

КИЕВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

АГЕЕВА ГАЛИНА НИКОЛАЕВНА

**ВЛИЯНИЕ ЖЕСТКОСТИ ВЕРХНЕГО СЛОЯ
НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ
ДВУХСЛОЙНЫХ АЭРОДРОМНЫХ ПОКРЫТИЙ**

05.23.11 - Строительство автомобильных дорог и аэродромов

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Киев 1994



Дисертацією являється рукопис
 Работа выполнена на кафедре элек-
 народного университета гражданской

Научный руководитель —

доктор технических наук, профессор
 ВЕРЮЖСКИЙ Юрий Васильевич

Официальные оппоненты:

1. Доктор технических наук, профессор ТРИГОНИ Владилен Евстафьевич
2. Кандидат технических наук, доцент ФЕДОРЕНКО Юрий Михайлович

Ведущая организация:

Украинский Государственный проектно-технологический и научно-исследователь-
 ский институт "Укразропроект" Департамента авиационного транспорта Министерства
 транспорта Украины (г. Киев).

Защита состоится " 1 " июля 1994 г. в 10 ч 00 мин. в аудитории 333-0
 на заседании специализированного ученого Совета Д 068.09.02 при Киевском автомобиль-
 но-дорожном институте по адресу: 252010, г. Киев, ул. Суворова, 1
 С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан " 31 " июня 1994 г.

Ученый секретарь
 специализированного
 ученого Совета, профессор

Н.Н. Дмитриев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Развитие и совершенствование сети аэропортов, ввод в эксплуатацию новых типов воздушных судов значительно увеличивают требования, предъявляемые к наземной базе гражданской авиации.

При высокой стоимости строительства новых транспортных узлов актуальной задачей является эффективное использование существующей системы аэродромных сооружений. Особое значение имеют несущая способность искусственных покрытий и состояние их поверхности.

Нарращивание в процессе реконструкции жестких аэродромных покрытий одного или нескольких слоев не всегда преследует цель повышения несущей способности сооружения. Оно может применяться для устранения поверхностных разрушений и повышения стойкости покрытия к воздействию климатических и механических факторов. В этом случае устройство массивных слоев нецелесообразно.

При изучении проблемы рациональной реконструкции наряду с широко применяемой укладкой асфальтобетона, учитывая дефицит битумных вяжущих, следует рассмотреть возможность применения бетонных слоев усиления с размерами ниже нормативных. В целом это приводит к снижению жесткости данного слоя и требует проведения аналитических, численных и экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния для обоснования возможности снижения нормативных размеров слоев усиления.

Цель диссертационной работы – анализ существующих методик автоматизированного расчета жестких аэродромных покрытий и обоснование целесообразности их применения для оценки напряженно-деформированного состояния конструкций с верхним слоем пониженной жесткости.

Для достижения поставленной цели в настоящей работе решались следующие задачи:

проведение численных исследований напряженно-деформированного состояния двухслойных плит с переменным соотношением размеров слоев при центральном положении нагрузки с учетом технологической схемы возведения;

моделирование системы стыковых соединений;

определение количественных показателей, характеризующих особенности работы плит и их систем при граничных положениях нагрузки;

теоретическая оценка напряженно-деформированного состояния плит двухслойных покрытий с верхним слоем пониженной жесткости в различных условиях эксплуатации;

экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния конструкций реальных покрытий.

Научную новизну работы определяют:

результаты численного исследования напряженно-деформированного состояния двухслойных плит с учетом технологической схемы возведения;

результаты исследований напряженно-деформированного состояния конструкций с верхним слоем пониженной жесткости для различных расчетных условий;

рекомендации по проектированию плит и их систем с учетом развития сдвиговых деформаций по толщине конструкции;

анализ расчетных схем, моделирующих стыковые соединения в системах плит;

рекомендации по уточнению границ эффективности применения численных моделей изгибаемых плит в рамках используемого пакета прикладных программ.

Полученные результаты подтверждены данными экспериментальных исследований плит реальных аэродромных сооружений и аналитическими расчетами.

Практическая ценность работы заключается в том, что полученные результаты ориентированы на снижение трудоемкости и повышение качества проектирования и реконструкции жестких аэродромных покрытий, на обоснование применения в качестве конструкций усиления слоев пониженной жесткости.

Внедрение результатов. Результаты исследований использованы в практической деятельности Государственного проектно-изыскательского и научно-исследовательского института гражданской авиации ГПИ и НИИГА "Аэропроект" (г.Москва) и Екатеринбургского ОАО (Российская Федерация).

На защиту выносятся:

результаты численных исследований напряженно-деформированного состояния плит двухслойных покрытий с переменным соотношением размеров слоев;

рекомендации по установлению границ эффективности применения в рамках использованного пакета прикладных программ численных моделей изгибаемых плит для расчета двухслойных конструкций;

рекомендации по проектированию плитных конструкций с верхним слоем пониженной жесткости.

Публикации. Основные результаты проведенных исследований опубликованы в двенадцати работах.

Апробации. По теме диссертационной работы сделаны доклады:

на Всесоюзной научно-технической конференции МГА "Современные проблемы развития наземной базы гражданской авиации" (г.Киев, 1988г.);

на IX - XIII отчетных научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава Киевского института инженеров гражданской авиации (г.Киев, 1988-1992 г.г.);

на Всесоюзном научном семинаре "Методы потенциала и конечных элементов в автоматизированных исследованиях инженерных конструкций" (г.Санкт-Петербург, 1990-1991 гг., г.Киев, 1991 г.).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографии из 112 наименования и трех приложений; изложена на 152 страницах машинописного текста, содержит 16 таблиц, 32 рисунка и 42 страницы приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении даны общая характеристика работы и обоснование темы настоящей диссертации, показана научная новизна и практическое значение выполненных исследований.

В первой главе рассматриваются конструктивные особенности двухслойных жестких покрытий, применяемых в аэродромостроении. В этом многообразии выделены конструкции, верхний слой которых имеет пониженные в сравнении с нормативными значениями толщину и, как следствие этого, жесткость. Приведен краткий анализ методов оценки напряженно-деформированного состояния плит на упругом основании, к классу которых относятся конструкции жестких покрытий.

Исследованиям напряженно-деформированного состояния плит на упругом основании посвящен целый ряд работ М.И.Горбунова-Посадова, Б.Н.Жемочкина, В.А.Киселева, Г.К.Клейна, С.Н.Клепикова, Б.Г.Коренева, С.П.Тимошенко, А.П.Синицына и др.

Построению основных теоретических положений расчета многослойных изгибаемых элементов и их приложению для исследования различных аспектов прочности аэродромных и дорожных покрытий и оснований посвящены исследования В.Б.Безелянского, Л.И.Горещкого, Г.И.Глушкова, В.И.Заворицкого, Н.Н.Иванова, С.В.Коновалова, И.А.Медникова, В.В.Мозгового, В.С.Никишина, А.К.Приварникова, Б.С.Радовского, А.О.Рассказова, А.Ф.Рябова, А.П.Степушина, О.Н.Тоцкого, Г.С.Шапиро и др.

Для оперативной оценки несущей способности и эксплуатационной пригодности аэродромных покрытий наряду с принятым в Международной организации гражданской авиации ИКАО методом ACN-PCN используются различные феноменологические методики, базирующиеся на данных экспериментальных исследований, основные положения которых изложены в работах В.П.Апестинной, Ю.Б.Барит, А.П.Виноградова, В.С.Орловского, В.Д.Садового, В.Е.Тригопи, Н.Ашфорда, П.Х.Райта и др.

В практике аэродромостроения плиты жестких покрытий принято рассматривать бесконечными в плане и лежащими на упругом основании Винклера. В основу модели последнего положена пропорциональная зависимость между реактивным давлением грунта и вертикальным перемещением конструкции, описываемая коэффициентом постели k_z . Коэффициент постели может оцениваться как экстремальный (максимальный) показатель деформативности грунта, что соответствует принципам расчета аэродромных покрытий в наиболее неблагоприятных условиях эксплуатации.

Для расчета двухслойных плит жестких покрытий разработаны специальные методики и рекомендации. Отмечено, что в общем случае в качестве расчетной принимается

модель неоднородной конструкции без учета обжатия слоев в вертикальном направлении, используются гипотезы прямой нормали, условия равенства прогибов несущих слоев и вводятся обобщенные характеристики сечения.

Нормативная методика расчета прочности двухслойных жестких аэродромных покрытий изложена в СНиП 2.05.08-85 "Аэродромы" и базируется на методе предельных состояний бетонных и железобетонных конструкций. В качестве расчетной принимается двухслойная плита, устроенная наращиванием по разделительной прослойке, нагруженная в центральной зоне вертикальной нагрузкой – главной опорой воздушного судна. Нагрузка не является точечной, а в общем случае распределяется по площади отпечатка пневматика наиболее загруженного или невыгодно расположенного колеса. Влияние соседних учитывается по принципу суперпозиции.

Расчетным усилием считается изгибающий момент в центральном сечении, к величине которого вводятся поправочные и переходные коэффициенты, учитывающие условия работы конструкции плиты и основания, конечные размеры плит, наличие стыковых соединений и схему совмещения швов в плане.

Расчет сводится к проверке основного условия прочности для плит каждого из слоев в отдельности, а величина расчетного изгибающего момента, воспринимаемого сечением, распределяется между слоями пропорционально их жесткости.

Отсутствие точного решения дифференциального уравнения изгиба срединной поверхности прямоугольной плиты конечных размеров и невозможность получения детальной картины напряженно-деформированного состояния плитной конструкции при введении переходных коэффициентов, явилось причиной привлечения к расчету численных методов, в том числе и метода конечных элементов (МКЭ). Это позволяет избежать ряда ограничений, положенных в основу технической теории расчета аэродромных плит, и оценить целесообразность применения расчетных моделей МКЭ к рассматриваемому типу конструкций.

Примеры успешной реализации МКЭ для расчета плит на упругом основании представлены в монографиях и статьях П.М.Варвака, А.С.Городецкого, К.П.Елсуковой, О.Зенкевича, А.Б.Каплуна, С.Н.Клепикова, В.Г.Пискунова, А.С.Сахарова, В.И.Сливкера и др. Исследовались особенности работы плит при нагрузках, смещенных от центра, при наличии стыковых соединений между отдельными плитами, рассмотрены вопросы рационального проектирования слоистых конструкций и моделирования технологической схемы их возведения. Основание описывалось различными моделями: упругим полупространством, слоем конечной толщины, моделью с двумя коэффициентами и моделью Винклера.

Для тонких плит, отличительной особенностью которых является превышение двух линейных размеров над третьим, напряженно-деформированное состояние принято описывать через деформации координатной поверхности – поверхности приведения – и

заданные законы распределения деформаций по толщине. Это позволяет свести задачу к двумерной и в случае распространения принятого закона на весь пакет слоев в целом избежать зависимости размера системы разрешающих уравнений от количества слоев.

Результаты применения двумерных КЭ для расчета типовых конструкций жестких аэродромных покрытий дают основание для использования данных КЭ при исследовании напряженно-деформированного состояния нетиповых конструкций со слоями пониженной жесткости.

Вторая глава отражает процесс численного анализа напряженно-деформированного состояния плит с переменным соотношением размеров слоев и выбора вида дискретного аналога, обеспечивающего получение достоверных результатов, на примере решения тестовых задач и данных аналитических расчетов.

Рассмотрены вопросы реализации МКЭ при оценке напряженно-деформированного состояния двухслойных плит с различными условиями на границе контакта слоев, обусловленными технологией возведения: с жестким сцеплением и с разделительной прослойкой.

В качестве объекта исследования принята тонкая двухслойная плита суммарной толщины t_{tot} с переменным соотношением размеров слоев $\alpha = t_{sup} / t_{tot} \in [0;1]$. Механические характеристики материалов слоев представлены модулями упругости E и коэффициентами Пуассона μ . В частности, рассмотрены варианты конструкций, для которых значения $E_{sup} = (1;2)E_{inf}$. Индексы "sup" соответствуют материалу верхнего слоя, а "inf" - нижнего. Свойства упругого основания определены величиной коэффициента постели k_s .

Линейные размеры плиты, величина вертикальной нагрузки и коэффициента k_s соответствуют реальным конструкциям аэродромных плит и условиям их эксплуатации. Очертание зоны приложения нагрузки принято квадратным и эквивалентным по площади отпечатку пневматика самолета Ил-62 - $0,5 \times 0,5$ м.

В качестве аналитических значений величин максимальных прогибов исследуемых конструкций w_{max} принят результат решения Б.Г.Коренева для однослойной плиты бесконечных размеров с жесткостью, равной сумме жесткостей отдельных слоев.

Для численного моделирования использована регулярная разбивочная сетка с ячейкой $0,5 \times 0,5$, а в качестве расчетных моделей - трехмерный КЭ моментной схемы МКЭ и двумерные КЭ неоднородных по толщине плит на упругом основании, реализованные в автоматизированной системе научных исследований "ТЕРМОС" и вычислительном комплексе "Лира". Трехмерные элементы, обеспечивающие получение более точных значений реальных деформаций, использованы для оценки двумерных моделей, построенных в рамках классической и уточненной теорий изгибаемых плит.

Несмотря на то, что расчетные сечения плит при фиксированном значении α имеют постоянную жесткость, численные модели отражают различную деформативность. Зна-

чения максимальных прогибов w_{\max} центрально нагруженной плиты с жестким сцеплением слоев свидетельствуют о том, что численная модель, построенная в рамках классической теории изгиба, отражает минимальную деформативность конструкции. Введение функций распределения перемещений и деформаций сдвига в плоскостях, параллельных поверхности приведения, увеличивает податливость конструкции.

Результаты трехмерного решения превышают соответствующие аналитические величины прогиба w_{\max} для всего исследуемого диапазона α на 11,1-11,2%, что свидетельствует об искусственном снижении податливости плиты вследствие введения допущений о двумерном характере ее работы и осреднения характеристик неоднородных сечений. Отмечено, что трехмерное решение занимает промежуточное положение между величинами прогибов двумерных моделей. Разница составляет 1,7-4,2 и 0,8-3,0% для классической и сдвиговой моделей соответственно (рис. 1,а).

В исследуемом диапазоне α , за исключением $\alpha = 1,0$, сдвиговая модель дает результаты, более близкие к трехмерному решению. Учитывая то, что при $\alpha = 1,0$ плита имеет максимальную жесткость, сделан вывод о необходимости использования сдвиговой модели в случае снижения упругих свойств материалов конструкции.

Величины растягивающих напряжений в численных и аналитических решениях для однородных плит (при крайних значениях α) близки в более жестких конструкциях и при использовании аналитической зависимости С.П.Тимошенко, когда геометрия грузовой площади соответствует верхней поверхности нагружаемого КЭ.

При сравнении численных величин нормальных напряжений с аналитическими, полученными на основе соотношения Б.Г.Коренева, используемого в нормативной методике, гипотезы прямых нормалей дают большее расхождение - до 9,7%, а учет сдвиговых деформаций снижает его до 5,6%.

Для неоднородных по толщине конструкций - $\alpha \neq 0; 1$ - вследствие отсутствия аналитических решений, оценены абсолютные величины нормальных напряжений на внешних границах численных моделей (рис. 1,б). Для всего диапазона сжимающие напряжения в сдвиговой модели на 6,4-21,4% превышают аналогичные величины в классической; значительная разница характерна для конструкций сопоставимой жесткости при $\alpha = 0,2-0,6$. Большие значения растягивающих напряжений в сдвиговой модели плит с жестким сцеплением слоев соответствуют конструкциям, близким к однородным, когда $\alpha \rightarrow 0$ или $\alpha \rightarrow 1$, что является следствием более равномерного распределения деформаций по толщине пакета с жестким сцеплением слоев и наличием только в приграничной зоне материала отличных свойств.

Это и выявленный эффект увеличения значений растягивающих напряжений на границе плиты с основанием, как результат влияния сдвиговых деформаций в зоне приложения нагрузки, характерный для однородных и неоднородных конструкций, свидетельствуют о необходимости использования сдвиговой модели для описания напряжен-

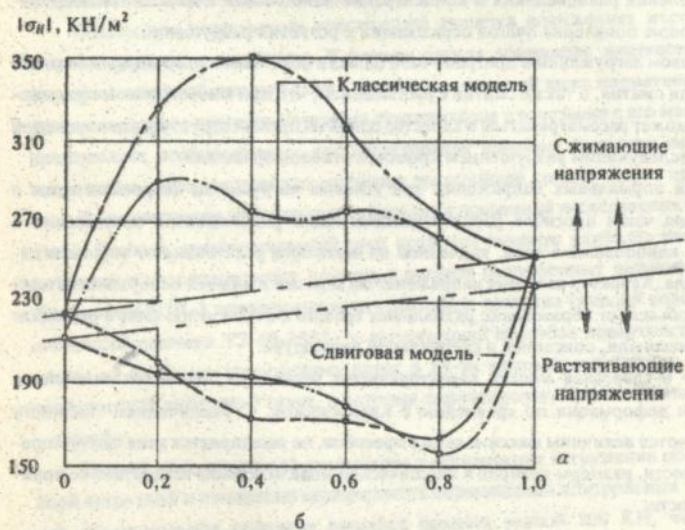


Рис. 1. Влияние соотношения размеров слоев на расчетные величины: а – вертикальных перемещений; б – нормальных напряжений

но-деформированного состояния плит со слоями различной мощности и жесткости.

Для конструкций с разделительной прослойкой использована послойная аппроксимация перемещений с обеспечением взаимности перемещений соответствующих в плане узловых точек. Прослойка, вследствие ее функционального назначения из рассмотрения исключена. Характер развития деформаций и напряжений по толщине отдельного слоя соответствует частным случаям двухслойной конструкции с жестким сцеплением слоев при $\alpha = 0$ или $\alpha = 1$.

Результаты расчетов показали, что выбор расчетной модели должен базироваться на соотношении толщины несущих слоев, так как развитие сдвиговых деформаций в отдельном слое в случае значительного снижения его массивности приводит к увеличению нормальных напряжений в 1,4 раза и разнице в значениях расчетных прогибов до 14,9% по сравнению с классической моделью изгибаемой плиты.

Для оценки особенностей напряженно-деформированного состояния свободно лежащих плит при краевом и угловом нагружениях использованы эпюры и изолинии перемещений и нормальных напряжений. Картины последних позволили установить зоны распределения равновеликих и концентрации наибольших нормальных напряжений, объясняющие появление очагов образования и развития разрушений.

При краевом нагружении в приграничной области возникают зоны неравномерного растяжения или сжатия, а также сжатия с растяжением, что при многократном приложении нагрузки может рассматриваться в качестве одной из причин структурных изменений материала с последующим разрушением кромок и отколов краев плит.

Изолинии нормальных напряжений при угловом нагружении свидетельствуют о радиальном для чаши прогибов распространении части равновеликих напряжений и концентрации наибольших в зоне, удаленной на некоторое расстояние от вершины нагружаемого угла. Характер развития напряжений на верхней и нижней поверхностях плит аналогичен и объясняет образование радиальных трещин и откол углов плит с размером 0,4-1,2 м по диагонали, описанное в специальной литературе.

При $\alpha = 0$ сдвиговая модель характеризуется несколько большими линейными размерами зон деформации по сравнению с классической. С увеличением жесткости сечений снижаются величины максимальных прогибов, но расширяется зона деформирования поверхности, размеры которой в классической модели больше вследствие ее пониженной жесткости.

Максимальные расчетные параметры напряженно-деформированного состояния определили величины переходных коэффициентов. Для растягивающих напряжений в сдвиговой и классической моделях они превысили на 8-10 и 14-16 % нормативные ограничения (краевое нагружение).

Значительная разница в численных и аналитических величинах переходных коэффициентов для вертикальных перемещений потребовала экспериментальной проверки

точности полученных результатов и оценки реальной податливости приграничных участков плит.

В третьей главе описаны экспериментальные исследования двух конструктивно отличающихся аэродромных сооружений - опытного участка покрытия в аэропорту Мирный (Республика Саха) и ИВПП-1 аэропорта Кольцово (г. Екатеринбург, Российская Федерация).

Задачи исследований первого сводились к определению несущей способности плит в рамках научно-методического сопровождения опытно-промышленного строительства тонкослойных покрытий на объектах гражданской авиации. Во втором случае преследовалась цель многосторонней оценки эксплуатационной пригодности сооружения и разработки рекомендаций по ее усилению с привлечением различных феноменологических методов и метода ACN-PCN.

Опытный участок представлен тринадцатью плитами двухслойной конструкции, нижний слой которой - тощий бетон класса прочности В 7,5/100 - имеет толщину 0,30 м, а верхний - цементобетон класса В 4,0/50 - уложен без разделительной прослойки.

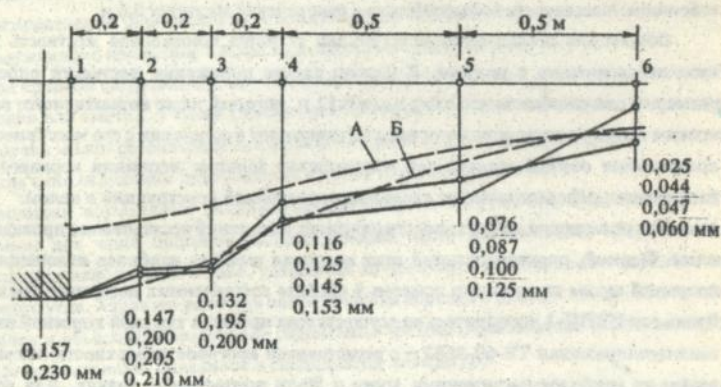
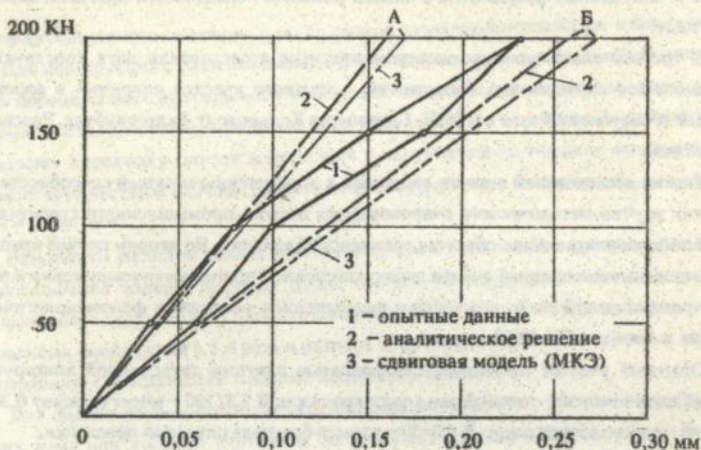
Покрытие ИВПП-1 состоит из бетонных плит толщиной 0,2-0,3 м, усиленных асфальтобетоном. Массивность асфальтобетона в ряде сечений достигает 0,6 м.

Общим для исследуемых конструкций является пониженная жесткость верхнего слоя по сравнению с нижним. В первом случае понижение жесткости определяется размером цементобетонного слоя $t_{\text{звр}} = 0,12$ м, который ниже нормативного; во втором низким модулем упругости материала верхнего слоя в сочетании с его массивностью, что представляет особый интерес для исследования влияния жесткости верхнего слоя на напряженно-деформированное состояние двухслойной конструкции в целом.

Для повышения эффективности натурных испытаний исследования проведены в два этапа. Первый, предварительный этап позволил выявить наиболее изношенные зоны покрытий путем визуального осмотра и анализа составленных дефектовочных планов. Вдоль оси ИВПП-1 дополнительно осуществлена прокатка тяжелой колесной нагрузки - топливозаправщика ТЗ-60-8685 - с регистрацией прогибов поверхности покрытия под одним из наиболее нагруженных колес в 59-ти контрольных точках. Для детальных исследований выбраны 7 точек, в которых зафиксированы значительные - более 2,5 мм - прогибы.

Второй этап испытаний заключался в ступенчатом нагружении покрытий статической нагрузкой и измерении вертикальных перемещений контрольных точек поверхности. Максимальная величина нагрузки принята равной 200 кН, что соответствует воздействию расчетного типа воздушного судна Ил-62 М массой 1350 т и определено расчетом.

Максимальные величины вертикальных перемещений контрольных точек плит опытного участка положены в основу построения диаграмм "нагрузка - прогиб" (рис. 2,а).



6

Рис. 2. Сравнение результатов экспериментальных и теоретических исследований

При центральном нагружении диаграммы имеют изломы, разделяющие кривые на характерные участки различной интенсивности роста прогибов. Первый из них отражает деформации плиты от начала загрузки до момента образования трещины, характеризуется постоянной величиной угла наклона, что соответствует упругой стадии работы расчетных сечений, и для плит опытного участка ограничивается силой 100 кН.

На следующей ступени нагружения интенсивность роста прогибов возрастает в 1,31-1,40 раза, что свидетельствует о снижении жесткости сечения вследствие появления и развития микротрещин.

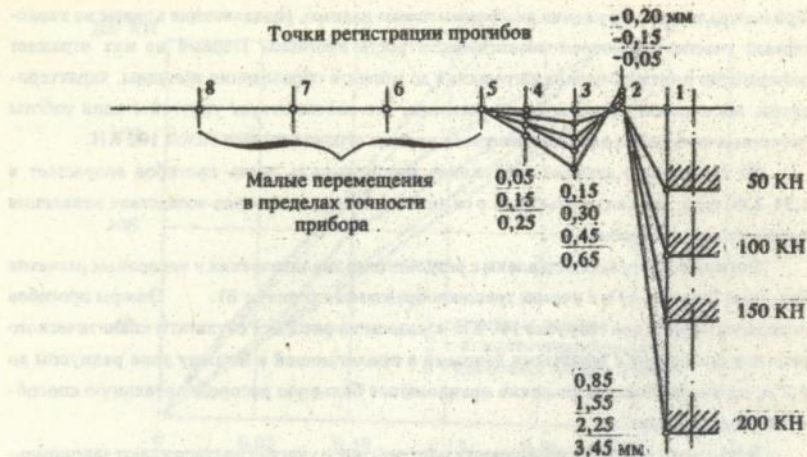
Опытные данные сопоставлены с результатами аналитических и численных расчетов без учета (кривые А) и с учетом трещинообразования (кривые Б). Эпюры прогибов поверхности плит при нагрузке 100 кН показаны на рис.2,б. Результаты аналитического решения совпадают с опытными данными в прилегающей к штампу зоне радиусом до 1,2 м, но аналитическое решение предполагает большую распределительную способность конструкции.

Диаграммы прогибов поверхности плит опытного участка подтверждают закономерности, свойственные жестким покрытиям: при постоянной нагрузке прогибы возрастают в случае ее смещения от центра. При угловом нагружении силой 100 кН максимальный прогиб возрастал в 1,26 раза, при краевом - в 1,16 раза, что существенно меньше данных численных и аналитических расчетов.

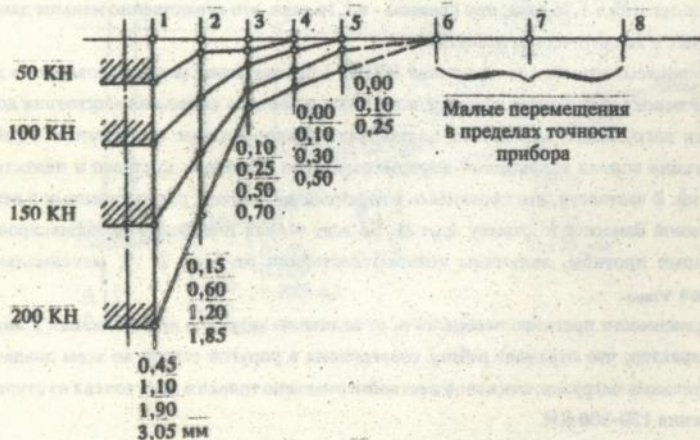
В процессе штамповых испытаний ИВП-1 перемещения регистрировались в двух взаимно перпендикулярных направлениях: вдоль и поперек полосы на расстоянии до 5 м от точки нагружения. Испытания подтвердили предположение о сочетании в работе конструкции картин напряженно-деформированного состояния жесткого и нежесткого покрытий. В частности, это проявилось в перемещениях точек, расположенных в непосредственной близости к штампу (рис.3). Во всех точках под штампом зафиксированы остаточные прогибы, величины которых составили от 8 до 21 % максимального значения w_{max} .

Зависимости прогибов поверхности от величины нагрузки носят близкий к линейному характер, что отражает работу конструкции в упругой стадии во всем диапазоне испытательных нагрузок; снижение жесткости отмечено только в двух точках на ступенях нагружения 150-200 кН.

Использованные методики проведения экспериментальных исследований предусматривают определение величин вертикальных перемещений точек внешней поверхности нагружаемой конструкции. Для конструкции ИВП-1, представленной материалами, модули упругости которых отличаются на 1-2 порядка, суммарная жесткость во многом определяется величиной жесткости нижнего - бетонного слоя. В этом случае при описании деформирования внешней поверхности требуется учитывать локальную сжимаемость материала верхнего слоя в зоне приложения нагрузки,



а



б

Рис. 3. Эпюры прогибов поверхности покрытия
при статическом нагружении: а - в точке 12; б - в точке 51

не предусмотренную используемыми аналитическими зависимостями и численными моделями.

В связи с тем, что математические модели изгибаемых плит описывают деформированное состояние конструкций через деформации поверхности приведения, расчетные величины не всегда обеспечивают сходимость с данными экспериментальных исследований.

Для проверки достоверности получаемых результатов и корректировки привлекаемых к исследованию численных моделей необходимо получить опытные данные — прогибы, деформации — по высоте сечения, особенно в тех случаях, когда плита образована укладкой неоднородных по свойствам материалов.

В четвертой главе отражены вопросы проектирования системы плит двухслойных покрытий с верхним слоем пониженной жесткости с учетом технологической схемы возведения, наличия стыковых соединений и прочности грунтового основания.

Исследовано напряженно-деформированное состояние нескольких вариантов конструкций, верхний слой которых выполнен из высокопрочного бетона проектных классов на растяжение при изгибе В_н 4,0, на сжатие В 30 и имеет размеры 0,08–0,12 м. В качестве материала нижнего слоя использован тощий бетон проектных классов прочности В 7,5/100 и В 10/150, а для описания свойства упругого основания два значения коэффициента постели — 50 и 200 МН/м³.

В системах из трех и девяти плит, образованных нарезкой поперечных и продольных совмещенных в плане деформационных швов, предусматривалось устройство стыковых соединений не только в плитах верхнего, но и нижнего слоев. При численном исследовании стыковые соединения моделировались цилиндрическими шарнирами и учитывались в одном или двух слоях.

При выборе технологической схемы возведения данных конструкций с целью повышения суммарной жесткости расчетных сечений рекомендуется производить укладку верхнего слоя без разделительной прослойки с обеспечением надежного сращивания с нижележащим слоем. Требуемые для обеспечения прочности размеры нижнего слоя должны определяться расчетом с учетом физико-механических характеристик конструктивных материалов слоев и грунтов основания. Для тощих бетонов проектных классов прочности В 7,5/100 и В 10/150 минимальные размеры нижнего слоя составляют 0,19–0,60 м в зависимости от вида заполнителя, технологической схемы возведения покрытий и прочности грунтового основания.

Следует учитывать, что эффективность применения верхнего слоя толщиной 8–12 см снижается при укладке на бетон, изготовленный на гравии и местных строительных материалах, при наличии разделительной прослойки и строительстве на слабых основаниях. В общем случае это приводит к увеличению размеров нижнего слоя.

Если эксплуатационное состояние нижнего (усиливаемого) слоя требует устройства выравнивающей и гидроизолирующей прослойки, необходимо производить проверку прочности нижнего слоя с учетом изменений свойств материала во времени и оценку жесткости каждого из слоев.

Целесообразность применения той или иной расчетной модели изгибаемой плиты следует определять в соответствии с величиной жесткости плитной конструкции и прочности основания. Несмотря на то, что использованные численные модели обладают завышенной распределительной способностью передачи нагрузки на основание, для определения величин реактивного давления и прогиба конструкции в зоне центрального нагружения целесообразно использовать сдвиговую модель, построенную в рамках уточненной теории изгиба.

Учет развития сдвиговых деформаций по толщине пакета слоев увеличивает не только податливость конструкции, но и позволяет включать в рассмотрение дополнительную осадку грунта, которая в конструкциях с $t_{\text{пф}} = 0,4$ м составляет 8,4 % величины расчетного прогиба классической модели на слабом основании ($k_s = 50 \text{ МН/м}^3$) и 15,2 % на прочном основании ($k_s = 200 \text{ МН/м}^3$).

Выбор численной модели для оценки напряженного состояния тонкой двухслойной плиты должен базироваться не только на величине отношения характерных линейных размеров – общей толщине $t_{\text{от}}$ к длине l , но и соотношении размеров несущих слоев в частности. Это обуславливает эффективность применения модели и качество получаемых результатов.

При использовании нормативной методики расчета двухслойных конструкций влияние деформаций поперечного сдвига на величину растягивающих напряжений целесообразно учитывать введением поправочного коэффициента $k^* > 1,0$ к величине расчетного изгибающего момента m_d .

В конструкциях плит с верхним слоем пониженной жесткости введение поправочного коэффициента $k^* > 1,0$ необходимо в случае, когда $\alpha \leq 0,28$, т.е. размеры верхнего слоя составляют не более 28 % общей толщины расчетного сечения с жестким сцеплением слоев.

Если верхний слой является слоем усиления, и предполагается его наращивание без разделительной прослойки с обеспечением жесткого контакта, для назначения размеров и оценки прочности наряду со СНиП 2.05.08–85 "Аэродромы" может быть использована методика определения требуемой толщины однослойного покрытия.

Для конструкций с разделительной прослойкой данная методика приводит к значительному – до 22,5 % – перерасходу материала.

Применяемые схемы численного моделирования работы стыковых соединений в системе плит отразили большую деформативность контурных участков расчетных моделей по сравнению с реальными конструкциями, в которых вертикальные перемещения

при смещении нагрузки к границе плиты с различными условиями на контуре возрастают не более, чем на 30 %. Полученные при численном исследовании переходные коэффициенты для прогибов составили 1,42-2,93 для краевой области и 1,98-7,57 для угловой.

Несмотря на то, что величины переходных коэффициентов для вертикальных перемещений не нормируются, в численных моделях они имеют завышенные значения по сравнению с опытными данными, но не превышают аналитически определенных величин. Следовательно, в качестве расчетных должны использоваться величины соответствующие экспериментальным данным.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. Проектирование бетонных слоев усиления пониженной жесткости является актуальной задачей, решение которой должно способствовать повышению эксплуатационных качества аэродромных сооружений в условиях изменения летного парка, износа искусственных покрытий и острого дефицита битумных вяжущих.

2. На основе анализа существующих методов расчета жестких покрытий установлены границы целесообразности применения расчетных моделей напряженно-деформированного состояния для двухслойных конструкций с верхним слоем пониженной жесткости. Показано, что для конструкций с высоким модулем упругости материалов слоев достаточно классического представления поперечного изгиба плиты. Необходимость учета развития сдвиговых деформаций по толщине сечения возникает при снижении модуля деформации материалов одного из слоев или конструкции в целом.

3. Влияние сдвиговых деформаций увеличивается и при возрастании массивности одного из слоев, что является следствием более равномерного распределения деформаций по толщине и наличия только в приграничной зоне материала с иными свойствами. Сравнительный анализ показал, что влияние сдвига ощутимо проявляется при нагружении краевых и угловых участков «вблизи» зоны приложения нагрузки и быстро затухает по мере удаления анализируемых сечений в центральную область плиты.

4. В конструкциях с жестким сцеплением слоев и верхним слоем пониженной жесткости ($t_{sup} = 0,08-0,12$ м) ощутимое влияние сдвиговых деформаций отмечается в случае, когда размеры верхнего слоя составляют не более 28% общей толщины. В целом выбор численной модели напряженно-деформированного состояния тонких двухслойных конструкций должен базироваться на соотношениях:

- характерных линейных размеров – суммарной толщины к длине $t_{tot}/l \leq 0,1$;
- толщин верхнего слоя и плиты в целом $t_{sup}/t_{tot} \leq 0,28$.

5. Выявленная завышенная распределительная способность расчетных моделей плиты по передаче нагрузки на основании позволяет ограничиться рассмотрением и оценкой параметров напряженно-деформированного состояния только в зоне приложения нагрузки.

6. Величины переходных коэффициентов в случаях углового и краевого нагружений для вертикальных перемещений численных моделей свободно лежащих плит превышают аналитические и экспериментальные данные и свидетельствуют о большей деформативности граничных участков расчетных моделей по сравнению с реальными конструкциями.

7. Экспериментально установлено, что стыкуемые участки плит аэродромных покрытий имеют жесткость существенной конечной величины и не могут быть представлены в расчетных схемах цилиндрическими шарнирами, обеспечивающими взаимность вертикальных перемещений и поворотов из плоскости соответствующих пар контурных точек смежных плит. Это приводит к образованию системы плит, соединенных между собой шарнирами, работа которой не соответствует характеру деформирования аэродромного покрытия, так как работа последнего при статическом нагружении ближе к поведению бесконечной плиты.

8. Экспериментально подтверждено, что жесткие бетонные покрытия, усиленные слоем асфальтобетона, в целом сохраняют характер работы жесткого покрытия. При достижении слоем усиления определенных значительных толщин наблюдаются отдельные признаки деформирования поверхности покрытия по нежесткой схеме, и применение численных моделей изгибаемых плит для конструкций, модуль упругости материала верхнего слоя которых на 1-2 порядка ниже модуля упругости материала нижнего слоя, не целесообразно, так как не учитывается эффект локального поверхностного обжатия верхнего слоя в зоне приложения нагрузки.

9. Сравнение результатов экспериментальных и теоретических исследований позволило установить определенное правило экспериментальной оценки эксплуатационной пригодности аэродромных покрытий и разработки программы проектно-исследовательских работ по их реконструкции. Прокатка тяжелой колесной нагрузки вдоль ИВНП устанавливает некоторый постоянный фон прогибов по всей длине сооружения и выявляет несколько точек с существенными значениями прогибов. Фоновые значения хорошо коррелируются с расчетными, а наличие зон повышенной деформативности свидетельствует о значительных местных изменениях, произошедших в основании и плитах в процессе эксплуатации, и требует детального исследования и дополнительных инженерно-геологических изысканий.

Основные положения диссертационной работы опубликованы в следующих работах:

1. АГЕЕВА Г.Н. Расчет многослойной конструкции жесткого аэродромного покрытия методом конечных элементов // Внедрение систем автоматизации в практику строительных подразделений гражданской авиации: Отчет о НИР (промежут.) / Киевский институт инженеров гражданской авиации. - № 62 к - 87 АП. - К., 1988. - С.123-127.

2. АГЕЕВА Г.Н. Применение численных методов для оценки эксплуатационного износа жестких аэродромных покрытий // Современные проблемы развития наземной базы гражданской авиации: Материалы Всесоюзной науч. конф., Киев, ноябрь, 1988. - М.: ГПИ и НИИГА Аэропроект, 1989. - С.278-282.

3. АГЕЕВА Г.Н., Девятова Э.Р. Численное моделирование эксплуатационного износа жестких аэродромных покрытий // Проектирование, строительство, эксплуатация и механизация аэропортов. - Киев: КИИГА, 1989. - С.93-96.

4. АГЕЕВА Г.Н. Численный анализ напряженно-деформированного состояния тонкослойных покрытий аэродромов // Сопрот.материалов и теория сооруж. - 1990. - Вып.57. - С.86-90.

5. ЛАБОРАТОРНЫЕ исследования по совершенствованию конструктивных элементов тонкослойных покрытий. Научно-методическое сопровождение опытно-промышленного строительства на объектах ГА. Предложения по совершенствованию конструкции тонкослойных покрытий: Отчет о НИР / ГПИ и НИИГА Аэропроект. - М., 1990. - С.80-105.

6. РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ анализ работы тонкослойного покрытия: Отчет о НИР / Государственное научн.-произв.предприятие "Потенциал". - К.,1990. - С.24-67.

7. АГЕЕВА Г.Н. Применение численных методов для расчета тонкослойных аэродромных покрытий // Методы потенциала и конечных элементов в автоматизированных исследованиях инженерных конструкций: Тез.докл. Всесоюз.научн.-техн.конф., Киев, 10-11 декабря 1991. - К.,1991. - С.33.

8. ВЕРЮЖСКИЙ Ю.В., Агеева Г.Н., Горбатов В.С., Ищенко Н.Г., Кривелев Л.И. Экспериментально-теоретическое исследование эксплуатационной пригодности многослойной плиты аэродромного покрытия // Методы потенциала и конечных элементов в автоматизированных исследованиях инженерных конструкций: Тез.докл.Всесоюзн.ш.учн.-техн.конф., 10-11 декабря 1991. - К.,1991. - С.9-10.

9. ИССЛЕДОВАНИЕ несущей способности ИВПИ и разработка рекомендаций по ее усилению: Отчет о НИР (промежут.) / Государственное научн.-произв. предприятие "Потенциал. - К.,1991. - С.7-48.

10. ИССЛЕДОВАНИЕ несущей способности ИВПП и разработка рекомендаций по ее усилению: Отчет о НИР (заклоч.) / Государственное научн.-произв. предприятие "Потенциал". - К.,1991. - С.46- 59, 123-127.

11. РАЗРАБОТКА методов определения напряженно-деформированного состояния, глубины слоя воды и температуры на поверхности эксплуатируемых взлетно-посадочных полос аэродромов ГА: Отчет о НИР (промежут.) / Киевский институт инженеров гражданской авиации. - N 094-ГА92. - К., 1992. - С.8-39, 48-84.

12. МОДЕЛИРОВАНИЕ напряженно-деформированного состояния и фильтрации воды в элементах искусственных аэродромных покрытий и основания: Отчет о НИР (заклоч.) / Киевский ин-т инженеров гражданской авиации. - N 362-ГБ92. - К.,1993. - С.40-54.

Агеева Г.Н.

Подписано в печать 17.05.94. Формат 60x84/16. Бумага типографская.
Офсетная печать. Усл.кр.-отт. 6. Усл.леч.л. 1,16. Уч.-изд.л. 1,25. Тираж 100 экз.
Заказ № 105-1. Цена Изд. № 213/III.

Издательство КМУГА.

252058. Киев-58, проспект Космонавта Комарова, 1.



AB 30.478
AB 30.478