооружений аэропортов: сборник трудов участников научно-практической конференции, посвященной 80-летию ФГУП ГПИ и НИИ ГА «Аэропроект»; под общей редакцией д.т.н., проф. В. Н. Иванова. – М.: ЗАО «Светлица», 2014. – 172 с.

125. Цементобетонные покрытия под многократным воздействием подвижных нагрузок / Г. И. Глушков, А. П. Степушин, В. А. Чернышов, В. В. Сосновский // Автомобильные дороги. – 1976. – № 11. – С. 23–25.

126. Цытович, Н. А. Механика грунтов / Н. А. Цытович. – М.: Высшая школа, 1983. – 288 с.

127. Черкасов, И. И. Механические свойства грунтов в дорожном строительстве / И. И. Черкасов. – М.: Транспорт, 1976. – 247 с.

128. Черкасов, И. И. Механические свойства грунтовых оснований / И. И. Черкасов. – М.: Автотрансиздат, 1958. – 156 с.

129. Шехтер, О. Я. К расчету фундаментных плит на упругом слое грунта конечной мощности. / О. Я. Шехтер // Сб. трудов НИИ Министерства строительства военных и военно-морских предприятий. – № 11. – Стройвоенмориздат, 1948. – С. 139–151.

130. Шехтер, О. Я. Расчет бесконечной плиты, лежащей на упругом основании конечной и бесконечной мощности и нагруженной сосредоточенной силой / О. Я. Шехтер // Сб. трудов НИИ Фундаментстроя. – № 10. – Госстройиздат, 1939. – С. 133–139.

131. Экспериментальное исследование гибких железобетонных плит на песчаном основании / Е. А. Палатников, А. А. Тепляков, Д. С. Баранов, С. В. Довнарчук, Д. Е. Польшин, В. Ф. Сидорчук // Труды ГИПРОНИИАВИАПРОМ. – 1978. – Вып. 17. – С. 7–21.

132. Экспериментальное исследование несущей способности аэродромного покрытия из цементобетона, уложенного на искусственные основания различной

жесткости / А. П. Степушин, Б. И. Смолка, Н. П. Соколов, А. П. Соловьев // Сборник научных трудов МАДИ. – М.: МАДИ. – 1976. – Вып. 117. – С. 105–119.

133. Экспериментальное исследование несущей способности моделей плит цементобетонного покрытия / Г. И. Глушков, А. П. Степушин, В. А. Чернышов, В. В. Сосновский // Труды МАДИ. Проектирование и строительство аэродромов. – М.: МАДИ. – 1976. – Вып. 117. – С. 31–44.

134. AC 150/5320–6D, Airport Pavement Design and Evaluation. – 1995. – 165 p.

135. AC 150/5320–6F, Airport Pavement Design and Evaluation. – 2016. – 173 p.

136. AC 150/5335–5C, Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength – PCN. – 2014. – 113 p.

137. ASTM D 2487–2000. Standard Test Method for Classification of Soils for Engineering Purposes. – 2000. – 12 p.

138. CROW-report D13–02. Guideline on PCN Assignment in the Netherlands. – 2nd Edition of the Guideline on Airport Pavement Strength Rating and Directive for Reporting. – 2013. – 60 p.

139. Hetényi, M. Beams and plates on elastic foundations and related problems / M. Hetényi // Appl Mech Rev. – 1966. – 19. – pp. 95–102.

140. Hetényi, M. Beams on elastic foundation: Theory With Applications in the Fields of Civil and Mechanical Engineering / M. Hetényi. – University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan, 1946. – 255 p.

141. ISO 14688–2:2004. Geotechnical investigation and testing – Identification and classification of soil – Part 2: Classification principles and quantification of descriptive characteristics. – 2004. – 13 p.

142. Kawa, I. Pass-to-Coverage Computation for Arbitrary Gear Configuration in the FAARFIELD Program / I. Kawa. – SRA, International. – Federal Aviation Administration. – Report No. DOT/FAA/TC–TN12/47. – 2012. – 31 p.

143. Kerr, A. D. Elastic and visco-elastic foundation models / A. D. Kerr // Journal of Applied Mechanics. – ASME, 1964. – 25(80). – pp. 491–498.

144. Multiple Wheel Heavy Gear Load Pavement Tests, Vol. 1 – Basic Report, Technical Report S-71-17 / R.G. Ahlvin, H. H. Ulery, R. L. Hutchinson, J. L. Rice. – U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, USA. – 1971. – 219 p.

145. Pereira, T. B. On the Pass-to-Coverage Ratio. Technical Report number: 5512 / T. B. Pereira. – Civil Engineering Laboratory of Macau, 2013. – 27 p.

146. Stet, M. EVALUATION OF BEARING STRENGTH OF RUNWAY PAVEMENT AT AMSTERDAM AIRPORT SCHIPHOL USING CROW'S GUIDELINE ON PCN ASSIGNMENT / M. Stet, M. Voorwinde, M. Bakker // VIA Aperta Pavement Consultants, Deventer, The Netherlands, 2009. – 13 p.

147. Timoshenko, S. Theory of plates and shells / S. Timoshenko, S. Woinowsky-Krieger. – New York, Toronto, London, 1959. – 591 p.

148. Tipnis, M. DESIGN PROGRAM BASED PCN EVALUATION OF AIRCRAFT PAVEMENTS / M. Tipnis, M. Patil // THE 2014 FAA WORLDWIDE AIRPORT TECHNOLOGY TRANSFER CONFERENCE. – Galloway, New Jersey, USA, 2014. – 18 p.

149. Wesołowski, M. Assessment of Load Capacity of the Airport Pavement Structure With the Use of the ACN-PCN Method / M. Wesołowski, K. Blacha // RESEARCH WORKS OF AFIT. – Issue 35. – 2014. – pp. 23–38.

150. Winkler, E. Die Lehre von der Elastizität und Festigkeit mit besondere Ruecksicht auf ihre Anwendung in der Technik, fuer polytechnische Schuhen, Bauakademien, Ingenieure, Maschienenbauer, Architecten, etc. Vortraege ueber Eisenbahnbau / E. Winkler. – Prague, 1867. – 428 p.

151. Westergaard, H. M. New Formulas for Stresses in Concrete Pavements of Airfields / H. M. Westergaard // Transactions, American Society of Civil Engineers. – 1948. – vol. 113. – pp. 425-439.

Приложение А

СПРАВКА

о возможности использования результатов диссертационной работы
Цаплина Якова Николаевича «Совершенствование метода оценки несущей
способности жестких аэродромных покрытий», представленной к защите на
соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности
2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов,
мостов и транспортных тоннелей

Результаты научных исследований, представленные в диссертации Цаплина Якова Николаевича на соискание ученой степени кандидата технических наук по теме «Совершенствование метода оценки несущей способности жестких аэродромных покрытий» (далее – диссертация), развивают положения действующих нормативных документов в области расчета жестких аэродромных покрытий, направлены на решение актуальной задачи в области гражданской авиации – определение допустимых нагрузок на аэродромные покрытия от воздушных судов.

Материалы диссертации будут использованы ФГУП ГПИ и НИИ ГА «Аэропроект» при обследовании и испытаниях аэродромных покрытий, оценке их несущей способности, определении классификационных чисел покрытия (PCN) и режимов эксплуатации бетонных аэродромных покрытий воздушными судами. Разработанные компьютерные программы дополняют функции программы расчета аэродромных покрытий Агар вероятностным расчетом бетонных аэродромных покрытий по результатам испытаний.

**Начальник управления по научной
работе и сертификации ФГУП ГПИ
и НИИ ГА «Аэропроект», к.т.н., доцент**



Суладзе М.Д.

**Заместитель генерального директора
по производству
ФГУП ГПИ и НИИ ГА «Аэропроект»**




Куликов М.Ю.

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебной работе МАДИ



В.В. Татаринов

16 марта 2022 г.

АКТ

внедрения научных положений и результатов диссертационной работы
Цаплина Якова Николаевича «Совершенствование метода оценки несущей способности жестких аэродромных покрытий»

Основные положения и результаты диссертационной работы Цаплина Якова Николаевича на соискание ученой степени кандидата технических наук используются на кафедре «Аэропорты, инженерная геология и геотехника» в учебном процессе при изучении дисциплины «Обследование и испытание сооружений» и при выполнении выпускных квалификационных работ.

Врио зав. кафедрой

«Аэропорты, инженерная геология и геотехника»,

к.т.н.

А.В. Фомин

Приложение Б

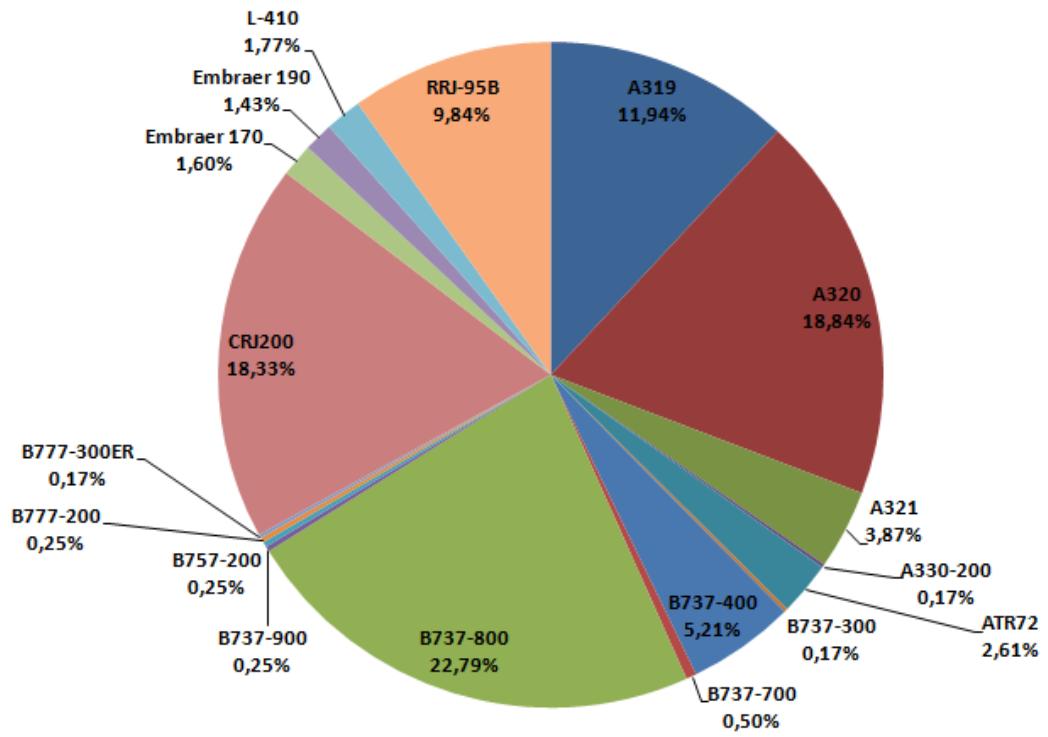


Рисунок Б.1 – Интенсивности ВПО в аэропорту Казань

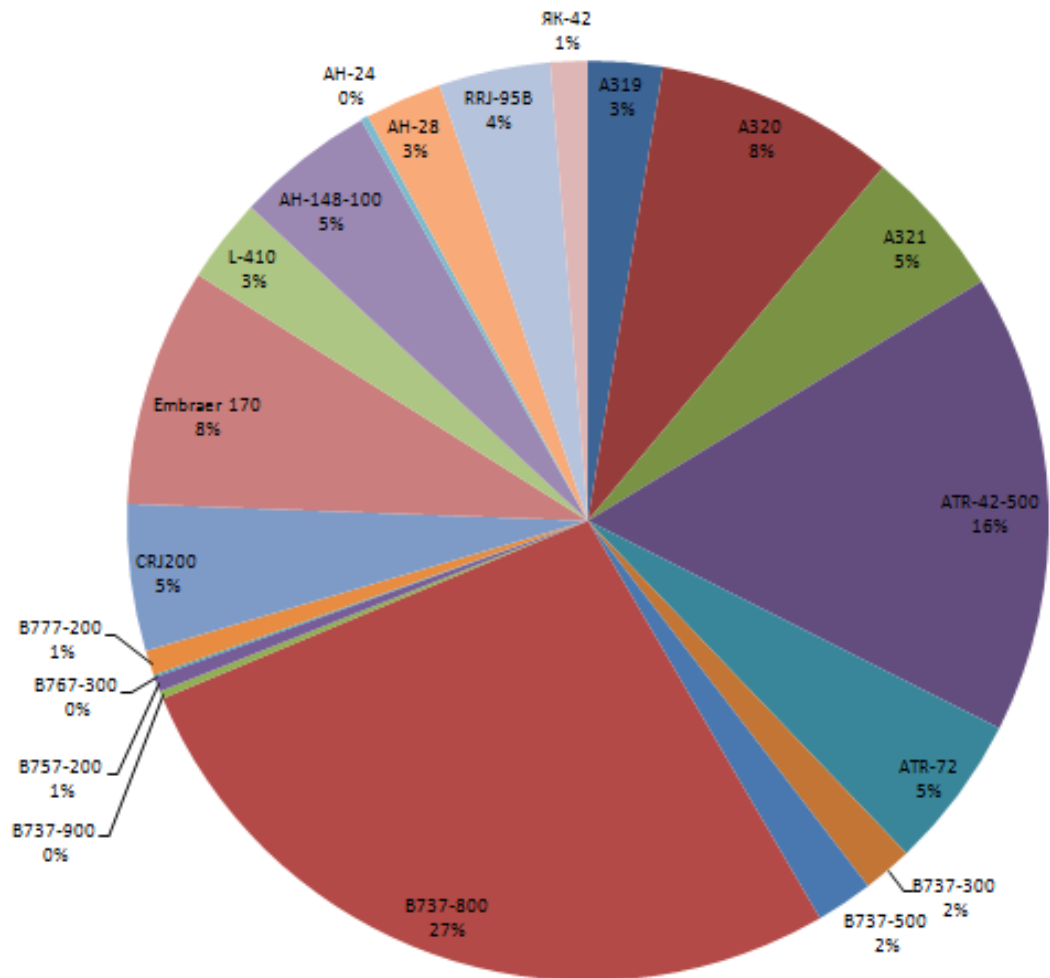


Рисунок Б.2 – Интенсивности ВПО в аэропорту Красноярск (Емельяново)

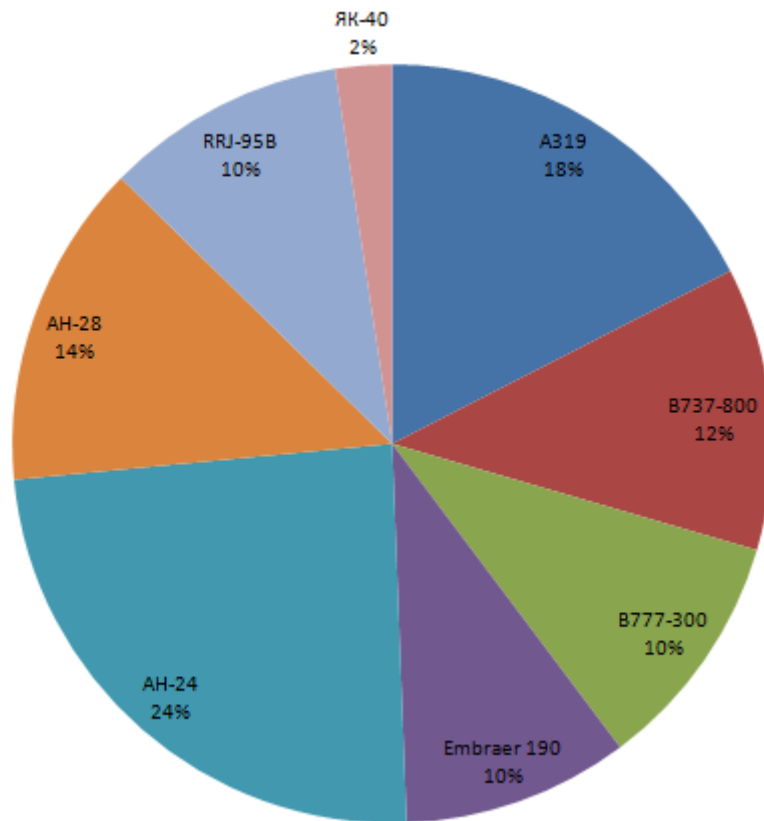


Рисунок Б.3 – Интенсивности ВПО в аэропорту Магадан (Сокол)

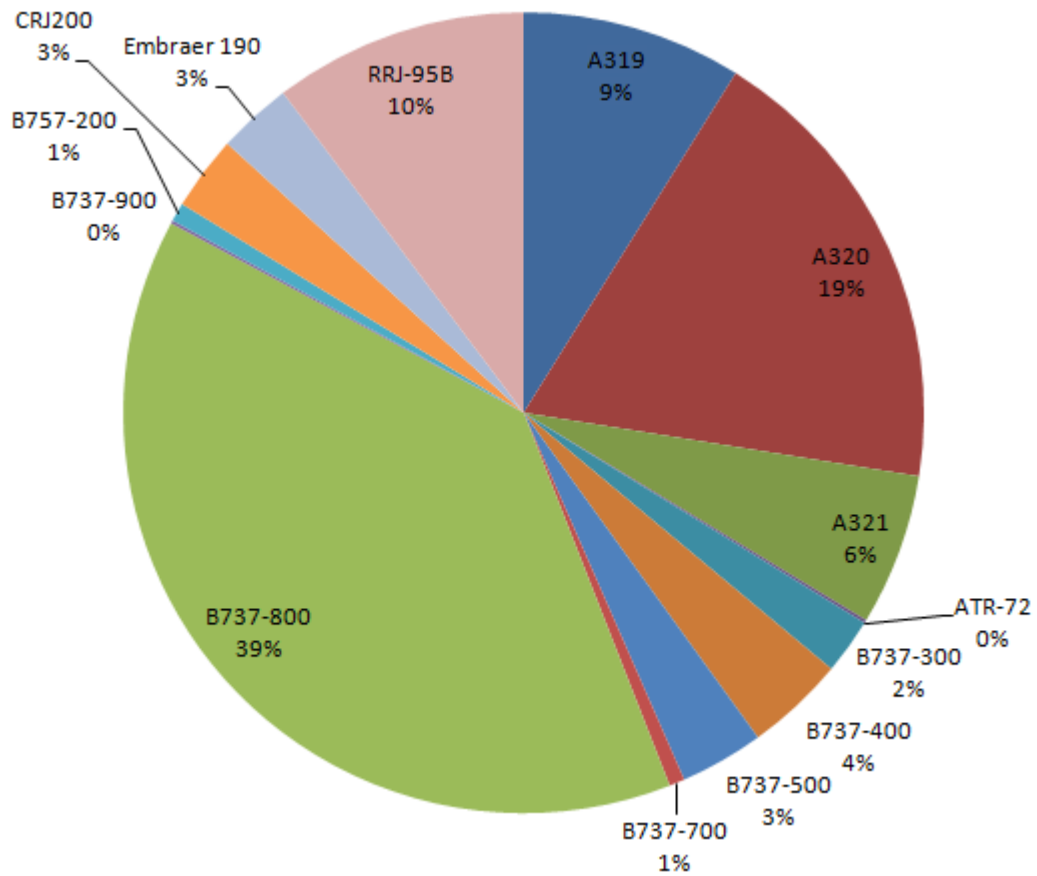


Рисунок Б.4 – Интенсивности ВПО в аэропорту Минеральные Воды

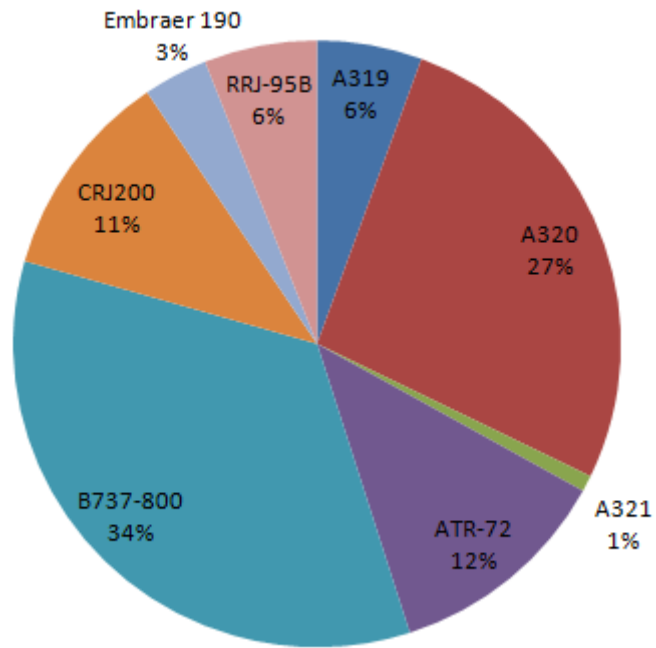


Рисунок Б.5 – Интенсивности ВПО в аэропорту Астрахань

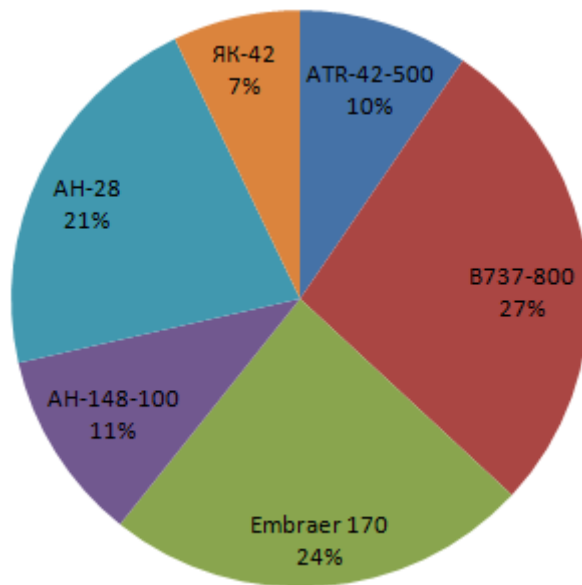


Рисунок Б.6 – Интенсивности ВПО в аэропорту Братск

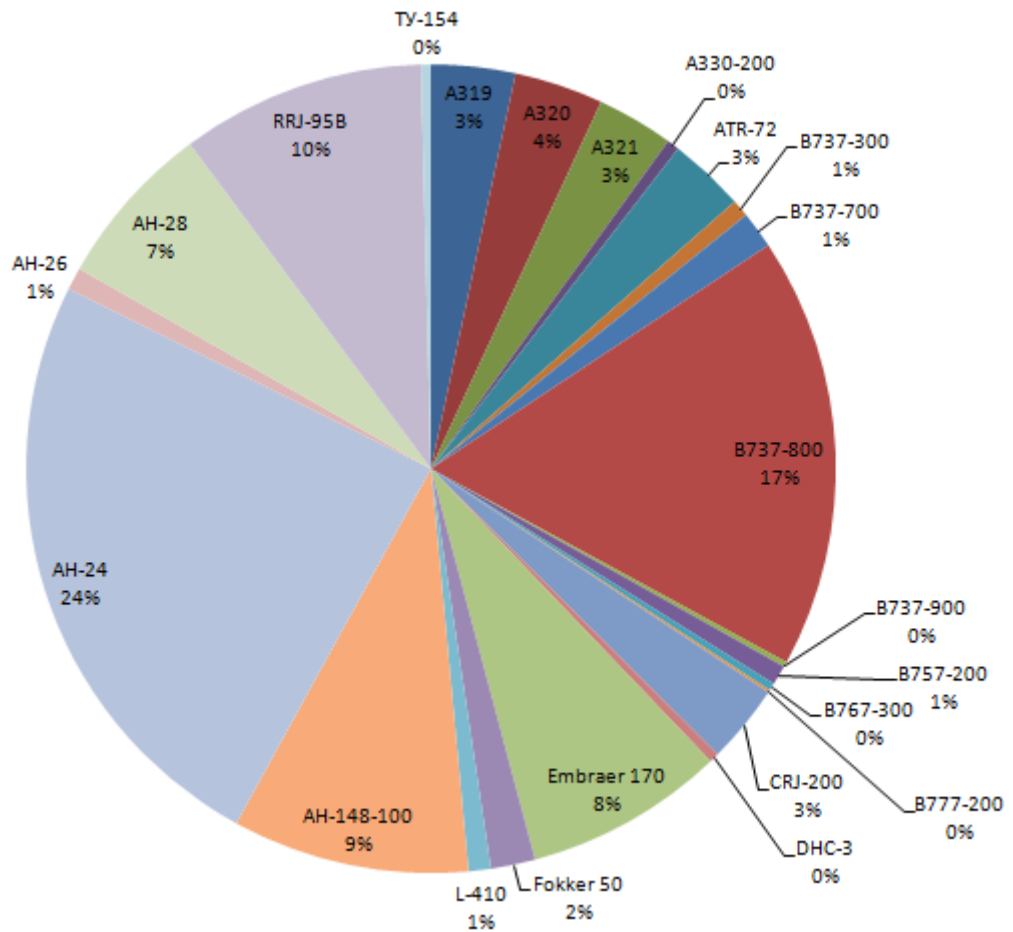


Рисунок Б.7 – Интенсивности ВПО в аэропорту Иркутск

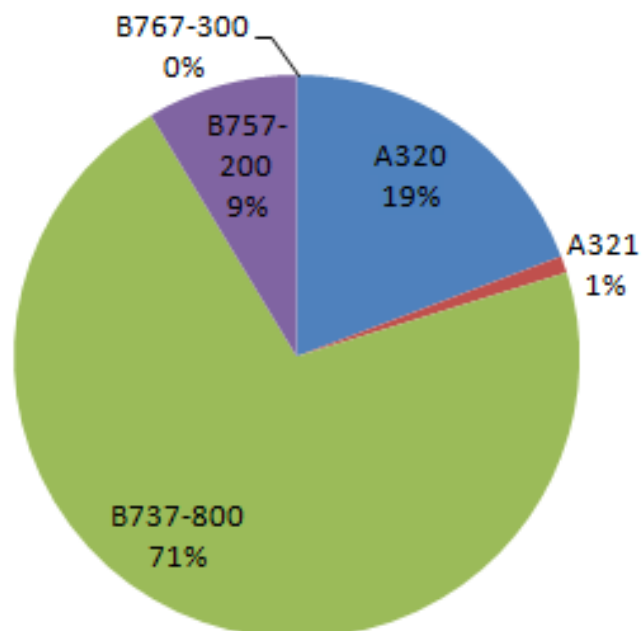


Рисунок Б.8 – Интенсивности ВПО в аэропорту Кемерово

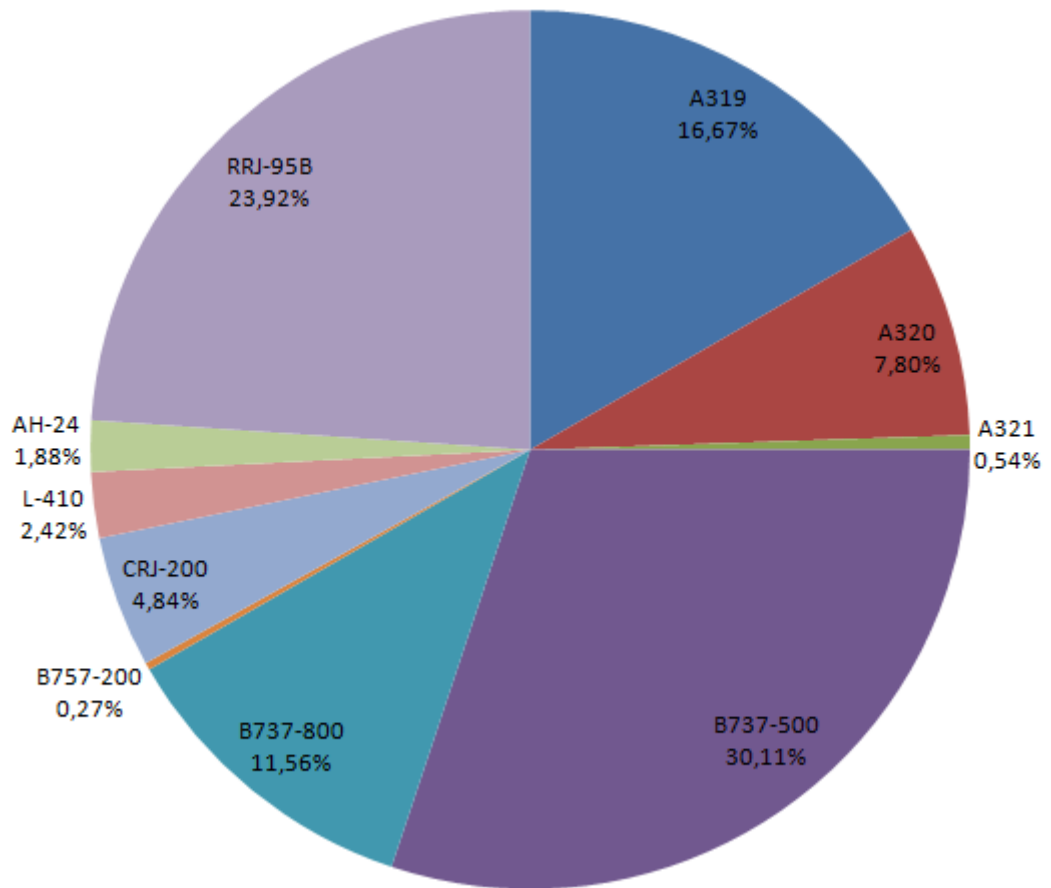


Рисунок Б.9 – Интенсивности ВПО в аэропорту Архангельск (Талаги)

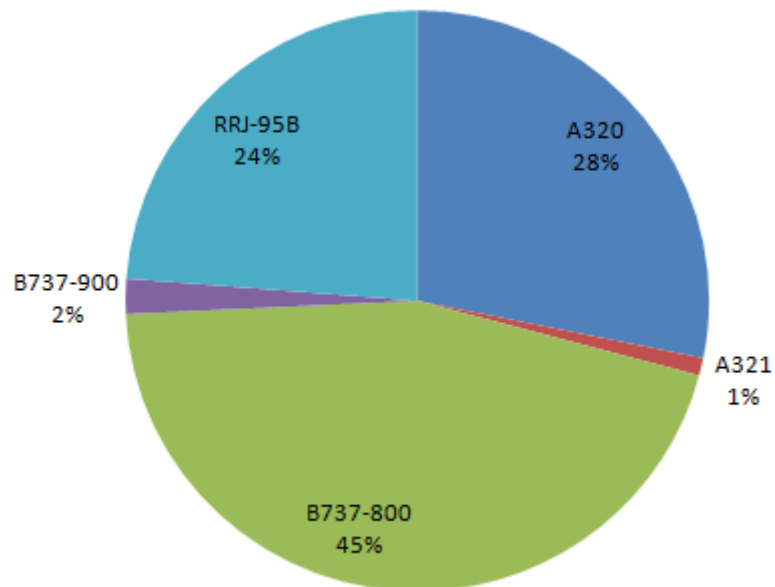


Рисунок Б.10 – Интенсивности ВПО в аэропорту Бегишево

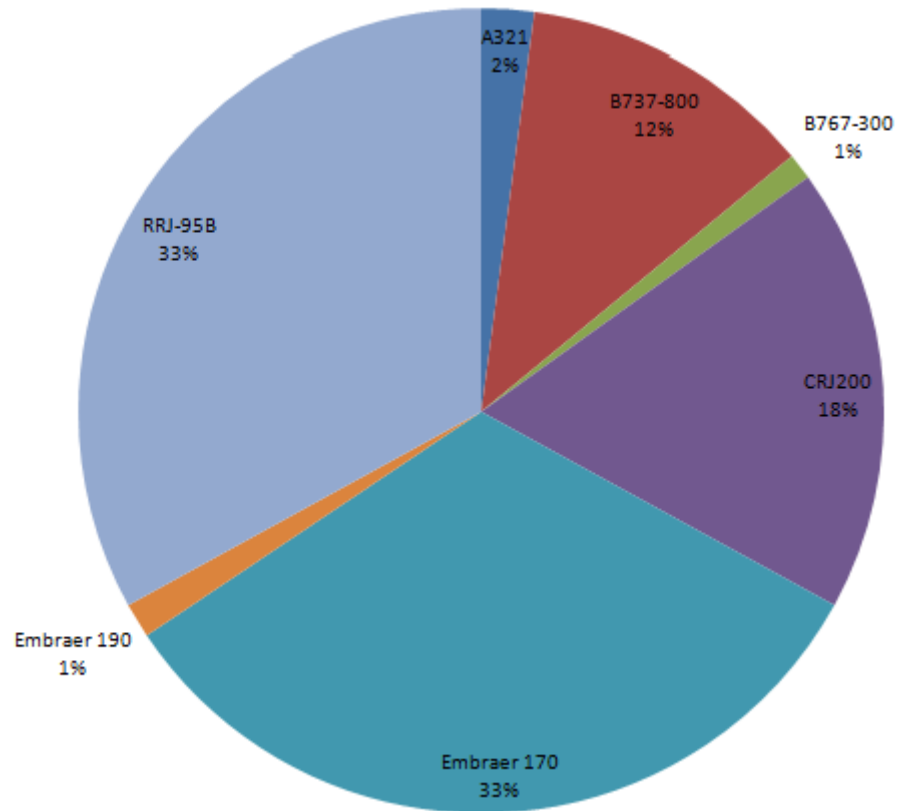


Рисунок Б.11 – Интенсивности ВПО в аэропорту Белгород

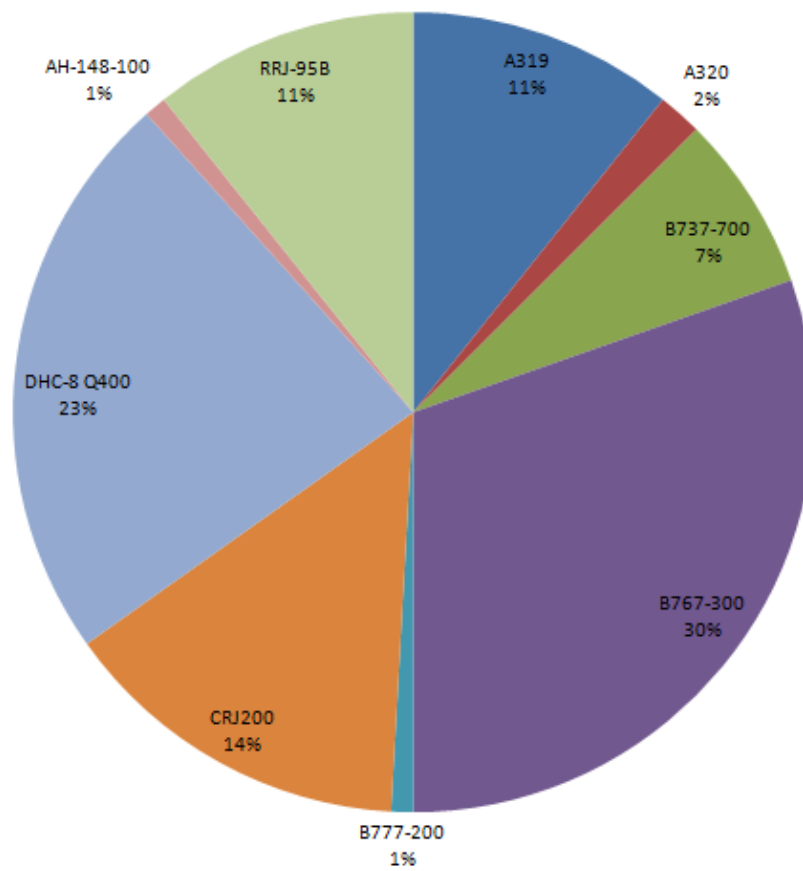


Рисунок Б.12 – Интенсивности ВПО в аэропорту Благовещенск (Игнатьево)

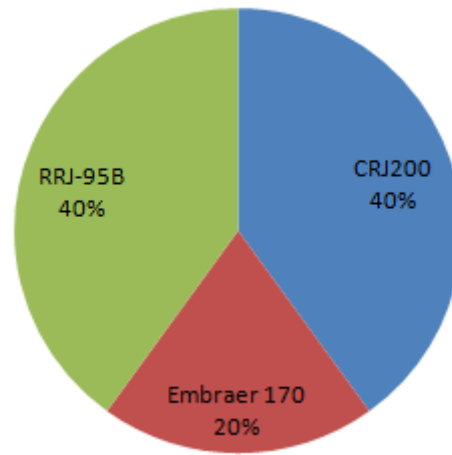


Рисунок Б.13 – Интенсивности ВПО в аэропорту Брянск

Приложение В

Результаты моделирования статистического ряда допустимых нагрузок

Таблица В.1

№	m_d	m_u	$\frac{F(m_u) - F(m_d)}{F(m_u)}$	F_n
1	2	3	4	5
1	50501	50523	0,00045	655
2	48660	48681	0,00045	628,75
3	62734	62750	0,00025	841,25
4	46133	46167	0,00072	593,125
5	47513	47550	0,00077	612,5
6	49540	49571	0,00064	641,25
7	46352	46355	0,00005	596,25
8	55407	55431	0,00042	726,875
9	49233	49262	0,00061	636,875
10	42841	42845	0,0001	547,5
11	48220	48254	0,0007	622,5
12	35298	35317	0,00054	446,25
13	45015	45059	0,00098	577,5
14	46845	46863	0,00039	603,125
15	50939	50975	0,00072	661,25
16	39822	39847	0,00062	506,25
17	48925	48960	0,00071	632,5
18	41658	41665	0,00017	531,25
19	48040	48044	0,00009	620
20	50850	50872	0,00044	660
21	56547	56579	0,00056	744,375
22	45996	46000	0,00011	591,25
23	44474	44517	0,00095	570
24	51848	51864	0,0003	674,375
25	53188	53204	0,00031	693,75
26	55857	55899	0,00075	733,75
27	52328	52376	0,00091	681,25
28	42797	42814	0,0004	546,875
29	43343	43379	0,00083	554,375
30	38335	38371	0,00094	486,25
31	53748	53773	0,00046	701,875
32	45368	45371	0,00006	582,5
33	55285	55315	0,00054	725
34	70005	70039	0,00049	958,75
35	51111	51136	0,00049	663,75
36	38425	38437	0,00032	487,5
37	48969	48999	0,00062	633,125

1	2	3	4	5
38	54754	54790	0,00066	716,875
39	45192	45217	0,00056	580
40	46401	46436	0,00074	596,875
41	55979	56015	0,00065	735,625
42	44920	44932	0,00026	576,25
43	48133	48177	0,00091	621,25
44	49711	49712	0,00002	643,75
45	66012	66034	0,00033	893,75
46	59605	59633	0,00047	791,875
47	46490	46517	0,00058	598,125
48	50196	50228	0,00062	650,625
49	50369	50381	0,00024	653,125
50	47691	47731	0,00084	615
51	53060	53086	0,0005	691,875
52	45145	45154	0,0002	579,375
53	45058	45090	0,00072	578,125
54	51243	51274	0,00062	665,625
55	52929	52939	0,0002	690
56	42934	42963	0,00065	548,75
57	57152	57153	0,00001	753,75
58	48792	48815	0,00047	630,625
59	38241	38276	0,00091	485
60	49976	49995	0,00037	647,5
61	54711	54712	0,00002	716,25
62	42341	42346	0,00011	540,625
63	47952	47962	0,0002	618,75
64	52241	52283	0,0008	680
65	53447	53470	0,00044	697,5
66	51935	51951	0,00031	675,625
67	54136	54178	0,00077	707,5
68	44516	44532	0,00037	570,625
69	46531	46533	0,00005	598,75
70	44153	44161	0,00018	565,625
71	40099	40125	0,00063	510
72	45279	45286	0,00016	581,25
73	47022	47037	0,00032	605,625
74	47156	47178	0,00047	607,5
75	53793	53838	0,00084	702,5
76	49014	49050	0,00073	633,75
77	50413	50432	0,00038	653,75
78	52151	52161	0,00019	678,75

1	2	3	4	5
79	45597	45632	0,00077	585,625
80	45552	45584	0,00071	585
81	44201	44224	0,00052	566,25
82	52156	52207	0,00098	678,75
83	39542	39555	0,00033	502,5
84	46041	46049	0,00017	591,875
85	45146	45164	0,00041	579,375
86	37485	37494	0,00024	475
87	45417	45451	0,00074	583,125
88	46711	46733	0,00046	601,25
89	52759	52798	0,00073	687,5
90	45373	45408	0,00078	582,5
91	55856	55881	0,00045	733,75
92	49144	49173	0,00057	635,625
93	50020	50035	0,0003	648,125
94	52236	52236	0	680
95	48922	48927	0,0001	632,5
96	43973	43984	0,00025	563,125
97	53363	53405	0,00079	696,25
98	39960	39983	0,00057	508,125
99	46488	46506	0,00038	598,125
100	48571	48587	0,00033	627,5
101	45283	45318	0,00078	581,25
102	57721	57768	0,00082	762,5
103	47598	47610	0,00025	613,75
104	41434	41470	0,00088	528,125
105	45280	45297	0,00036	581,25
106	52759	52792	0,00063	687,5
107	45238	45270	0,00072	580,625
108	37793	37813	0,00053	479,063
109	33944	33969	0,00073	428,75
110	46620	46625	0,0001	600
111	40700	40739	0,00096	518,125
112	47069	47102	0,00071	606,25
113	55773	55783	0,00018	732,5
114	44877	44900	0,00052	575,625
115	46491	46528	0,00079	598,125
116	46755	46765	0,00023	601,875
117	49102	49139	0,00076	635
118	52325	52341	0,00032	681,25
119	53359	53364	0,0001	696,25

1	2	3	4	5
120	43293	43296	0,00007	553,75
121	42569	42575	0,00014	543,75
122	51283	51292	0,00016	666,25
123	43024	43044	0,00048	550
124	57236	57270	0,00061	755
125	48263	48282	0,0004	623,125
126	50237	50245	0,00015	651,25
127	46978	46999	0,00044	605
128	49628	49667	0,00078	642,5
129	42751	42763	0,00029	546,25
130	42525	42544	0,00045	543,125
131	47866	47896	0,00061	617,5
132	43115	43142	0,00062	551,25
133	47955	47989	0,00071	618,75
134	44020	44041	0,00049	563,75
135	54468	54520	0,00094	712,5
136	47244	47260	0,00034	608,75
137	54179	54214	0,00066	708,125
138	50589	50621	0,00062	656,25
139	39173	39203	0,00075	497,5
140	50238	50256	0,00035	651,25
141	55978	56009	0,00055	735,625
142	41795	41801	0,00014	533,125
143	43068	43080	0,00029	550,625
144	54999	55025	0,00048	720,625
145	46802	46836	0,00072	602,5
146	46536	46582	0,00097	598,75
147	55040	55073	0,0006	721,25
148	35082	35102	0,00058	443,438
149	44879	44916	0,00083	575,625
150	48218	48232	0,0003	622,5
151	38708	38742	0,00087	491,25
152	46488	46501	0,00028	598,125
153	55039	55061	0,0004	721,25
154	53878	53916	0,00069	703,75
155	45148	45180	0,00072	579,375
156	39494	39497	0,00007	501,875
157	47111	47124	0,00028	606,875
158	45774	45797	0,0005	588,125
159	44518	44553	0,00079	570,625
160	51066	51079	0,00024	663,125

1	2	3	4	5
161	47333	47347	0,00031	610
162	45954	45984	0,00066	590,625
163	40695	40700	0,00011	518,125
164	49892	49933	0,00082	646,25
165	42660	42666	0,00016	545
166	47247	47287	0,00085	608,75
167	39169	39169	0	497,5
168	33943	33960	0,00051	428,75
169	42069	42078	0,00022	536,875
170	36064	36082	0,00049	456,25
171	40884	40922	0,00094	520,625
172	58684	58702	0,00031	777,5
173	42799	42835	0,00082	546,875
174	50282	50296	0,00028	651,875
175	53446	53459	0,00024	697,5
176	41889	41912	0,00055	534,375
177	42390	42417	0,00064	541,25
178	49932	49944	0,00025	646,875
179	39030	39034	0,00011	495,625
180	59486	59519	0,00056	790
181	53875	53886	0,0002	703,75
182	50895	50929	0,00068	660,625
183	52024	52062	0,00072	676,875
184	55858	55911	0,00096	733,75
185	53531	53542	0,00019	698,75
186	40930	40967	0,00091	521,25
187	57396	57407	0,0002	757,5
188	42390	42422	0,00075	541,25
189	50849	50866	0,00034	660
190	46357	46393	0,00077	596,25
191	49451	49476	0,00049	640
192	37441	37471	0,00079	474,375
193	51977	51980	0,00006	676,25
194	43251	43276	0,00058	553,125
195	42116	42139	0,00053	537,5
196	40608	40641	0,00081	516,875
197	53879	53922	0,00079	703,75
198	48395	48415	0,00041	625
199	44830	44837	0,00016	575
200	53192	53240	0,0009	693,75