

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)» на кафедре «Аэропорты, инженерная геология и геотехника».

**Научный руководитель:** кандидат технических наук, доцент  
**Сабуренкова Валентина Александровна**

**Официальные оппоненты:** **Матвеев Сергей Александрович**,  
доктор технических наук, профессор,  
федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Сибирский государственный автомобильно-  
дорожный университет (СибАДИ)», кафедра  
«Мосты и тоннели», профессор

**Андронов Вадим Дмитриевич**,  
кандидат технических наук, акционерное  
общество «ИРМАСТ-ИНЖИНИРИНГ»,  
первый заместитель генерального директора

**Ведущая организация:** Федеральное государственное унитарное  
предприятие «Администрация гражданских  
аэропортов (аэродромов)»

Защита состоится 22 июня 2023 г., в 14:00 на заседании диссертационного совета 40.2.002.10 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9 (ауд. 329, ул. Часовая, д. 22/2, стр. 1).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ), [www.mii.ru](http://www.mii.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» мая 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Бадина Елена Сергеевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

**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 СП 121.13330 «Аэродромы», и не учитываются характеристики воздушных судов, воздействующих на покрытие. Расчет выполняется по нормам СП 121.13330, 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 эксплуатирующих 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. Корневым, 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. Тригони, 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 характеристик: 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 натуральных испытаний, основанный на разработанной математической модели;
- рекомендации по применению методик и программ для планирования натуральных 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.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы из 151 наименования; содержит 196 страниц основного текста, том числе, 40 таблиц, 49 рисунков, кроме того 3 приложения.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и основные задачи, определена научная новизна и практическая значимость исследования.

**В первой главе** диссертации содержится обзор и анализ методов оценки несущей способности жестких аэродромных покрытий России и зарубежных стран.

Оценка несущей способности аэродромных покрытий заключается в определении предельно допустимой нагрузки на конструкцию с учетом повторности ее приложения за срок службы. Она является обратной задачей по отношению к

расчету при проектировании, но выполняется по тем же нормативным методам расчета.

Расчет аэродромных покрытий производят по методу предельных состояний. Для бетонных и армобетонных покрытий принимают предельное состояние по прочности. Условие прочности жесткого аэродромного покрытия имеет вид

$$m_d \leq m_u, \quad (1)$$

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

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 прочности жестких покрытий Международной организацией ИКАО.

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. В главе рассмотрены методы оценки несущей способности, применяемые в различных странах.

Выполненный анализ нормативных документов показывает, что в настоящее время в России при определении несущей способности аэродромных покрытий используется нормативная четырехколесная опора с давлением в пневматиках колес 1 МПа, которая была введена во второй половине XX века и не соответствует характеристикам опор большинства современных воздушных судов.

**Во второй главе** выполнен анализ характеристик опор эксплуатируемых в настоящее время в отечественных аэропортах воздушных судов, который показал, что характеристики современных воздушных судов не соответствуют категориям нормативной нагрузки, используемым при расчете прочности жестких аэродромных покрытий. Для того чтобы каждый тип воздушного судна отнести к категории нормативной нагрузки по воздействию на жесткие аэродромные покрытия, выполнено сравнение максимальных изгибающих моментов от воздействия колес основной опоры каждого воздушного судна и четырехколесной нормативной опоры. В результате сравнения максимальных изгибающих моментов воздушные суда разделены на классы.

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.

Для формирования классов воздушных судов составлена матрица планирования эксперимента (табл. 1) по определению толщин бетонного покрытия и максимальных изгибающих моментов в зависимости от факторов – класса бетона и коэффициента постели для пяти категорий нормативной нагрузки. Определены значения функции отклика и составлены уравнения регрессии для каждой нормативной нагрузки.

Таблица 1

№ 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		В/к	I	II	III	IV
	$B_{tb}$	$K_s, \text{МН/м}^3$	$x_1$	$x_2$					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	4,0/50	50	-1	-1	$\frac{110}{0,57}$	$\frac{85,9}{0,5}$	$\frac{63}{0,43}$	$\frac{42}{0,35}$	$\frac{28,8}{0,29}$
2	4,8/60	50	+1	-1	$\frac{105}{0,51}$	$\frac{81,9}{0,45}$	$\frac{59,5}{0,38}$	$\frac{39,4}{0,31}$	$\frac{27,7}{0,26}$
3	4,0/50	160	-1	+1	$\frac{74,9}{0,47}$	$\frac{57,5}{0,41}$	$\frac{44,2}{0,36}$	$\frac{31}{0,30}$	$\frac{22,8}{0,26}$
4	4,8/60	160	+1	+1	$\frac{68,8}{0,41}$	$\frac{55,4}{0,37}$	$\frac{42,2}{0,32}$	$\frac{29,8}{0,27}$	$\frac{21,8}{0,23}$

В результате анализа уравнений регрессии определены расчетные значения коэффициента постели 50 и 160 МН/м<sup>3</sup> и класс бетона 4,4/55. Для этих значений по всем категориям нормативной нагрузки рассчитаны эталонные значения упругой характеристики  $l$  (табл. 2), используемые при определении максимальных изгибающих моментов для каждого типа воздушного судна.

Таблица 2

$K_s, \text{МН/м}^3$	$l, \text{м}$					
	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

В результате расчета изгибающих моментов от эксплуатируемых воздушных судов сформировано 5 классов нагрузок от воздушных судов, соответствующих по изгибающим моментам категориям нормативной нагрузки, и класс сверхтяжелых воздушных судов.

Пример разработанной новой классификации нагрузок по критерию прочности жесткого аэродромного покрытия на изгиб приведен в табл. 3.

Следует отметить, что возможны другие принципы классификации нагрузок. Ранее в нормативных документах категории нагрузок определялись по нагрузке на одно колесо опоры. В настоящее время странами – членами ИКАО нагрузки от воздушных судов задаются классификационными числами ACN. Для сравнения разработанной классификации с классификациями по другим принципам были выполнены классификации нагрузок от тех же типов воздушных судов 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 колесо дает большее расхождение результатов.

Класс	Категория нормативной нагрузки	Тип воздушного судна
1	Сверхтяжелые воздушные суда	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

Согласно действующим нормам расчет бетонных аэродромных покрытий по давлению на грунтовое основание необходимо выполнять только для просадочных грунтов. Для проверки этого положения в работе была получена формула (2) предельно допустимого давления на грунт  $P_u$  и выполнен численный эксперимент по проверке прочности грунтового основания из супеси пылеватой, глины и песка пылеватого.

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

где  $\varphi$  – угол внутреннего трения грунта, рад;

$g$  – ускорение свободного падения;

$\rho_i$  – плотность материала  $i$ -го конструктивного слоя, кг/м<sup>3</sup>;

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

$n$  – количество слоев конструкции выше подстилающего грунта;

$k_o$  – коэффициент, учитывающий условия работы грунта на контакте со слоем искусственного основания, тиксотропные изменения в грунте под действием повторных нагрузок;

$c$  – общее сцепление грунта, кПа.

Численный эксперимент показал, что конструкции бетонных аэродромных покрытий, прочность которых допустима по изгибающим моментам, могут быть недопустимы по условию давления на грунтовое основание для современных тяжелых воздушных судов. Поэтому требуется проверка конструкции по критерию давления на грунтовое основание.

**Третья глава** посвящена разработке метода оценки несущей способности бетонных и армобетонных аэродромных покрытий, включающего в себя методики планирования натуральных испытаний, статистической обработки и определения допустимой нагрузки. Оценка несущей способности аэродромных покрытий выполняется на стадии эксплуатации. Характеристики конструкции со временем изменяются под воздействием нагрузок от воздушных судов, природных и эксплуатационных факторов. Наиболее адекватная оценка несущей способности жестких аэродромных покрытий может быть получена при исследовании их



фактического состояния и натуральных испытаний расчетными нагрузками. Методика планирования испытаний предназначена для определения испытательной нагрузки и координат точек измерений прогибов.

В настоящее время для определения расчетных характеристик плиты при испытании штампами используется объем чаши прогиба и максимальный прогиб от нагрузки. Как показал опыт применения этого метода, точность оценки объема чаши прогиба в значительной мере зависит от точности определения величины ее радиуса. Как правило, она определяется по интерполяции, что снижает точность оценки упругой характеристики и коэффициента постели.

Предлагаемая в данной работе методика предназначена для оценки несущей способности бетонных и армобетонных аэродромных покрытий опорами воздушных судов и автомобилей или штампами.

При планировании испытаний опорами воздушных судов и автомобилей предварительно выполняется расчет допустимой нагрузки на опору по условию прочности. Для расчета прогибов от испытательной нагрузки используется схема нагружения бетонного покрытия, которая показана на рис. 1. Количество точек измерения прогибов и координаты их размещения определяются таким образом, чтобы минимальное расстояние от колес опоры до наиболее удаленной точки измерения было больше прогнозируемой упругой характеристики плиты.

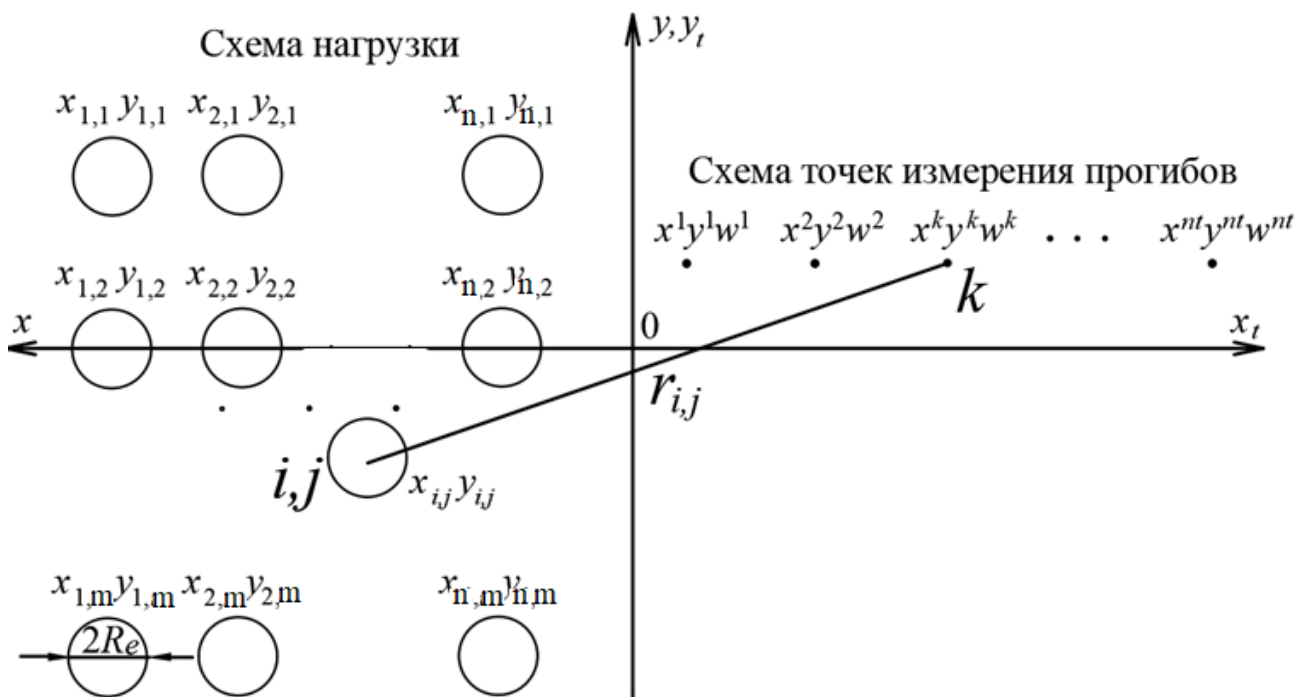


Рисунок 1 – Схема измерения прогибов от нагрузки

Предварительный расчет прогибов в покрытии выполняется с помощью решения уравнения (3) изгиба плиты на упругом основании, которое в цилиндрических координатах имеет вид

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \right) \left( \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right) = \frac{q - K_{se} w}{B_{tot}}, \quad (3)$$

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.

Прогиб конструкции покрытия в точке  $(x^k, y^k)$  от нагрузок всех колес опоры равен

$$w^k = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n w_{i,j}^k, \quad (4)$$

где  $w^k$  – прогиб конструкции покрытия в точке  $(x^k, y^k)$ , см. схему рис. 1;

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

$n$  – число колес на одной оси опоры;

$m$  – число осей на опоре;

$k$  – номер точки измерения прогибов,  $k = 1, 2, \dots, nt$ ;

$nt$  – количество точек измерения прогибов.

При расчете прогибов рассматриваются два варианта: нагрузка от колес опоры задается распределенной по площади круга или сосредоточенной.

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

$$\alpha = \frac{R_e}{l}, \quad (5)$$

где  $R_e$  – радиус круга колеса испытательной нагрузки, м;

$l$  – упругая характеристика плиты, м.

Прогиб в точке  $k$  от всех колес определяется по формуле

$$w^k = -\frac{\pi q \alpha}{2K_{se}} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n [v'_0(\alpha) f_0(\xi_{i,j}^k) + u'_0(\alpha) g_0(\xi_{i,j}^k)], \quad (6)$$

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

$F_k$  – нагрузка на колесо, МН;

$\xi_{i,j}^k$  – приведенное расстояние от точки  $k$  до  $i, j$ -го колеса опоры;

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

$u'_0(x)$ ,  $v'_0(x)$  – производные соответственно действительной и мнимой частей функции Бесселя.

2. При сосредоточенной нагрузке суммарный прогиб конструкции в точке  $k$  равен

$$w^k = -\frac{F_k}{4l^2 K_{se}} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n f_0(\xi_{i,j}^k). \quad (7)$$

Полученные значения сравниваются с минимально и максимально допустимыми. Минимальные значения соответствуют характеристикам измерительной аппаратуры. Максимальные значения задаются с учетом недопустимости появления в покрытии разрушений из-за превышения допустимой нагрузки. Если условие выполнено, выполняются натурные испытания рассчитанной нагрузкой.

При планировании испытаний с помощью штампа для расчета прогибов используется схема измерения, показанная на рис. 2.



Рисунок 2 – Схема измерения прогибов штампом

Прогибы определяются в зависимости от расположения точек измерения относительно штампа. Приведенный радиус нагрузки от штампа равен

$$\alpha = \frac{R}{l}, \quad (8)$$

где  $R$  – радиус штампа, м.

Приведенное расстояние от центра штампа до точки  $k$  равно

$$\xi_k = \frac{x_k}{l}, \quad (9)$$

где  $x_k$  – координата точки  $k$  (см. рис. 2).

Прогибы от воздействия нагрузки от штампа, распределенной по площади круга приведенного радиуса  $\alpha$ , определяются по формулам

при  $\xi_k \leq \alpha$

$$w_k = -\frac{\pi q \alpha}{2K_s} \left[ -\frac{2}{\pi \alpha} + g'_0(\alpha) u_0(\xi_k) + f'_0(\alpha) v_0(\xi_k) \right], \quad (10)$$

при  $\xi_k > \alpha$

$$w_k = -\frac{\pi q \alpha}{2K_s} [v'_0(\alpha) f_0(\xi_k) + u'_0(\alpha) g_0(\xi_k)], \quad (11)$$

где  $q$  – нагрузка на единицу площади штампа, МПа;

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

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

Значения прогибов также сравниваются с минимально и максимально допустимыми значениями. Если условие выполнено, выполняются натурные испытания.

Оценка характеристик напряженно-деформированного состояния бетонного покрытия заключается в определении фактических значений упругой характеристики плиты и коэффициента постели основания, удовлетворяющих уравнению изгиба. Искомая упругая характеристика определяется методом последовательных приближений из равенства отношений теоретических прогибов и фактических прогибов  $w_{fact}^k$ , полученных в результате испытаний:

$$\frac{w_{fact}^a}{w_{fact}^b} = \frac{w^a \left( \frac{r_{i,j}^a}{l} \right)}{w^b \left( \frac{r_{i,j}^b}{l} \right)}, \quad (12)$$

где  $a = 1, \dots, nt - 1$  – номер расчетной точки;

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

$w^a \left( \frac{r_{i,j}^a}{l} \right), w^b \left( \frac{r_{i,j}^b}{l} \right)$  – теоретические прогибы, определяемые по формулам (6, 7).

Для расчета коэффициентов постели основания определяются значения реактивного давления основания в точках  $k$  (см. рис. 1) по формуле

$$p^k = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n p_{ij}^k, \quad (13)$$

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  $p_{ij}^k$  определяются по оценке математического ожидания упругой характеристики  $\bar{l}$  для нагрузки, распределенной по площади круга, по формуле

$$\begin{aligned} p_{ij}^k &= -\frac{\pi q \alpha}{2} [v'_0(\alpha) f_0(\xi_{i,j}^k) + u'_0(\alpha) g_0(\xi_{i,j}^k)] = \\ &= -\frac{\pi q \alpha}{2} \left[ v'_0 \left( \frac{R_e}{\bar{l}} \right) f_0 \left( \frac{r_{i,j}^k}{\bar{l}} \right) + u'_0 \left( \frac{R_e}{\bar{l}} \right) g_0 \left( \frac{r_{i,j}^k}{\bar{l}} \right) \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

Для сосредоточенной нагрузки реактивное давление определяется по формуле

$$p_{ij}^k = -\frac{F_d}{4l^2} f_0(\xi_{i,j}^k) = -\frac{F_d}{4l^2} f_0 \left( \frac{r_{i,j}^k}{\bar{l}} \right). \quad (15)$$

При испытании штампом значения реактивного давления в точках плиты, расположенных за пределами штампа, определяются по формуле (14), а в пределах площади штампа – по формуле

$$\begin{aligned} p^k &= -\frac{\pi q \alpha}{2} \left[ -\frac{2}{\pi \alpha} g'_0(\alpha) u_0(\xi_k) + f'_0(\alpha) v_0(\xi_k) \right] = \\ &= -\frac{\pi q \alpha}{2} \left[ -\frac{2}{\pi \alpha} g'_0 \left( \frac{R}{\bar{l}} \right) u_0 \left( \frac{x_k}{\bar{l}} \right) + f'_0 \left( \frac{R}{\bar{l}} \right) v_0 \left( \frac{x_k}{\bar{l}} \right) \right]. \end{aligned} \quad (16)$$

Коэффициент постели основания при фактических значениях прогибов определяется по формуле

$$K_s^k = \frac{p^k}{w_{fact}^k}. \quad (17)$$

Жесткость сечения плиты вычисляется по формуле

$$B = l^4 K_s. \quad (18)$$

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. Для каждой реализации случайных аргументов вычисляется значение  $B_i$  и получается статистический ряд значений

жесткостей, для которого после проверки на соответствие нормальному закону распределения определяются оценки – среднее значение жесткости плиты и среднеквадратическое отклонение.

Оценки упругой характеристики, коэффициента постели основания и жесткости плиты в свою очередь являются исходными данными для вероятностной модели бетонных покрытий.

Модель используется для расчета несущей способности эксплуатируемых аэродромных покрытий, которая определяется как величина допустимой нагрузки на опору воздушного судна. Для поиска значений случайной величины нагрузки формируется статистический ряд допустимых нагрузок методом Монте-Карло в зависимости от разыгранных по нормальному закону распределения случайных параметров бетонного аэродромного покрытия. Для каждого варианта разыгранных параметров выполняется поиск допустимой нагрузки  $F_{ni}$  на основную опору расчетного воздушного судна, удовлетворяющей условию (1) и условию

$$\frac{m_u - m_d}{m_u} \leq \delta, \quad (19)$$

где  $\delta$  – допустимое относительное недонапряжение конструкции.

Расчетный и предельный изгибающие моменты, входящие в формулы (1, 19), вычисляются по параметрам конструкции бетонного покрытия, полученным при статистической обработке результатов испытаний аэродромных покрытий.

После статистического анализа и приведения ряда допустимых нагрузок к нормальному распределению вычисляется действительное значение допустимой нагрузки  $F_n$  по формуле

$$F_n = \bar{F}_n - z_{1-\alpha} \cdot S_{F_n}, \quad (20)$$

где  $\bar{F}_n$  – среднее значение допустимой нагрузки;

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

$S_{F_n}$  – среднеквадратическое отклонение допустимой нагрузки.

Действительное значение допустимой нагрузки является оценкой несущей способности бетонного покрытия и используется в дальнейшем в модели метода ACN–PCN для определения классификационного числа PCN жесткого покрытия.

**Четвертая глава** посвящена практическому применению предлагаемого метода оценки несущей способности с использованием разработанных специализированных программ.

Определение координат точек измерения прогибов и расчет статистических рядов упругих характеристик плиты, коэффициентов постели основания и жесткости конструкции выполняет программа Tesaf, алгоритм которой разработан на основании соответствующих методик, приведенных в главе 3. Программа Tesaf работает в двух режимах. В режиме планирования испытаний по заданным характеристикам конструкции и испытательной нагрузки вычисляет прогибы в заданных точках плиты. В режиме обработки результатов испытаний формирует статистические ряды характеристик напряженно-деформированного состояния конструкции. В главе приведены подробные примеры работы программы.

Статистическую обработку результатов полученных рядов выполняет программа Statis, разработанная по ГОСТ Р ИСО 5479-2002 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. Эти характеристики являются аргументами функций расчетного и предельного изгибающих моментов.

Расчет допустимой нагрузки выполняется методом статистического моделирования Монте-Карло разыгрыванием аргументов расчетного и предельного изгибающих моментов по полученным оценкам. Для формирования статистического ряда допустимых по изгибающим моментам нагрузок разработана программа ModFn.

В приведенном примере определено классификационное число PCN, соответствующее действительному значению допустимой нагрузки на главную опору конкретного типа воздушного судна. Для полученного кода PCN определены допустимые режимы эксплуатации воздушных судов.

Для проверки достоверности разработанных методик и компьютерных программ выполнен расчет допустимой нагрузки на покрытие взлетно-посадочной полосы аэродрома Ростов-на-Дону разработанным вероятностно-статистическим методом и сравнение полученных результатов с выполненными ранее расчетами традиционным нормативным методом институтами ФГУП ГПИ и НИИ ГА «Аэропроект», ОАО «ПИиНИИ ВТ «Ленаэропроект», ОАО «26 ЦНИИ».

## 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 воздушных судов и стохастическую природу характеристик эксплуатируемых аэродромных покрытий.

2. Разработана методика классификации воздушных судов по изгибающим моментам в покрытии, учитывающая характеристики воздушных судов по силовому воздействию на покрытия и позволяющая сопоставлять нагрузки от воздушных судов с категориями нормативной нагрузки.

3. Численный эксперимент по проверке прочности грунтового основания показал, что тяжелые типы воздушных судов могут вызывать в грунтовом основании бетонного покрытия недопустимые напряжения. Рекомендуется для воздушных судов 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 натуральных испытаний с учетом характеристик опор воздушных судов.

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 покрытий 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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **В рецензируемых научных изданиях**

1. Сабуренкова, В. А. Вероятностный метод оценки несущей способности бетонных аэродромных покрытий / В. А. Сабуренкова, Я. Н. Цаплин // Транспортное строительство. – 2021. – № 4. – С. 30–32.

2. 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.

3. 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.

### **В других научных изданиях**

1. Сабуренкова, В. А. Оценка несущей способности аэродромных покрытий / В. А. Сабуренкова, Я. Н. Цаплин // Автомобильные дороги. – 2019. – № 1. – С. 118–121.

Цаплин Яков Николаевич

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

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

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

---

Подписано в печать  
Объем 1 п.л.

14 апреля 2023 г.  
Заказ № 313

Формат бумаги 60×90/16  
Тираж 80 экз.

---

127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, д.9, стр. 9