

УКРАИНСКИЙ ТРАНСПОРТНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Мозговой Владимир Васильевич

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ  
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ  
АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ

Специальность 05.22.11 - Автомобильные дороги  
и аэродромы

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Киев - 1996

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00760310 (H)

УКРАИНСКИЙ ТРАНСПОРТНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

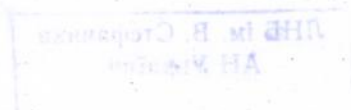
Мозговой Владимир Васильевич

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ  
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ  
АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ

Специальность 05.22.11 - Автомобильные дороги  
и аэродромы

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Киев - 1996



НВ 34.91а

Диссертация является рукописью

Работа выполнена на кафедре дорожно-строительных материалов и химии Украинского транспортного университета.

Научный консультант: доктор технических наук, профессор  
Радовский Борис Самойлович.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Горельшев Николай Васильевич  
доктор технических наук, профессор  
Заворицкий Владимир Иосифович  
доктор технических наук, профессор  
Золотарев Виктор Александрович

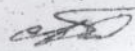
Ведущая организация: Государственный дорожный научно-исследовательский институт (Госдорнии)

Защита состоится "27" июня 1996 года  
в 10 часов на заседании специализированного Ученого Совета  
Д.01.27.03 при Украинском транспортном университете  
по адресу: 252010, Киев-10, ул. Суворова, 1

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Украинского транспортного университета.

Автореферат разослан "26" мая 1996 г.

Ученый секретарь специализированного  
Ученого Совета, к.т.н., доцент



Пальчук А. И.

ЛНБ ім. В. Стефаника  
АН України

## 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

1.1. Актуальность работы. Асфальтобетонные покрытия являются наиболее распространенными на автомобильных дорогах и аэродромах. Однако они часто поражаются поперечными трещинами температурно-усадочного происхождения. Трещины становятся источником дальнейших разрушений и приводят к преждевременному выходу покрытия из строя. С образованием трещин постепенно ухудшается ровность покрытия, снижается безопасность и комфортность движения, увеличиваются транспортные расходы и расходы на ремонт. Заделка трещин является сложным, трудоемким и дорогостоящим процессом, сопровождается значительными материало- и энерговатратами. Причем выполняемые ремонтные мероприятия не всегда достигают желаемого результата по устранению трещин.

В последнее время увеличиваются объемы работ по усилению асфальтобетонными слоями дорожных и аэродромных одежд, основания которых являются трещиновато-блочными (состоят из материалов и грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими и склонных к неизбежному трещинообразованию, или из эксплуатировавшегося асфальтобетона, имеющего температурные трещины). В таких случаях возрастает опасность образования в асфальтобетонных слоях усиления температурных "отраженных" трещин, копирующих раскрывающиеся при понижении температуры трещины или пьвы трещиновато-блочных оснований.

В то же время на практике расчет на трещиностойкость асфальтобетонных покрытий выполняют только с учетом действия транспортных нагрузок, а общепринятый метод расчета асфальтобетонных покрытий на температурную трещиностойкость с учетом колебаний температуры отсутствует. Также отсутствует объективный экспериментальный показатель, позволяющий оценить температурную трещиностойкость при подборе состава асфальтобетона. Нормируют лишь отдельные косвенные показатели свойств асфальтобетона без учета параметров температурного режима и конструкции дорожной одежды, термо-реологических свойств материалов и др. Отмеченное выше свидетельствует о том, что научная база обеспечения температурной трещиностойкости при проектировании, строительстве и эксплуатации асфальтобетонных покрытий разработана недостаточно. Отсутствие научно обоснованного метода оценки температурной трещиностойкости асфальтобетонных покрытий часто на практике приводит к неправильным результатам. Это в значительной мере способствует массовому образованию температурных трещин в асфальтобетонных покрытиях и, как следствие, -

снижению их долговечности.

Таким образом, актуальность работы обусловлена необходимостью решения важной народно-хозяйственной проблемы - повышения долговечности асфальтобетонных покрытий за счет обеспечения их температурной трещиностойкости.

1.2. Целью работы является разработка научных основ оценки температурной трещиностойкости асфальтобетонных покрытий и эффективных методов комплексного ее обеспечения за счет целенаправленного подбора состава асфальтобетона, расчета толщины покрытия требуемой трещиностойкости и назначения рациональной последовательности ремонтных мероприятий.

1.3. Общая методология исследования основана на применении аналитико-экспериментального подхода. Из существующих представлений и результатов изучения особенностей поведения и разрушения асфальтобетонного покрытия при температурном трещинообразовании, а также результатов натурных наблюдений предлагалась физическая модель температурного растрескивания. Для ее исследования и анализа разрабатывались математические модели прогнозирования термо-напряженного и предельного состояний покрытия. По результатам экспериментальных исследований уточнялась область их применимости, а также определялись необходимые эмпирические параметры. На основании математических моделей и экспериментальных данных выполнялся всесторонний анализ исследуемой проблемы и обосновывались практические рекомендации.

1.4. Научная новизна работы заключается в том, что получено новое условие температурной трещиностойкости асфальтобетонных покрытий, а также предложена новая физическая модель образования температурных трещин. Получены новые теоретические решения задач об определении температурных напряжений в покрытии. Впервые установлен количественный и качественный характер циклического термо-напряженного состояния асфальтобетонного покрытия при колебании температуры. Разработаны новые методы и приборы для исследования температурной трещиностойкости асфальтобетона. Получены новые экспериментальные данные о трещиностойкости асфальтобетонного покрытия и о термо-реологических характеристиках асфальтобетонных.

1.5. Достоверность научных выводов и рекомендаций подтверждается: теоретическими разработками, базирующимися на фундаментальных положениях механики деформированного твердого тела с использованием основ теории термоэластоупругости и кинетической теории прочности; сходностью теоретических результатов с лабораторными и натурными данными;

соответствием прогнозируемых и фактических результатов поведения асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог и аэродромов в самых разнообразных климатических условиях при среднегодовых температурах воздуха от минус 5 °С до плюс 15 °С.

1.6. Практическое значение. Разработан метод расчета асфальтобетонных покрытий на температурную трещиностойкость, а также лабораторный показатель температурной трещиностойкости асфальтобетона. Дана количественная оценка и предложены рациональные методы повышения температурной трещиностойкости асфальтобетонных покрытий для различных условий эксплуатации, а также способы прогноза затрат на ремонт температурных трещин в процессе эксплуатации асфальтобетонных покрытий.

1.7. Внедрение. Результаты исследований достаточно широко используются в организациях Государственной корпорации "Укравтодор", Государственного комитета Украины по жилищно-коммунальному хозяйству, Государственного департамента гражданского транспорта Украины, а также в аналогичных организациях России и ряда стран СНГ при проектировании, строительстве и эксплуатации автомобильных дорог и аэродромов с асфальтобетонными покрытиями. Основные результаты работы использованы при разработке нормативно-технических документов, перечень которых приведен в конце автореферата. Применение полученных результатов на практике позволило получить значительную экономию энергетических, материальных и трудовых ресурсов. Положения диссертационной работы используются в Украинском транспортном университете при чтении лекций, в дипломном проектировании, при проведении занятий на факультете последипломной подготовки специалистов, а также при подготовке аспирантов.

1.8. Апробация работы. Материалы диссертации докладывались и получили одобрение на симпозиумах, конференциях, семинарах, совещаниях: "4 Всесоюзная конференция по управлению структурообразованием, структурой и свойствами дорожных бетонов" (Харьков, 1983 г.), "Научно-техническое совещание Ленинградского филиала Союздорнии" (Ленинград, 1986 г.), Всесоюзная конференция "Современные проблемы развития наземной базы гражданской авиации" (Киев, 1988 г.), "Ресурсосберегающие технологии, структура и свойства дорожных бетонов" (Харьков, 1989 г.), 4-ый международный симпозиум "Евробитум" (Мадрид, 1989 г.), Международная конференция "Асфальтобетонные дороги в теории и практике" (Братислава, 1989 г.), на ежегодных семинарах "Ассоциации исследователей асфальтобетона" (Москва, С.-Петербург, 1990-1996 гг.), на научно-технических конференциях ВУЗов: УТУ (КАДИ) (Киев, 1978, 1980, 1984, 1986-1995 гг.); МАДИ (Москва, 1981, 1994-1996 гг.).

1.9. Публикации. По материалам диссертации опубликовано 68 научный трудов. В конце автореферата помещен список основных работ.

1.10. Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, общих выводов, библиографического списка и приложений.

## 2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### 2.1. Состояние вопроса

Проблеме температурного растрескивания асфальтобетонных покрытий посвящены работы: Я. Айзенмана, О.Г. Ебака, С.В. Вельковского, А.М. Богуславского, Ю.М. Васильева, В.А. Веренько, Л.Б. Геанцева, Б.С. Гмыри, Н.В. Горелышева, Л.С. Губача, В.Н. Дихарева, В.А. Золотарева, Н.Н. Иванова, Г.Н. Кирихина, В.Н. Кочонова, Б.И. Ладыгина, К. Монисмита, А.А. Надежко, Ю.Е. Никольского, Б.Г. Печеного, И. Полячека, С.Г. Пономаревой, Б.С. Радовского, Н.М. Располова, Л. Редера, А.В. Руденского, А.О. Салля, Г.К. Сюньи, Л. Франкена, Д. Хилса, В.А. Чернигова, В.М. Шестакова, И.П. Шульгинского, И.К. Яцевича и других.

Проведенные ранее исследования выподнялись в трех основных направлениях: разрабатывались условия предельного состояния покрытия по трещиностойкости на основе определения термо-напряженного состояния; разрабатывались лабораторные показатели трещиностойкости, позволяющие предъявлять требования к асфальтобетону при проектировании его состава и контроле качества; разрабатывались способы повышения температурной трещиностойкости покрытия.

В исследованиях первого направления разрабатывались методы расчета асфальтобетонного покрытия на температурную трещиностойкость. Однако во многих работах асфальтобетон рассматривался как идеально упругий материал. В других работах принимались во внимание вязко-упругие свойства асфальтобетона, но при этом в большинстве случаев исходили из чрезмерно упрощенных реологических и математических моделей. При формулировке условия предельного состояния во многих случаях недостаточно отражался реальный характер разрушения асфальтобетона. В работах, где эта особенность свойств асфальтобетона учитывалась более полно, как правило, использовались упрощенные подходы к оценке термо-напряженного состояния покрытия и не учитывались многие влияющие факторы. Кроме того, не учитывалась кинетика образования температурных трещин во времени и особенности работы покрытия после образования трещин и после ремонта.

В то же время, в области механики деформированного твердого тела, теории прочности и теории разрушения достаточно глубоко разработаны

методы решения задач по определению термо-напряженного и предельного состояний различных конструкций, состоящих из термо-упругих и термо-вязко-упругих материалов (работы Н.Х. Арутюняна, Г.М. Бартенева, В. Воли, Л. Больцмана, Г.А. Ванина, В. Вольтерра, Э.И. Григolloка, А.Н. Гузя, А.А. Ильюшина, А.А. Каминского, В.Е. Канарчука, В.Г. Карнаухова, М.А. Колтунова, А.А. Лебедева, Л.Е. Мальцева, В.В. Москвитина, Г.С. Писаренка, В.Е. Победри, Ю.Н. Работнова, А.Р. Ржаницина, Г.Н. Третьяченко, В.Т. Троценка, С.Э. Уманского, Л.П. Хорошуна, Р.А. Шепери и других ученых, а также их учеников и последователей). Также решены многие важные научные и практические проблемы по определению прочности, долговечности и надежности при проектировании транспортных конструкций и сооружений в работах Ю.Н. Айвазова, В.К. Анестина, О.Т. Ватракова, Е.Н. Барина, Г.Б. Безбородовой, И.А. Белинского, А.А. Белятинского, А.И. Бидеута, В.И. Братчуна, Н.В. Быстрова, А.П. Васильева, В.К. Вильгельма, А.П. Виноградова, С.П. Войтенко, Г.И. Глушкова, Л.И. Горецкого, И.М. Грушко, А.С. Дегтяря, Н.Н. Дмитриева, И.Е. Евгеньева, В.И. Заворицкого, В.В. Зогули, И.А. Золотаря, В.Н. Иванова, В.Д. Казарновского, А.Б. Каплуна, Я.Н. Ковалева, М.С. Коганзона, В.И. Козлова, В.В. Кострицкого, А.И. Лантуха-Лященко, И.И. Леоновича, С.И. Миховича, В.Г. Пискунова, А.К. Приварникова, В.С. Радовского, А.О. Рассказова, В.Н. Ряпухина, В.М. Сиденко, В.С. Сипетова, П.И. Теляева, А.М. Тимофеевой, Б.Е. Тригопи, Ю.М. Яковлева, В.Н. Яромко и других исследователей. Однако, имеющиеся решения в полной мере не могут быть использованы для построения на единой методологической основе метода расчета асфальтобетонного покрытия на температурную трещиностойкость с учетом основных особенностей его эксплуатации.

В работах второго направления рассматривались разнообразные показатели температурной трещиностойкости асфальтобетона (пределы прочности на сжатие или растяжение при определенных температурах и режимах нагружения, предельная относительная деформация, коэффициент вязкости, условная температура хрупкости, критическая температура трещинообразования, энергия разрушений и др.). Получена ценная информация о свойствах асфальтобетона при низких температурах. Однако исследования, выполненные в этом направлении, в большинстве случаев не сопровождались анализом реального термонапряженного состояния покрытия, необходимым обоснованием значений показателей температурной трещиностойкости асфальтобетона в зависимости от условий его работы в конструкции.

В работах третьего направления предложены способы повышения температурной трещиностойкости, которые можно разделить на две основные группы: мероприятия, связанные с регулированием свойств асфальтобетона

(повышение деформативности, прочности и др.), и мероприятия, направленные на рациональное конструирование одежд с целью улучшения условий работы асфальтобетонного покрытия при изменении температуры. Однако, в большинстве случаев, как и работы первого направления, эти предложения не опирались на анализ напряженно-деформированного состояния слоя. В итоге многие из них не дали ощутимого эффекта либо мероприятия, полезные в одних условиях, не привели к положительным результатам в других.

Обзор работ свидетельствует о необходимости комплексного решения вопроса температурной трещиностойкости покрытия с учетом: реологических свойств, зависящих от температуры; временного характера разрушения; цикличности изменения температуры при годовых и суточных колебаниях; типа основания и характера его связи с покрытием; кинетики образования поперечных трещин; видов ремонта и конструкции усиления и др.

## 2.2. Исследование особенностей образования температурных трещин в асфальтобетонном покрытии

Исследования выполнялись с целью установления основных факторов и причин, приводящих к температурному растрескиванию покрытия и для определения характера изменения термо-реологических свойств асфальтобетона, а также других сведений, необходимых для разработки исходных предпосылок к теоретическим исследованиям температурной трещиностойкости асфальтобетонных покрытий. Температурное растрескивание исследовалось при наблюдении на асфальтобетонных участках и образцах покрытия как в натуральных, так и в лабораторных условиях.

В процессе натуральных исследований изучалась кинетика образования трещин, осуществлялся визуальный осмотр характера трещин и разрушений, измерялось расстояние между трещинами, размеры разрушений и деформаций, температура покрытия, производилось фотографирование, отбирались пробы асфальтобетона для лабораторных испытаний, производились dilatометрические измерения. Обследование осуществлялось на различных характерных участках асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог и аэродромов в различных климатических условиях с различным характером движения транспортных средств.

Анализ натуральных наблюдений и результатов исследований других авторов позволяют сделать выводы о том, что до образования температурных трещин продольные размеры асфальтобетонного покрытия при охлаждении почти не изменяются, а поперечные размеры могут частично изменяться. Такое поведение покрытия обусловлено влиянием сил сцепления и трения по основанию при значительной его длине (несколько километров) и срав-

нительно небольшой шириной (несколько метров или десятков метров). По этой причине в покрытии при охлаждении появляются растягивающие температурные напряжения, величина которых в продольном направлении значительно превышает горизонтальные нормальные напряжения, действующие в поперечном направлении. Это подтверждается образованием в покрытии, главным образом, поперечных частых трещин, вызванных его циклическими охлаждениями при годовых и суточных колебаниях температуры.

Результаты натуральных наблюдений за изменением во времени расстояний между трещинами показано на рис.1. Установлено, что первые трещины в покрытии, расположенном на дискретном основании (щебень и др.), как правило, появляются со средним шагом 30-60 м. Температурное деформирование образовавшихся блоков покрытия является также несвободным из-за связи с основанием. В результате между предыдущими трещинами возникают новые, в процессе дальнейшей эксплуатации шаг между ними уменьшается и может составлять 1-3 м. Такое обстоятельство подтверждает известный вывод о доминирующем влиянии температурных растягивающих напряжений вдоль оси покрытия и позволяет предположить о термо-усталостном кинетическом характере разрушения асфальтобетона при образовании температурных трещин.

Установлено и подтверждено, что аналогично, но более интенсивно, происходит температурное растрескивание асфальтобетонного покрытия на блочном основании (рис.1) из-за сокращения размеров его блоков при охлаждении. В первые 1-3 года в покрытии копируются 30-60 % трещин или швов основания.

Также наблюдения показали, что температурные трещины в асфальтобетонном покрытии, как правило, появляются значительно раньше (через 1-8 лет), чем трещины от проездов транспорта, на воздействие которого покрытия рассчитываются с перспективой 18-20 лет.

Полученные результаты натурального обследования опровергают распространённое мнение о том, что температурные трещины, особенно возникающие в покрытии на прочных основаниях, не приводят к заметному ухудшению эксплуатационного состояния дорог. Наблюдения показывают, что в большинстве случаев появление поперечных трещин сопровождается разрушением как покрытия, так и всей дорожной или аэродромной конструкции в зоне влияния трещины. Над трещиной прогиб покрытия от нагрузки в 1,5-3 раза больше прогиба покрытия без трещины. Трещины являются источником появления других прогрессирующих во времени видов разрушения (выкрашивание, ям, выбоин, просадок, колеяности и др.).

Установлено, что степень и интенсивность растрескивания асфальто-

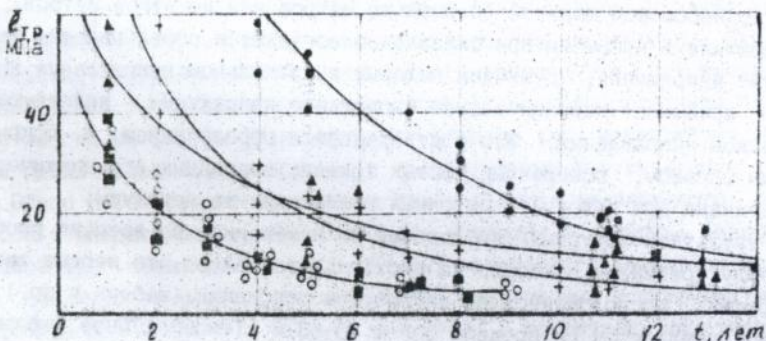


Рис. 1. Изменение во времени среднего расстояния между температурными трещинами: • - экспериментальные точки для покрытий толщиной 8-10 см на черном щебне толщиной 6-9 см, устроенном по основанию из щебня; ■ - то же по основанию из цементобетона марок В7б7 2,0-В7б7 2,8; + - для покрытия толщиной 5-7 см на основании из щебня; ▲ - то же после термопрофилирования потресканного покрытия; ○ - для покрытия толщиной 4-6 см, устроенного по старому покрытию с трещинами.

бетонного покрытия зависит от многих факторов: состава асфальтобетона, конструкции дорожной одежды, технологии производства работ, климатических условий, транспортных нагрузок. Так, при наблюдении в течение 20 лет на одной и той же дороге в Киевской области получены данные о более раннем и интенсивном образовании поперечных трещин в асфальтобетонном покрытии на цементобетонном основании по сравнению с основанием из асфальтобетона или щебня. Оказалось, что количество поперечных трещин в асфальтобетонном покрытии над швами цементобетонного основания уменьшается с уменьшением марки бетона. Полученные данные свидетельствуют, что устройство цементобетонного основания в прохладный период дает возможность уменьшить количество поперечных трещин, появившихся в устраиваемом поверх него асфальтобетонном покрытии над швами основания на 7-ой год службы, примерно в 2 раза (по сравнению с его укладкой в жаркий период), а через 12-14 лет количество таких трещин становится одинаковым.

Наблюдения в течение 18 лет асфальтобетонного покрытия мостовых переходов в г. Киеве и г. Мурманске свидетельствуют о существенном влиянии состава асфальтобетона на его трещиностойкость. В частности, модификация битума полимерной добавкой способствует повышению трещинос-

тойкости.

Обследование аэродромных асфальтобетонных покрытий в гг. Тюмени, Нижневартовске, Иваново и Николаеве свидетельствует о необходимости соблюдения определенных соотношений между толщинами покрытия и блочного основания с учетом свойств материалов и природных условий.

Лабораторные испытания проводились с целью более детального исследования особенностей образования температурных трещин и характера термо-напряженного состояния асфальтобетонного покрытия и термо-реологического поведения асфальтобетона.

Испытания на температурную трещиностойкость включались в моделировании условий работы покрытия при понижении температуры путем поддержания постоянной длины образца или несвободного его деформирования по схеме, впервые предложенной Н.М. Располовым и в дальнейшем развитой в работах Г.К. Сюньи, Б.Г. Печеного, К. Монисмита, Л. Франкена и других. Для испытаний применялось специально сконструированное устройство (рис. 2), позволяющее создавать различные режимы изменения температуры и регистрировать температуру образца, напряжения, возникающие в нем и его деформацию.

Полученные экспериментальные данные подтверждают известный характер изменения во времени температурных напряжений при понижении температуры с постоянной скоростью (рис. 3.а). Такой характер изменения температурных напряжений свидетельствует о проявлении асфальтобетоном реологических свойств даже при низких температурах. Термо-реологическая природа асфальтобетона проявляется также и при гармоническом изменении температуры (рис. 3.б), где имеет место подобная картина в период охлаждения, а также наблюдается несимметричное изменение температурных напряжений при симметричном изменении во времени температуры.

На рис. 4 показаны характерные результаты испытаний на температурную трещиностойкость асфальтобетона при различной скорости охлаждения  $K$ , подтверждающие известные закономерности изменения параметров трещинообразования (растягивающих напряжений в момент разрыва  $\sigma_{тр}$ , времени до разрушения  $t_{тр}$  и температуры в этот момент  $T_{тр}$ ). Анализ испытанных образцов показал, что в сечении, по которому происходил термо-усадочный разрыв, наблюдается наряду с когезионными разрывами вяжущего, обычными для силового разрыва, также и адгезионные разрывы в виде отделения битумной пленки от поверхности зерен (в поле зрения микроскопа - до 50% зерен, не покрытых битумом). Эти результаты объясняются проявлением внутривязанных температурных напряжений, вызванных разностью коэффициентов температурного деформирования битума и камен-

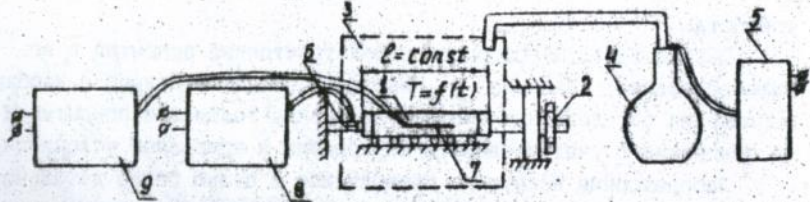


Рис. 2. Схема устройства для испытания на температурную трещиностойкость: 1 - образец; 2 - штурвал для регулирования постоянной длины образца; 3 - термокамера; 4 - сосуд Дьюара с жидким азотом; 5 - устройство, задающее режим подачи жидкого азота; 6 - термоэлектрический датчик; 7 - датчик деформации; 8 - устройство для регистрации усилий; 9 - устройство для контроля и регистрации деформации.

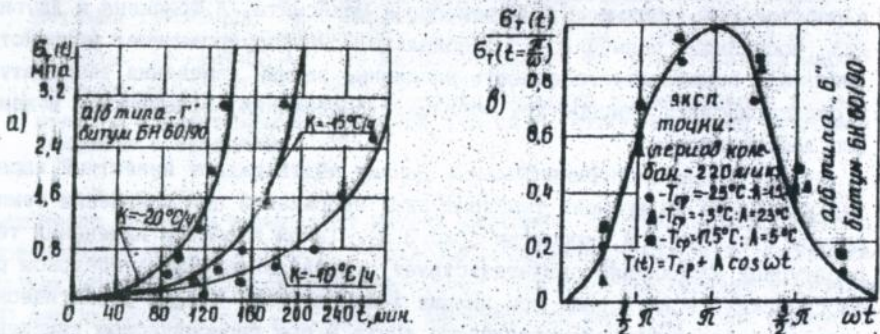


Рис. 3. Температурные напряжения: а - при линейном изменении температуры во времени; б - при гармоническом.

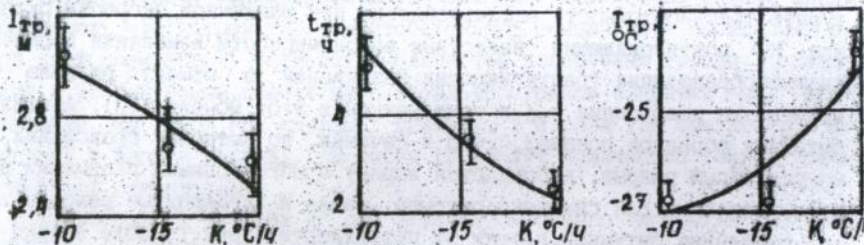


Рис. 4. Изменение параметров трещинообразования асфальтобетона типа "Г" на битуме БН 60/90 в зависимости от скорости охлаждения.

ного наполнителя асфальтобетона. Данный вывод оптических наблюдений подтверждается результатами других опытов (рис. 5.б и рис. 7.б).

Из проведенных испытаний на температурную трещиностойкость при циклическом охлаждении следует, что температурные напряжения, возникающие в каждом цикле охлаждения до температуры, не достигающей критической и отличающейся от нее на 20-40 %, приводят к постепенному накоплению разорванных связей в асфальтобетоне и способствуют более быстрому температурному разрыву образцов в завершающем цикле охлаждения. Этот факт свидетельствует о термо-усталостном накоплении повреждений в асфальтобетоне при колебании температуры и подтверждает кинетическую природу разрушения при образовании температурных трещин в покрытии, согласуясь с выводами натуральных исследований.

Характер термо-реологического поведения асфальтобетона исследовался при изучении его деформативных и прочностных свойств, влияющих на температурную трещиностойкость покрытия. Исследования проводились с помощью специально разработанных методов испытаний, приборов и устройств в зависимости от изменения температуры, длительности действия напряжения, деформации, скорости их изменения и других термо-реологических параметров. Экспериментальные исследования проводили на сухих либо частично или полностью водонасыщенных образцах, приготовленных в лаборатории либо выпиленных или выбуренных непосредственно из покрытия. Образцы испытывали в условиях растяжения, изгиба, раскола, сжатия. Опыты выполняли на кратковременную и длительную ползучесть, релаксацию напряжений, статическую и динамическую усталость, а также определяли прочность как в жестком, так и в мягком режимах испытаний. Проводились дилатометрические измерения и акустические испытания с помощью ультразвука. Отдельные партии образцов перед испытанием предварительно подвергались водо-морозным циклам, ультрафиолетовому облучению и другим видам природно-климатического воздействия.

Основные результаты показаны на рис. 5-7. Они во многом согласуются с известными данными, а также раскрывают новые экспериментальные факты. Из полученных данных следует, что модуль упругости асфальтобетона существенно зависит как от температуры  $T$ , так и от длительности действия нагрузки  $t$  (рис. 5.а). В диапазоне реальных значений изменения  $T$  и  $t$  значение модуля упругости может изменяться на несколько порядков. Прочность на растяжение изменяется всего в пределах одного порядка. Прочность на растяжение имеет характерный максимум в зависимости от температуры (рис. 5.б), с увеличением скорости нагружения или деформирования он смещается в сторону положительных температур. Основ-

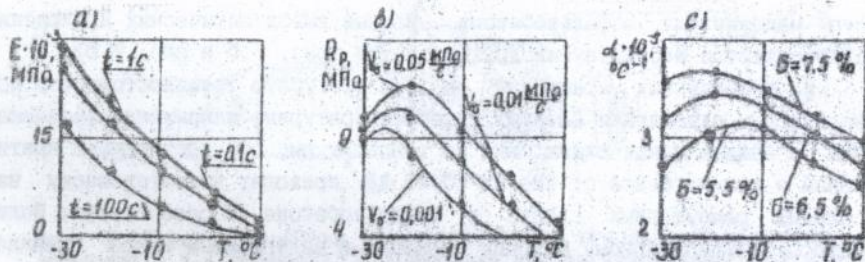


Рис. 5. Зависимость от температуры ( $T$ ) для асфальтобетона типа "Р": а - модуля упругости ( $E$ ) при разных длительностях действия нагрузки  $t$ ; б - прочности на растяжение ( $R_p$ ) при разных скоростях нагружения ( $V_p$ ); в - коэффициента линейного температурного деформирования ( $\alpha$ ) при разном содержании битума ( $B$ ).

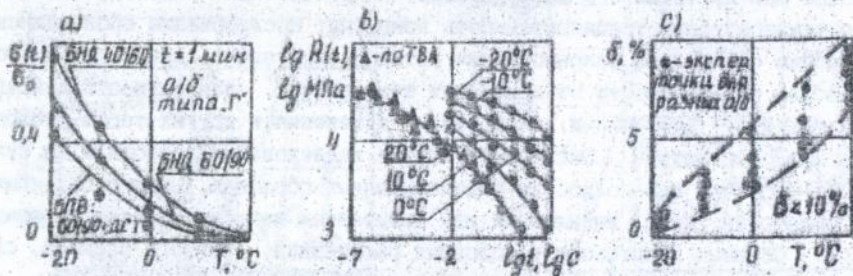


Рис. 6. Зависимость изменения для асфальтобетона: а - показателя релаксации напряжения ( $\theta(t=1 \text{ мин})/\theta_0$ ) от температуры; б - функции релаксации  $R(t)$  от длительности действия нагрузки; в - показателя нелинейности вязко-упругих свойств ( $\delta$ ) от температуры.



Рис. 7. Зависимость изменения для асфальтобетона: а - времени до разрыва ( $t_p$ ) от приложенного растягивающего напряжения ( $\epsilon_p$ ); б - прочности на растяжение при изгибе ( $R_p$ ) и предельного прогиба ( $f_{пр}$ ) от температуры предварительного термостатирования ( $T_T$ ); в - прочности на растяжение от количества циклов замораживания-оттаивания ( $N_{мрз}$ ).

ной предполагаемой причиной наличия максимума прочности на растяжение асфальтобетона и ее дальнейшего уменьшения с понижением температуры является увеличение внутрискруктурных напряжений, возникающих из-за отличия коэффициентов линейного температурного деформирования битума и цементного материала. Дополнительным подтверждением этому является падение прочности с уменьшением температуры предварительного термостатирования образцов (рис. 7. б).

Типичное изменение коэффициента линейного температурного деформирования от температуры показано на рис. 5. с.

Проведенные эксперименты свидетельствуют о существенной релаксации напряжений в асфальтобетоне даже при низких температурах (рис. 6. а). Так, при  $T = -20^{\circ}\text{C}$  напряжения за одну минуту могут отрелаксировать до 50 % в зависимости от вида вяжущего.

При исследовании термо-вязко-упругих свойств асфальтобетона разрабатывался метод получения функции релаксации в широком интервале температур и длительностей действия нагрузок. Установлено, что в диапазоне низких температур ( $T < 20^{\circ}\text{C}$ ), характерных для ощутимого термо-напряженного состояния, асфальтобетон проявляет свойства линейного термо-реологически простого тела. К нему применим принцип температурно-временной аналогии (рис. 6. б), а также характерна, главным образом, линейная связь между напряжениями и деформациями (рис. 6. с).

Подтверждено, что для асфальтобетона типичным является временной характер разрушения (рис. 7. а). Длительность разрушения в опытах на статическую усталость зависит от уровня растягивающих напряжений и температуры и может изменяться на несколько порядков.

Полученные результаты подтверждают известные данные об уменьшении прочности на растяжение асфальтобетона с увеличением количества циклов замораживания-оттаивания (рис. 7. с).

На основании полученных результатов натурных и лабораторных экспериментальных исследований и анализа литературных данных разрабатывались исходные предпосылки для теоретических исследований.

Выделены следующие основные причины, влияющие и способствующие образованию температурных трещин в покрытиях:

- растягивающие горизонтальные температурные напряжения в покрытии, возникающие при несвободном температурном его деформировании из-за трения и сцепления по основанию;
- то же, возникающие над швами или трещинами блочного основания при горизонтальном температурном деформировании его блоков;
- внутрискруктурные растягивающие температурные напряжения, воз-

никающие в асфальтобетоне из-за разности коэффициентов линейного температурного деформирования вяжущего и минеральных компонентов;

- расклинивающее действие воды и льда в порах покрытия;
- усадка от "старения" асфальтобетона;
- растягивающие горизонтальные напряжения, возникающие при изгибе от действия транспортных нагрузок;
- поперечные касательные напряжения в зоне швов и трещин блочного основания при действии транспортных нагрузок.

Констатируется, что образованию температурных трещин в покрытии предшествует длительный процесс изменения термо-напряженного состояния при годовых и суточных колебаниях температуры. Асфальтобетон в широком спектре воздействующих температур и длительностей действия напряжений и деформаций, а также скоростей их изменения проявляет свойства линейного термо-реологически простого тела. В нем развиваются процессы ползучести и релаксации во всем диапазоне температур, при которых эксплуатируется покрытие. Предельное состояние при образовании температурных трещин в покрытии наступает в результате постепенного накопления повреждений структуры асфальтобетона из-за статической и динамической усталости материала, свойственных кинетическому характеру разрушения. Предполагается, что асфальтобетон может рассматриваться в виде квази-однородного и изотропного материала с интегральными усредненными макроколичественными свойствами.

Предлагается следующая физическая модель образования температурных трещин: температурные микротрещины являются следствием разрыва сплошности асфальтобетона в результате постепенного или быстрого накопления необратимой поврежденности его структуры по всему сечению покрытия; накопление поврежденности структуры асфальтобетона происходит из-за разрыва связей в материале вследствие действия растягивающих напряжений различного происхождения; растягивающие напряжения возникают в результате охлаждения при колебании температуры, одновременно вызывающего изменение термо-реологических свойств асфальтобетона.

### 2.3. Теоретическое исследование термо-напряженного и предельного состояний асфальтобетонного покрытия при колебании температуры

Основными задачами теоретических исследований являются:

- установление зависимостей, позволяющих описывать режим изменения температурного поля асфальтобетонного покрытия и других конструктивных слоев дорожной или аэродромной одежды;

- прогнозирование значений температурных напряжений, возникающих в асфальтобетонном покрытии при колебании температуры;

- прогнозирование температурного растрескивания покрытия с учетом: характерного изменения температуры; особенностей технологии устройства слоев и конструкции дорожной или аэродромной одежды; термо-реологических свойств асфальтобетона; условий эксплуатации покрытия.

При изучении температурного режима учитывалась слоистость одежд (рис.8) и режим изменения температуры на поверхности при суточных и годовых колебаниях. Использовались решения теории теплопроводности, с помощью которых получались аналитические зависимости, описывающие изменение температуры каждого слоя  $T = f(t, z)$ . На основании такого подхода с учетом колебаний температуры поверхности покрытия с соответствующими амплитудами, периодами и средней температурой получались аналитические зависимости для среднеинтегральных по толщине параметров температурного режима слоев и элементарных подслоев каждого слоя [9, 13, 15]. Для определения амплитуды колебаний температуры поверхности покрытия использовалась известная связь ее величины с параметрами изменения температуры воздуха, скоростью ветра, солнечной радиацией и теплофизическими характеристиками поверхности.

Для прогнозирования термо-усадочных напряжений рассматривались различные расчетные схемы (рис.10), отражающие работу покрытия до и после образования температурных трещин, а также до и после его ремонта. В расчетных схемах рассматривались основания двух видов: дискретное или сплошное, которое не вызывает дополнительного деформирования покрытия (щебень, черный щебень, асфальтобетон и др.), и трещиноватоблочное, которое может вызывать горизонтальное деформирование покрытия за счет сцепления с основанием при циклическом температурном или необратимом длительном усадочном деформировании (цементобетон, цементогрунт с температурными швами и трещинами, старое асфальтобетонное покрытие с трещинами и др.).

При определении термо-усадочных напряжений в асфальтобетонном покрытии использовались методы теории термовязкоупругости. Исходные соотношения связи между напряжением, деформацией, временем и температурой применялись в виде уравнений наследственного типа Больцмана-Вольтерра

$$\sigma_T(t) = \int_0^t R(\xi(t) - \xi(\tau)) d\varepsilon_T(\tau), \quad \varepsilon_T(t) = \int_0^t (R(\xi(t) - \xi(\tau)) d\varepsilon(\tau), \quad (1)$$

$$\text{здесь } \xi(t) = \int_0^t [a_T(T(t), Q)]^{-1} dt, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_T(\tau) = \varepsilon_{T1}(\tau) + \varepsilon_{T2}(\tau) + \varepsilon_{y1}(\tau) + \varepsilon_{y2}(\tau)$  - относительная деформация;  $R$  - функция релаксации;  $t$  - момент времени, для которого определя

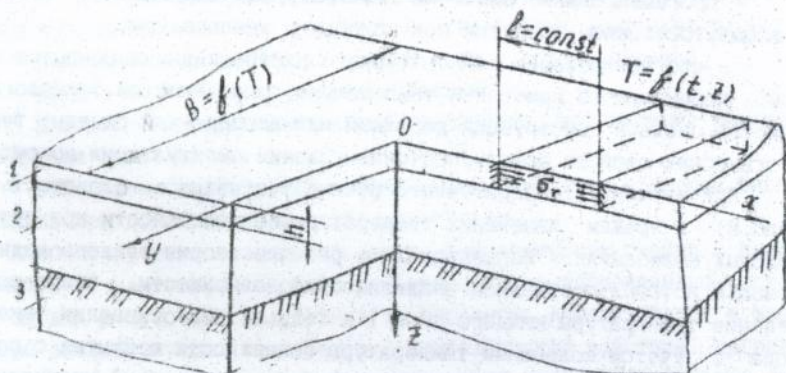


Рис. 8. Схема асфальтобетонного покрытия при изменении температуры: 1 - покрытие; 2 - основание; 3 - грунт земляного полотна.

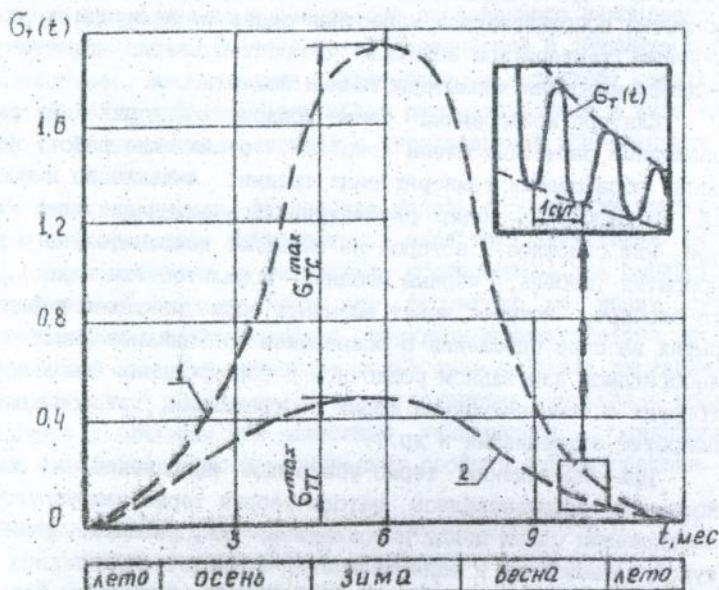


Рис. 9. Изменение во времени напряжений от суточных и годовых колебаний температуры:  $T_{ср} = 0^\circ\text{C}$ ;  $A_c = 6$  град;  $A_r = 20$  град; — — — линия изменения напряжений; 1 - верхняя и 2 - нижняя границы суточных колебаний температурных напряжений. Напряжения вычислены для асфальтобетона типа "В" в ситуации 60/90 с параметрами функции релаксации:  $Q = 20^\circ\text{C}$ ;  $p = 0,3$  град<sup>-1</sup> и с параметрами функции деформации в виде модифицированного степенного закона:  $B = 32 \cdot 10^{-4}$  МПа,  $H = 28$  МПа,  $m = 0,393$ ,  $\tau = 1,01 \cdot 10^{-4}$  с.

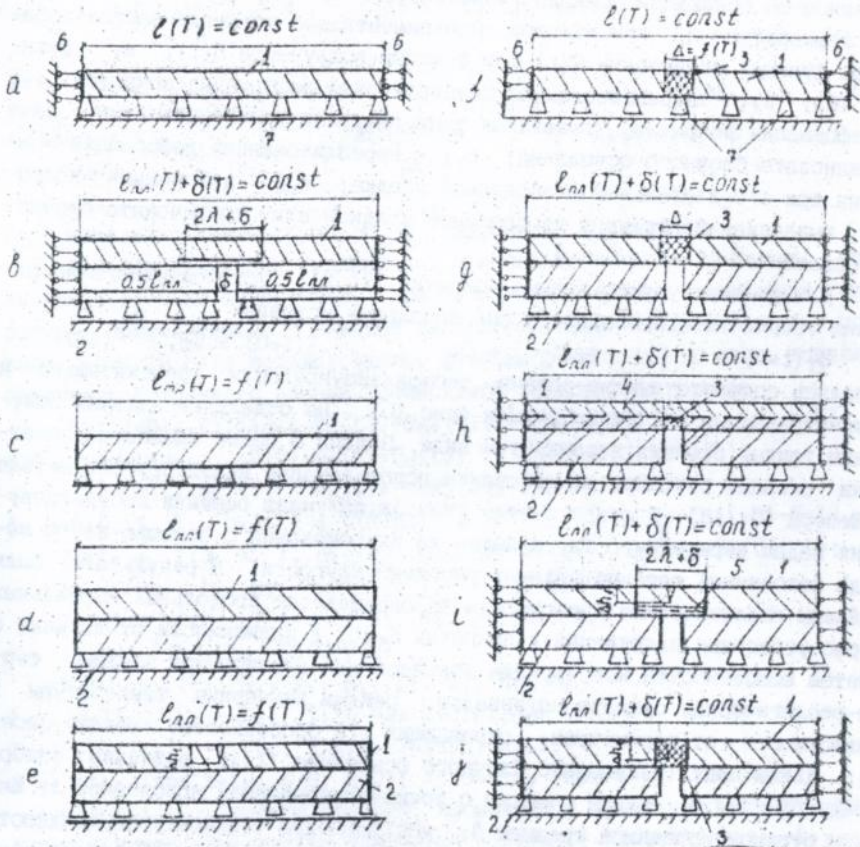


Рис. 10. Основные варианты расчетных схем при определении температурных напряжений в асфальтобетонном покрытии: а, б - после начала эксплуатации до трещинообразования; с, д - после образования температурных трещин либо с температурными швами; ф-ж - после выполнения ремонта трещин разными способами; е, и, j - в процессе образования трещин; 1 - асфальтобетонное покрытие; 2 - трещиновато-блочное основание; 3 - материал ремонта трещины; 4 - асфальтобетонное покрытие с восстановленной монолитностью; 5 - трещино-прерывающая прослойка; 6 - схема связи со смежными участками покрытия и блочного основания; 7 - то же, с подстилающими слоями конструкции одежды, обеспечивающие горизонтальное перемещение через трение; l - произвольная длина покрытия,  $l_{тр}$  - расстояние между температурными трещинами;  $l_{пл}$  - длина плит блочного основания;  $\delta$  - зазор между плитами основания;  $\Delta$  - ширина отремонтированной трещины;  $\lambda$  - длина участка от края плиты блочного основания с использованием трещино-прерывающей прослойки.

ется напряжение;  $\tau$  - момент времени, предшествующий  $t$ ;  $\xi$  - время, приведенное на основании принципа температурно-временной аналогии (ТВА) к той температуре  $Q$ , при которой экспериментально устанавливаются параметры функции релаксации  $R(t)$  или функции ползучести  $P(t)$ ;  $a_T$  - функция ТВА;  $\epsilon_{T1}$  - нереализованная температурная деформация покрытия;  $\epsilon_{T2}$  - деформация покрытия, вызванная температурным изменением длины плит трещиновато-блочного основания;  $\epsilon_{y1}$  - нереализованная деформация покрытия при его длительной необратимой усадке;  $\epsilon_{y2}$  - деформация покрытия, вызванная длительной необратимой усадкой плит трещиновато-блочного основания.

Для температурного режима покрытия  $T(t, z)$ , установленного по решению теории теплопроводности при начальных условиях

$$\theta_T(t=0) = 0; \quad \epsilon_T(t=0) = 0; \quad T(t=0) = T_0, \quad (3)$$

решались соответствующие задачи термовязкоупругости применительно к рассматриваемым расчетным схемам (рис. 10). По отдельным задачам получены точные решения в замкнутом виде. Задачи с более сложными расчетными схемами решались на основании использования квазиупругого метода Р. Шепери [9, 15]. В связи с этим сначала получали решения соответствующих задач термоупругости, а затем на их основании с помощью этого метода находились решения задач термовязкоупругости. В результате были найдены аналитические зависимости по определению продольных нормальных термо-усадочных напряжений в покрытии  $\theta_T(t)$  в зависимости от времени с учетом особенностей конструкции дорожной или аэродромной одежды, термо-реологических свойств материалов, режима изменения температуры в зависимости от параметров, отражающих эти особенности: толщин слоев  $h_1$ ; длины плит трещиновато-блочного основания  $l_{пл}$ ; величины зазора между плитами  $\delta$ ; длины участка с трещинопрерывающей прослойкой  $\lambda$ ; ширины отремонтированной трещины  $\Delta$ ; коэффициента температуропроводности слоев  $a_1$ ; коэффициента линейного температурного деформирования материалов  $\alpha_1(T)$ ; коэффициента линейной усадки  $\alpha_{y1}(t)$ ; коэффициента трения между трещиновато-блочным основанием и трещино-прерывающей прослойкой  $f_1$ ; то же между таким же основанием и подстилающим слоем  $f_2$ ; функции релаксации материалов  $R_1(t, T)$ ; функции ТВА; температуры устройства температурных швов в основании  $T_{2y}$ ; скорости охлаждения слоев  $K_1$ ; градиента температуры за характерный период времени и других [4-6, 9-16].

Так, решение для температурных напряжений при охлаждении со скоростью  $K$  асфальтобетонного покрытия на основании первого вида применительно к базовой расчетной схеме (рис. 10. а) при использовании функции релаксации в виде суммы экспонент с параметрами  $N$ ,  $a_1$  и  $b_1$  имеет сле-

дующий вид:

$$\sigma_T(t) = -\alpha n K t - \frac{\alpha}{p} \sum_{i=1}^n a_i e^{-u_i(t)} \left[ E_i(u_i(t)) - E_i(u_i(0)) \right], \text{ где (4)}$$

$$u_i(t) = \frac{1}{\rho K b_i} e^{-p(T_0 - Q + Kt)}, \quad u_i(0) = \frac{1}{\rho K b_i} e^{-p(T_0 - Q)}, \quad E_i(x) = \int_{x}^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy;$$

$T_0$  - начальная температура;  $p$ ,  $Q$  - параметры функции ГВА.

Для температурных напряжений в асфальтобетонном покрытии, сцепленном с блочным основанием, при суточных и годовых колебаниях температуры применительно к базовой расчетной схеме со вторым видом основания (рис.10,б) с использованием функции релаксации в виде модифицированного степенного закона установлена зависимость в виде

$$\sigma_T(t) = \sigma_{ar}(t) [1 + \phi_r \Phi_r D_r(t)] + \sigma_{ac}(t) [1 + \phi_c \Phi_c D_c(t)], \quad (5)$$

где обозначено:  $D(t) = D_B(t) + D_d(t)$ ;  $D_B(t) = \sigma_B(t) / \sigma_A(t)$ ;

$$D_d(t) = \delta_d(t) / \delta_A(t); \quad \delta_A(t) = -\alpha_1 K_1 [H_1 x + (B_1 - H_1) I_1(x)];$$

$$\delta_d = f(\delta, \lambda, l, h_1); \quad \phi = f(\Delta T_2); \quad \Phi = f(P); \quad \Delta T_2 = T_{2y} - T_2(t=0) - K_2 t;$$

$$\delta_B(t) = f(\delta, \lambda, l, h_1, h_2, \alpha_2, K_2, I_{11}(U), E_1(U), E_2(U), t);$$

$$P = f(h_1, h_2, \alpha_2, K_2, I_{11}(U), E_1(U), E_2(U));$$

$$I_1(x) = f(K_1, T_1(t=0), r_1, m_1, p_1, Q_1, x_1)$$

$$I_{11} = f(h_1, h_2, E_2(U), U)$$

$$E_1(U) = f(H_i, B_i, r_i, m_i, p_i, Q_i, K_i, U)$$

$$t_y = 1/K_2 [T_{2y} - T_{2r}(t=0)]; \quad T_1(t \text{ или } \mu=0) = T_{1cp} = t_{rK} K_1 / B;$$

$$T_{1r}(B=0) = T_{1r}(t) - K_{1r} t y; \quad T_{cpic} = T_{1r}(t=0) + K_{1r} t.$$

$$\mu = t - t_{cj} \text{ (при } t - t_{cj} \leq 0; \mu=0); \quad \theta = t - t_y \text{ (при } t - t_y \leq 0; \theta=0);$$

Здесь:  $t_y$  - период времени, прошедший с начального момента до момента, когда температура основания принимает значение  $T_{2y}$ ;  $t_{cj}$  - момент времени, соответствующий началу  $j$ -го суточного периода;  $r$  и  $s$  - индексы, обозначают соответственно годовые или суточные колебания температуры;  $H$ ,  $B$ ,  $r$ ,  $m$  - параметры функции релаксации.

Аналогично, на основании проведенных теоретических исследований устанавливались аналитические выражения, позволяющие прогнозировать термо-напряженное состояние асфальтобетонного покрытия для других его расчетных схем (рис.10). Анализ полученных результатов показывает, что температурные напряжения в покрытии колеблются с частотой суточных колебаний, имея во времени переменную амплитуду  $A_c(t)$  и располагаясь между верхней и нижней границами, обусловленными влиянием годового ко-

лебания температуры (рис.9). Данные результаты приводят к выводу о том, что подобные циклические изменения температурных напряжений развивают термо-усталостное повреждение структуры асфальтобетона в покрытии.

На основании установленного характера изменения температурных напряжений в процессе службы асфальтобетонного покрытия получались аналитические зависимости, позволяющие оценивать его температурную трещиностойкость. В результате на основании положений кинетической теории прочности твердых тел с использованием феноменологического подхода предложено условие предельного состояния в виде

$$\left[ M(\sigma_T, t, z_j) \right]^\alpha + \sum_{i=1}^n \left[ M_i(t, z_j) \right]^{\beta_i} - \left[ M_R(t, z_j) \right]^\gamma < [M], \quad (6)$$

где  $M(\sigma_T, t, z_j)$  - мера поврежденности структуры асфальтобетона  $j$ -го подслоя от действия термо-усадочных напряжений;  $M_i(t, z_i)$  - то же, от действия других факторов (транспортного, водо-морозного и т.п.);  $M_R(t, z_j)$  - восстановившаяся часть к моменту времени  $t$  ранее накопившейся меры поврежденности структуры;  $[M]$  - предельно-допустимое значение меры поврежденности;  $\alpha, \beta, \gamma$  - экспериментальные параметры.

Здесь под поврежденностью подразумевается формальное, кинетическое понятие необратимых нарушений и разрывов связей в асфальтобетоне, накапливающихся во времени при определенном характере воздействия какого-либо из анализируемых в условии (6) факторов. Мера поврежденности - это относительный параметр, характеризующий степень повреждения структуры асфальтобетона при воздействии разрушающего фактора.

Для меры поврежденности асфальтобетона  $M_k(\sigma_T, t, z_j)$ , накопившейся за характерный промежуток времени при действии термо-усадочных напряжений, получено выражение вида

$$M_k(\sigma_T, t, z_j) = \int_{t_k}^{t_{k+1}} \Phi((t-\tau); h_1; z_j) \varphi(\sigma_T(\tau); T(\tau); z_j) d\varphi(\tau). \quad (7)$$

где  $\Phi$  - функция поврежденности, отражающая историю накопления поврежденности на промежутке  $(t-\tau)$ ;  $h_1$  - экспериментальные константы этой функции, отражающие нелинейный характер накопления поврежденности;  $\varphi$  - функция влияния, отражающая влияние термо-усадочных напряжений и температуры на накопление поврежденности;  $\psi$  - определяющий переменный параметр, относительно которого отслеживается накопление поврежденности (напряжение, энергия, время и т.п.).

В частных случаях выражение (7) дает известные критерии "длительной" прочности Р.Бейли, А.А. Ильюшина, В.В. Москвитина или другие при соответствующих видах функций  $\Phi$ ,  $\phi$  и параметра  $\psi$ .

На основании полученных решений разрабатывался метод расчета асфальтобетонного покрытия на температурную трещиностойкость. При этом исходили из двух различных подходов, используемых на практике при эксплуатации асфальтобетонных покрытий.

В первом случае рассматривался вариант, когда не допускается образование температурных трещин за заданный срок службы. Во втором случае, как более общем, рассматривался вариант, когда может допускаться образование температурных трещин с последующей эксплуатацией покрытия без ремонта или с выполнением ремонтных мероприятий по заделке трещин. Для первого случая в качестве показателя трещиностойкости использовалась мера поврежденности, как мера опасности образования температурной трещины  $M_{TP}(t)$  и в  $j$ -том подслое покрытия при сопоставлении ее с предельно-допустимым значением  $C_{TP}(t)$  (рис.11). Условие температурной трещиностойкости асфальтобетона в  $j$ -том подслое покрытия получено в виде

$$[M_N(\sigma_T; t_{N-1} + \Delta t_p; z_j)] + \sum_{k=1}^{N-1} [M_k(\sigma_T; t; z_j)]^{\alpha} < C_{TP}(t, z_j), \quad (8)$$

здесь:

$$M_N(\sigma_T; t_{N-1} + \Delta t_p; z_j) = \int_{t_{N-1}}^{t_{N-1} + \Delta t_p} \Phi((t_p - \tau); n_1; z_j) \phi(\sigma_T(\tau); T(\tau); z_j) d\phi(\tau)$$

$$C_{TP}(t; z_j) = [M] - [\sum_{j-1}^n [M_1(t, z_j)]] + [M_R(t, z_j)],$$

$$[M] = M_N \cdot K_N \cdot K_y,$$

где  $M_N$  - значение меры поврежденности на последнем  $N$ -ом промежутке времени до разрыва  $j$ -го подслоя;  $C_{TP}(t, z_j)$  - предельное значение на момент времени  $t$  меры поврежденности асфальтобетона с точки зрения опасности образования температурных трещин;  $M_N$  - номинальное значение меры поврежденности ( $M_N = 1$ );  $K_N$  - коэффициент проектной надежности;  $K_y$  - коэффициент условий работы.

Из условия (8) определялись необходимые значения времени разрывов  $j$ -ых подслоев  $t_p(\Delta h; z_j)$  для определения времени до образования температурных трещин  $t_{TP}$  в слое асфальтобетонного покрытия по всему его сечению. Здесь характерные  $K$ -тые промежутки времени соответствуют характерному термо-напряженному состоянию, обусловленному соответствующей

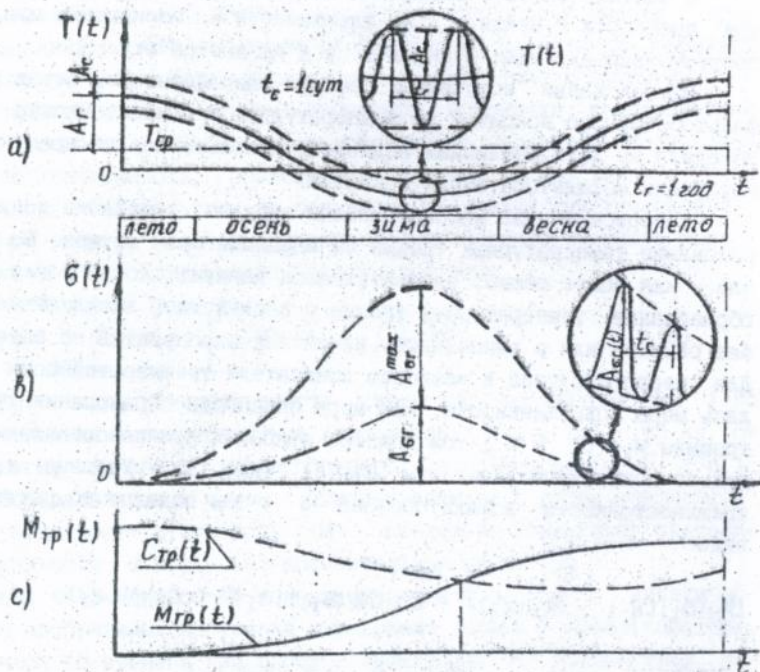


Рис.11. Изменение во времени: а - температуры покрытия  $T(t)$ ; б - температурных напряжений  $\sigma_T(t)$ ; в - показателя  $M_{TP}(t)$ .

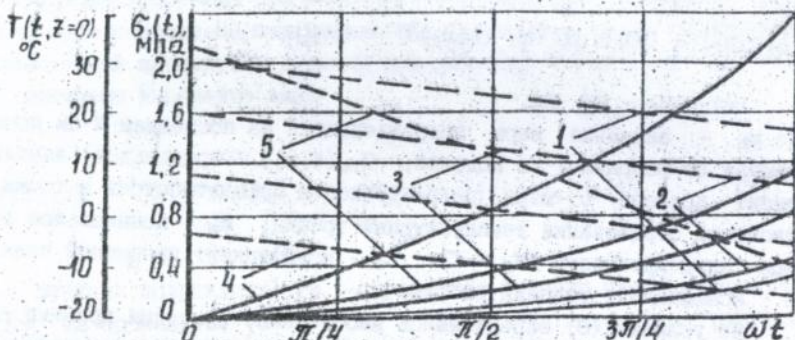


Рис.12. Изменение температуры  $T$  (штриховые линии) и напряжений  $\sigma_T$  (сплошные) в асфальтобетонном покрытии на блочном основании ( $h_1=4$  см;  $h_2=20$  см;  $V_1=V_2=700$  см;  $l=500$  см;  $\alpha_1=0$ ;  $\alpha_2=0$ ;  $\delta=0,5$  см;  $E_2=2500$  МПа;  $\alpha_1=3,35 \cdot 10^{-6}$  град;  $\alpha_2=1 \cdot 10^{-5}$  град;  $\gamma_1=\gamma_2=24 \cdot 10$  кг/см<sup>3</sup>;  $a_1=10$  см<sup>2</sup>/ч;  $a_2=30$  см<sup>2</sup>/ч;  $f_{2y}=f_2(t=0)$ : 1-4 - при колебании температуры с периодом, равным 1 сут; 5 - то же, с периодом в 1 год.

характерной расчетной схемой согласно рис.10 при постепенном разрыве  $j$ -тых подслоев покрытия. В условии (8) с помощью слагаемого  $\Sigma M_k(b_T; t; z_j)$  учитывается предшествующее суммирование поврежденности в  $j$ -том подслое при постепенном изменении расчетных схем термо-напряженного состояния в связи с предшествующими разрывами каждого предыдущего подслоя асфальтобетонного покрытия.

Для второго случая эксплуатации асфальтобетонного покрытия, когда может допускаться образование температурных трещин, в качестве показателя температурного растрескивания асфальтобетонного покрытия принимался изменяющийся во времени средний шаг между температурными трещинами  $l_{TP}(t)$ . По условию температурной трещиностойкости требовалось, чтобы он за определенное нормативное время эксплуатации  $t_H$  оставался выше своего предельно-допустимого значения  $[l_{TP}]$

$$l_{TP}(t_H) > [l_{TP}]. \quad (9)$$

Для прогнозирования трещиностойкости асфальтобетонного покрытия необходимо определять параметры кинетики образования температурных трещин (время до образования температурных трещин первого и последующих  $n$ -тых поколений  $t_{TPn}$ ; шаг между температурными трещинами  $l_{TP}(t)$  для нового покрытия, а также аналогичных параметров кинетики образования температурных трещин (новых или отремонтированных) после любого  $m$ -го ремонта трещин). Времена  $t_{TPn}$  и  $t_{TP}^{PM}$  определяются по процедуре, описанной выше.

Время до образования температурных трещин носит случайный характер вследствие определенного разброса термо-реологических свойств асфальтобетона и толщины покрытия, обусловленного соответствующим качеством работ. На основании описанного выше детерминированного решения по определению значения  $t_{TP}$ , с помощью известных численных приемов решения статистических задач, устанавливается математическое ожидание времени появления трещин и характеристики разброса. Это дает возможность, в зависимости от расчетной схемы работы асфальтобетонного покрытия (рис.10), получать изменение среднего шага между температурными трещинами  $l_{TP}(t)$  и характеристики его разброса при образовании температурных трещин первого или  $n$ -го поколений.

Описанная процедура вычисления параметров кинетики образования температурных трещин с учетом последовательного изменения расчетных схем продолжается до выполнения требования условия (9). Аналогичный подход используется при определении параметров кинетики образования температурных трещин в асфальтобетонном покрытии после  $m$ -го вида ре-

монта трещин, где также учитывается мера поврежденности в асфальтобетоне за предшествующий период. Это дает возможность выполнять проверку покрытия на температурную трещиностойкость при различных вариантах его эксплуатации.

Особенностью предложенного метода является использование таких аналитических выражений, характеризующих свойства материалов, которые обеспечивают необходимую аппроксимацию с требуемой достоверностью. Для этого применен подход, который предусматривает автоматическое самообеспечение требуемой достоверности применяемых аналитических выражений с помощью специальных экспериментальных тестов. Составной частью такого подхода является разработанная методика определения термомеханических свойств асфальтобетонов, применяемых для расчетов.

Предложенный метод позволяет рассчитывать толщину покрытия, количественно и качественно оценивать влияние различных факторов на трещиностойкость и прогнозировать его температурную трещиностойкость.

Полученные зависимости, составленные на их основе алгоритмы и программы позволили создать отсутствовавшую ранее аналитическую базу для оценки температурной трещиностойкости асфальтобетонных покрытий.

Таким образом, на основании проведенных исследований впервые создан универсальный и гибкий расчетный аппарат, отражающий и учитывающий основные факторы, влияющие на температурную трещиностойкость покрытий.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили адекватность разработанных научных основ оценки температурной трещиностойкости асфальтобетонных покрытий, что позволило провести широкий анализ температурной трещиностойкости и разработать практические рекомендации для проектирования, строительства и эксплуатации покрытий.

#### 2.4. Определение термо-реологических характеристик

Для оценки температурной трещиностойкости покрытия необходимо использовать следующие экспериментально определяемые характеристики асфальтобетона: коэффициент температуропроводности  $a$ ; коэффициент линейного температурного деформирования  $\alpha(T)$ ; коэффициент линейного усадочного деформирования  $\alpha_y(t)$ ; функцию релаксации  $R(t)$ ; функцию ТВА  $a_T(T)$ ; функцию поврежденности  $\Phi(t)$ ; параметры условия предельного состояния  $\alpha, \beta, \gamma$ . Эти показатели свойств являются своего рода термо-реологическим паспортом асфальтобетона. При определении расчетных значений таких показателей применялись как расчетно-экспериментальный подход, так и экспериментальный. Расчетные значения коэффициента температуропроводности устанавливались расчетно-экспериментальным путем либо по спра-

вочным данным. Значения коэффициентов линейного температурного и усадочного деформирования определялись как расчетно-экспериментальным методом, так и экспериментальным на основании использования данных дилатометрических измерений.

Для определения термо-вязко-упругих показателей свойств наряду с разработанным экспериментальным методом устанавливались аналитические зависимости функции релаксации асфальтобетона на основании данных о его составе и свойствах компонентов

$$R_{\sigma/\epsilon}(t, T) = \left[ \frac{1}{E_M} + \frac{S_R}{R_{\sigma}(t_k, T^*) K_C(t_k, T^*)} \right]^{-1} \quad (10)$$

где  $S_R = (V_{II} + \Pi_M \cdot K_{II}) / [3K_{II} K_{\sigma} K_d (1 - \Pi_M)]$ ;  $t_k = 0,1$  с;

$K_C = 1 + (r_b \cdot a \cdot m_{II} [d(1 + T^*) \lg P_{25}]^2) V_{PM}$ ;

$K_d = 1$  при  $V > V_0$ ;  $K_d = V/V_0$  при  $V < V_0$ ;

$V_0 = A_B \cdot \Pi + B_B \cdot \Pi + C_B \cdot m_{II}$ ;  $T^* = T + 1/P \cdot \ln(t/t_k)$ ;

$K_{\sigma}$ ,  $P$ ,  $A_B$ ,  $B_B$ ,  $C_B$  - экспериментальные константы;  $V$  - массовая доля битума;  $V_0$  - оптимальное содержание битума;  $\Pi$ ,  $\Pi$ ,  $m_{II}$  - массовые доли соответственно щебня, песка и минерального порошка в общем количестве каменного материала;  $P_{25}$  - показатель пенетрации битума при 25 °С;  $r_b$ ,  $r_m$  - соответственно средняя плотность битума и каменного материала;  $R_{\sigma}$  - функция релаксации битума;  $E_M$  - модуль упругости каменного материала.

Показатели свойств  $\Phi(t)$  и  $\psi(\delta, T)$ , характеризующие прочность, долговечность и кинетику накопления повреждений структуры асфальтобетона, а также вид этих функций определяли на основании функции долговечности  $t_p^*(\delta, T)$  и тестовых опытов.

Выполненные эксперименты показали, что для адекватной аппроксимации функции долговечности могут быть использованы различные аналитические зависимости. Одной из универсальных и удобных для практического применения является зависимость, связывающая время до разрушения материала  $t_p^*$  и действующее напряжение  $\delta$  в опыте на статическую усталость в виде степенного закона, в котором параметры, согласно экспериментальным данным, являются функциями температуры

$$t_p^*(\delta, T) = B(T) \delta^b(T), \text{ где} \quad (11)$$

$$B(T) = A_B + B_B \cdot (1/T') + C_B \cdot e^{D/T'}, \quad \lg b(T) = a_B + b_B \cdot (1/T') + \gamma_B \cdot e^{\beta/T'}$$

здесь  $A_B$ ,  $B_B$ ,  $C_B$ ,  $D_B$ ,  $a_B$ ,  $b_B$ ,  $\gamma_B$ ,  $\beta_B$  - экспериментальные константы.

Для получения значений функции долговечности  $t_p^*(\delta, T)$  и ее параметров расчетно-экспериментальным способом в зависимости от параметров

состава асфальтобетона получены аналитические зависимости, основанные на результатах определения функции релаксации  $R_{\alpha/\epsilon}(t, T)$  и прочности асфальтобетона на растяжение

$$\sigma_{\text{пр}}^{\alpha/\epsilon}(t_k, T) = f(\sigma_{\text{пр}}^{\text{бит}}, R^{\text{бит}}(t_k, T), V, V_{\text{п}}, m_{\text{п}}, \Pi, \Pi). \quad (12)$$

Экспериментально функция долговечности и ее параметры находились по классической методике из результатов опытов на статическую усталость. Кроме того, разработаны методы определения функции долговечности асфальтобетона из опытов на динамическую усталость, а также по результатам испытания на прочность при растяжении или изгибе с постоянной скоростью нагружения или деформирования.

На основании использования расчетно-экспериментального и экспериментального методов были установлены расчетные параметры функции долговечности  $t_{\text{р}}^*(\sigma, T)$  асфальтобетона исследуемых составов. Затем на основании специальных тестовых опытов, использующих различные режимы нагружения, деформирования и изменения температуры, устанавливали вид функции  $\Phi(t)$ ,  $\Phi(\sigma, T)$  и необходимые параметры условия предельного состояния.

## 2.5. Оценка влияния различных факторов на температурную трещиностойкость асфальтобетонных покрытий

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали, что температурную трещиностойкость асфальтобетонного покрытия определяют его термо-напряженное и предельное состояния, зависящие от сочетания различных факторов. Поэтому для обоснованного выбора эффективных методов повышения температурной трещиностойкости асфальтобетонных покрытий и разработки практических рекомендаций проводилась количественная и качественная оценка влияния этих факторов на температурную трещиностойкость покрытий. Оценка выполнялась с помощью разработанных математических моделей с использованием установленных расчетных параметров термо-реологических свойств материала покрытия.

Установлено, что с увеличением амплитуд колебаний температуры соответственно увеличивается скорость охлаждения покрытия, что приводит к увеличению значений температурных напряжений (рис.3) и, при всех равных прочих условиях, к более быстрому растрескиванию асфальтобетона (рис. 4). Этим объясняется более интенсивное трещинообразование в асфальтобетонном покрытии в условиях континентального и резко континентального климата.

Ранее было принято считать, что медленное (менее одного градуса в

сутки) охлаждение покрытия при годовом изменении температуры по сравнению с суточным (около одного градуса в час) якобы не должно вызывать существенных температурных напряжений в асфальтобетоне ввиду релаксации напряжения за столь длительный период времени. Поэтому при рассмотрении температурной трещиностойкости асфальтобетонных покрытий амплитуда годовых колебаний не учитывалась. Однако анализ показал, что температурные напряжения, возникающие при годовом колебании температуры, имеют один порядок с напряжениями от суточного изменения температуры (рис. 12). Это объясняется тем, что к концу охлаждения в годовом цикле покрытие достигает довольно низкой температуры, при которой релаксация существенно замедляется. Кроме того, перепад температуры в годовом цикле обычно в три-четыре раза больше суточного перепада температуры. Эти обстоятельства приводят к тому, что от годового колебания температуры возникают ощутимые напряжения. К тому же из-за более продолжительного характера действия они оказываются не менее опасными, чем напряжения от суточных колебаний.

На основании анализа установлено, что с уменьшением средней температуры происходит увеличение температурных напряжений как при годовых, так и при суточных колебаниях температуры (рис. 13), что также объясняется снижением релаксации напряжений в асфальтобетоне с понижением температуры. За первые 4 месяца с начала годового цикла охлаждения показатель меры опасности образования температурных трещин для покрытия  $M_{Тр}$  увеличивается не существенно, несмотря на то, что температурные напряжения достигают более половины своего максимального значения. Далее с течением времени показатель  $M_{Тр}$  значительно изменяется в зависимости от средней температуры  $T_{ср}$ . Так, уменьшение средней температуры от  $5^{\circ}\text{C}$  до  $0^{\circ}\text{C}$  приводит к увеличению опасности трещинообразования почти в 14 раз. При  $T_{ср} = -5^{\circ}\text{C}$  величина  $M_{Тр}$  после  $t=4$  мес. резко увеличивается и через 1,5 месяца достигает своего критического значения. Это означает, что при таком температурном режиме образование температурных трещин в асфальтобетонном покрытии произойдет уже в первый год службы.

Показано, что уменьшить температурные напряжения в асфальтобетонном покрытии можно за счет целенаправленного регулирования параметров конструкции дорожной или аэродромной одежды, например, при увеличении  $h_1$ ,  $\lambda$ ,  $\delta$ ,  $f_2$  или уменьшении  $l_{пл}$ ,  $h_2$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $f_1$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $T_{2y}$ . При определенном сочетании этих параметров можно добиться заметного повышения температурной трещиностойкости покрытия. Так, оказалось, что температурные напряжения в покрытии уменьшаются с уменьшением модуля

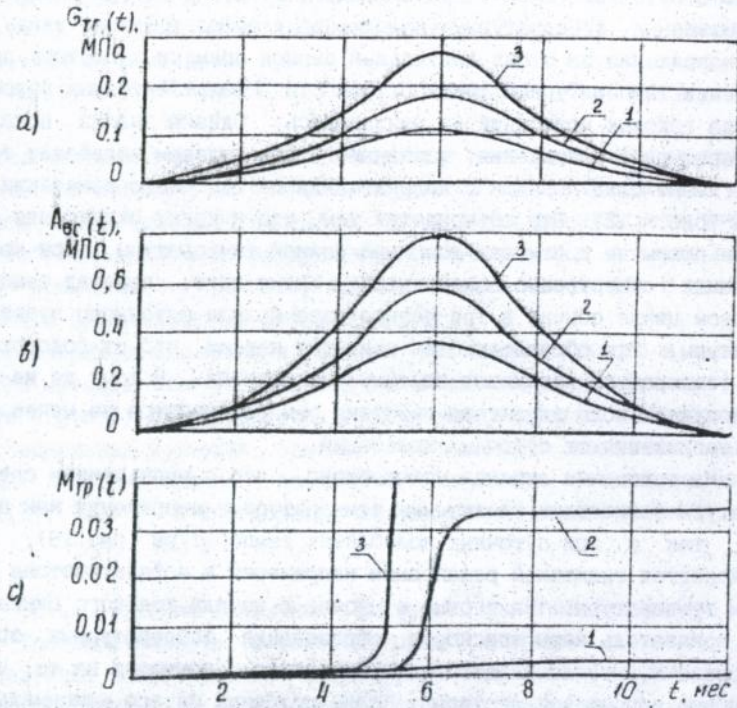


Рис. 13. Изменение во времени в асфальтобетонном покрытии (а/б тип "В", БИД 60/90) толщиной 4 см при  $A_{TГ}=20^{\circ}\text{C}$ ,  $A_{TС}=6^{\circ}\text{C}$ : а - температурных напряжений при годовых колебаниях температуры; б - амплитуды температурных напряжений при суточных колебаниях температуры; в - меры опасности температурного трещинообразования; 1 - при средней температуре, равной  $5^{\circ}\text{C}$ ; 2 - то же,  $0^{\circ}\text{C}$ ; 3 - то же,  $-5^{\circ}\text{C}$ .

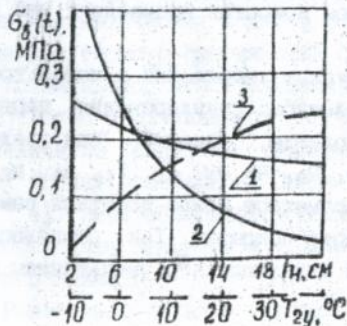


Рис. 14. Влияние толщины асфальтобетонного покрытия  $h_1$  и температуры  $T_{2y}$  на напряжения  $\sigma_b(t)$  ( $h_2=20$  см;  $E_2=4000$  МПа; параметры  $b_1, b_2, l, \delta, \lambda, f_2, \gamma_1, \gamma_2, \alpha_1, \alpha_2, a_1, a_2$  те же, как для рис. 12): 1 - при изменении  $h_1$  при  $t_r=1$  год;  $A_T=22$  град,  $T_{ср}=12^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{2y}=T_1(t=0)$ ;  $t=6$  мес.); 2 - то же, при  $t_c=12$  ч;  $A_c=9$  град); 3 - при изменении  $T_{2y}$  в случае годовых колебаний температуры ( $h_1=4$  см).

упругости цементобетонного основания. Это согласуется с имеющимся положительным опытом применения на практике низкомарочных бетонов в основаниях дорожных одежд с асфальтобетонными покрытиями.

Из полученных результатов следует, что даже относительно небольшое увеличение температурных напряжений, вызываемое наличием блочного основания, приводит к значительному ухудшению температурной трещиностойкости асфальтобетона в покрытии. К примеру, увеличение напряжений на 10 % влечет за собой увеличение  $M_{TP}$  на 30 - 80 %. Этим объясняется более интенсивное образование температурных трещин в покрытии, расположенном на трещиновато-блочном основании, по сравнению с такими же покрытиями, в основании которых используются щебень или пропитка щебня вяжущим.

С увеличением толщины асфальтобетонного покрытия влияние трещиновато-блочного основания на температурное напряжение в покрытии уменьшается как при годовых, так и, особенно, при суточных колебаниях температуры (рис. 14). Результаты вычислений показывают, что при толщине асфальтобетонного покрытия свыше 10 см влияние трещиновато-блочного основания на напряжение в покрытии при суточных колебаниях температуры становится заметно меньше чем при годовых.

Увеличение толщины покрытия повышает срок службы до образования температурных трещин  $t_{TP}$  в разных климатических условиях (рис. 15).

Из проведенного анализа также следует, что устройство блочного основания при более низкой температуре  $T_{2y}$  способствует уменьшению напряжений в покрытии, обусловленных влиянием основания (кривая 3 на рис. 14), а, следовательно, и повышению трещиностойкости асфальтобетонного покрытия. Этому также способствует устройство защитного слоя. Так, его толщина в 2-4 см (например, при применении поверхностных обработок) улучшает показатель трещиностойкости покрытия в 1,5 - 2 раза. Кроме того, рациональный выбор видов и последовательностей ремонтов асфальтобетонного покрытия при заделке трещин позволяет также уменьшить показатель трещинообразования покрытия и поддерживать его на необходимом уровне в процессе эксплуатации (рис. 16).

Устройство асфальтобетонного покрытия при низкой температуре (например, 5 °C) сопровождается большими скоростями его охлаждения. Это вызывает опасность зарождения в асфальтобетоне термоповрежденности структуры тотчас после уплотнения из-за появления значительных температурных напряжений (рис. 17). Для уменьшения таких отрицательных последствий целесообразно стремиться к тому, чтобы к окончанию уплотнения асфальтобетонное покрытие имело минимально допустимую температуру



(рис. 17.а) и искусственно замедлять процесс остывания покрытия (рис. 17.б).

Существенный эффект по снижению напряжений достигается за счет модификации битума добавкой дивинилстирольного термозластопласта. Так, в покрытии из асфальтобетона типа Г на битумно-полимерном вяжущем, приготовленном на основе битума БНД 60/90 с 2,5 % ДСТ-30 и 25 % раствора в ЗДТ и с 1,5 % БП-3, возникающие температурные напряжения в 1,5-2 раза меньше, чем в исходном составе при начальной температуре охлаждения  $T_0 = +5$  °С. При  $T < 0$  °С температурные напряжения в покрытии уменьшаются в 2,5-4 раза. Однако применение эффективных добавок к битуму для повышения трещиностойкости покрытия ограничивается их высокой стоимостью. Поэтому в каждом конкретном случае существует экономически целесообразное содержание таких добавок.

Расчеты показывают, что благодаря введению в битум 4 % резиновой крошки температурные напряжения в асфальтобетоне уменьшаются на 25-30 % по сравнению с исходным составом на битуме БНД 60/90.

Проведенный анализ показал, что температурная трещиностойкость асфальтобетона зависит от индекса пенетрации битума, увеличиваясь с уменьшением последнего, и эта закономерность сохраняется при различных толщинах покрытия. Диапазон изменения индекса пенетрации от +1 до -1, соответствующий битуму БНД, характеризуется минимальными значениями  $M_{тр}$ .

Кроме того, изменение пористости и количества битума в асфальтобетоне позволяет также заметно влиять на температурные напряжения. Так, увеличение остаточной пористости приводит к уменьшению температурных напряжений. Примечательно, что зависимость температурного напряжения от количества битума в асфальтобетоне носит экстремальный характер. При этом максимальное значение напряжений примерно соответствует традиционно "оптимальному" содержанию битума в асфальтобетоне. Аналогично изменяется показатель трещиностойкости  $M_{тр}$ .

Увеличение показателя пенетрации битума от 40 до 120 приводит к уменьшению температурных напряжений в покрытии в 1,5 - 2 раза. Дальнейшее понижение вязкости сопровождается незначительным понижением температурных напряжений.

Выполненный анализ свидетельствует о возможности использования полученных результатов исследования для оценки температурной трещиностойкости асфальтобетонного покрытия и обоснования рациональных приемов повышения трещиностойкости в зависимости от конкретных условий.

## 2.6. Практическое применение результатов исследования

На основании проведенных исследований предложены новые, выделены эффективные и усовершенствованы существующие практические приемы, направленные на повышение температурной трещиностойкости асфальтобетонных покрытий и имеющие конструктивный, материаловедческий и технологический аспекты.

К основным предложениям конструктивного направления относятся: замена блочного основания сплошным при конструировании одежд; применение трещино-прерывающих слоев из зернистых, эластичных, высокопрочных или уменьшающих трение материалов; увеличение толщины покрытия; увеличение коэффициента трения между блочным основанием и грунтом; увеличение длины участка с пониженным трением между покрытием и основанием; уменьшение модуля упругости трещиновато-блочного основания путем применения полужестких материалов с малым содержанием неорганических вяжущих; уменьшение длины плит основания путем их дискретизации и доведения размеров блоков до величины не более  $(4-8)h$ ; устройство защитного слоя толщиной 2-4 см из материалов повышенной деформативности при низких температурах; устройство температурных швов в асфальтобетонном покрытии особенно на трещиновато-блочных основаниях и в районах с низкими температурами.

К основным предложениям материаловедческого направления относятся: применение битума марки БНД с индексом пенетрации от -0,5 до 0,5; применение оптимального по трещиностойкости содержания вяжущего; повышение деформативности и прочности материала при низких температурах путем рационального использования полимеров, синтетических волокон, армирующих сеток и др.; уменьшение разности коэффициентов температурного деформирования вяжущего и каменного материала; увеличение сцепления между битумом и камнем при низких температурах путем применения специальных ПАВ; применение пористых заполнителей; применение высокопористых органобетонов, материалов с открытой пористостью; применение составов асфальтобетона с повышенной склонностью к "самозалечиванию" структуры, частично термо-повреждаемой в процессе службы покрытия.

К основным предложениям технологического направления относятся: уменьшение температуры при устройстве оснований из материалов, укрепленных неорганическими вяжущими; снижение температуры окончательного уплотнения слоя асфальтобетонного покрытия (при пониженных температурах); уменьшение скорости остывания слоя при его устройстве путем применения временной теплоизоляции (при пониженных температурах); повышение однородности асфальтобетонных смесей и толщин устраиваемого покры-

тия; восстановление монолитности растрескавшегося асфальтобетонного покрытия в зоне трещин на более полную глубину; проведение предупредительных технологических операций по восстановлению поврежденной структуры асфальтобетона (применение пластификаторов, предварительный разогрев с последующим интенсивным уплотнением и др.); рациональное применение видов и последовательностей ремонтов асфальтобетонных покрытий после образования температурных трещин.

Основные теоретические и экспериментальные разработки получили практическое применение при проектировании, строительстве и ремонте асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог, мостов и аэродромов.

Метод расчета асфальтобетонных покрытий на температурную трещиностойкость был реализован при разработке проектов и рекомендаций на строительство, реконструкции, усиление и ремонт автомобильных дорог: Москва-Киев-Одесса, Киев-Ковель, М. Александровка - Пролисок, Москва-Воронеж, Москва-Ярославль и др.; ряда улиц и дорог в городах: Киев, Днепропетровск, Донецк, Житомир, Минск и др.; аэродромов в городах: Борисполь, Иваново, Тюмень, Нижневартовск, Ханты-Мансийск, Ставрополь и др.; покрытий мостовых переходов и путепроводов в городах: Киев, Николаев, Залорожье, Днепропетровск и др.

В ряде нормативно-технических документов нашли отражение конструктивные [23, 26], материаловедческие [21, 24, 25] и технологические предложения [18-27].

Результаты исследований положены в основу: при разработке технических условий на синтетическую сетку из стеклопластика для армирования дорожных покрытий; при разработке рекомендаций по рациональным конструкциям дорожных одежд со слоями из дисперсно-армированного асфальтобетона; при обосновании шага между температурными швами в асфальтобетонном покрытии для автомобильных дорог в Якутской области и для аэропорта в г. Ханты-Мансийск; при разработке состава мастики и технологии заделки температурных трещин в гг. Киеве и Минске; при разработке конструкций асфальтобетонного покрытия, армированного геосеткой для ряда автомобильных дорог.

### 3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

3.1. На основании критического анализа научной литературы установлено, что существующие подходы к решению проблемы температурной трещиностойкости асфальтобетонных покрытий не имеют единой научной и методологической основы. На практике отсутствует общепринятый метод оценки температурной трещиностойкости асфальтобетонных покрытий, учи-

тывающий совместное действие таких определяющих факторов как: циклическое изменение температуры при годовых и суточных ее колебаниях; термо-реологические свойства материалов; вид основания и характер его связи с покрытием: кинетику образования поперечных трещин; виды ремонта трещин и последовательность их выполнения; технологию выполнения работ.

3.2. С помощью экспериментальных, натуральных и лабораторных исследований особенностей образования температурных трещин и термо-реологического поведения асфальтобетона при изменении температуры и напряжений получены следующие результаты: установлена особенность температурного деформирования покрытия в продольном и поперечном направлениях, влияющая на образование температурных трещин; установлена кинетика образования температурных трещин во времени; получены данные о влиянии на степень и интенсивность растрескивания асфальтобетонного покрытия в зависимости от состава асфальтобетона, конструкции дорожной одежды, технологии производства работ, климатических условий, транспортных нагрузок и др.; выявлен ряд особенностей образования температурных трещин в асфальтобетонном покрытии (температурные трещины преимущественно располагаются перпендикулярно продольной оси покрытия, шаг между трещинами в процессе их эксплуатации постепенно уменьшается, температурные трещины на покрытии появляются раньше, чем трещины от действия транспорта, появление температурных трещин сопровождается различными видами разрушений покрытия, многие виды ремонтов "залечивают" трещины на короткий срок); установлены характерные особенности термо-реологического поведения асфальтобетона (деформативные и прочностные свойства асфальтобетона очень чувствительны к изменению температуры и длительности нагружения, их значение изменяется от нескольких раз до нескольких порядков, процессы ползучести и релаксации заметно проявляются даже при низких температурах, например, при  $T = -20$  °C напряжения за одну минуту могут отредаксировать до 50 %, в области значений параметров  $T$  и  $t$ , где проявляется действие температурных напряжений асфальтобетон ведет себя как линейное термо-реологически простое тело, под действием растягивающих напряжений во всем диапазоне эксплуатируемых температур асфальтобетон проявляет временной кинетический характер разрушения).

3.3. Разработаны исходные физические предпосылки к теоретическим основам оценки температурной трещиностойкости, выделены основные причины образования температурных трещин в асфальтобетонном покрытии, составлена физическая модель образования температурных трещин в покрытии с учетом термо-реологического поведения асфальтобетона.

3.4. Разработаны теоретические основы определения термо-напряженного состояния асфальтобетонного покрытия, опирающиеся на основные положения теории термовязкоупругости. Разработаны основные расчетные схемы покрытия, отражающие его работу в процессе службы при колебании температуры: до образования трещин, в процессе образования трещин, после образования трещин, после ремонта трещин. Получены теоретические зависимости для определения и прогнозирования температурного напряжения в покрытии в зависимости от термо-реологических свойств материалов, геометрических размеров покрытия и основания и режима изменения температуры во времени. Получены новые качественные и количественные данные о характере циклического изменения термо-напряженного состояния асфальтобетонного покрытия при суточных и годовых колебаниях температуры в процессе его эксплуатации.

3.5. Разработаны теоретические основы определения предельного состояния асфальтобетонных покрытий и прогнозирования их температурной трещиностойкости на базе кинетической теории прочности твердых тел. Установлено условие предельного состояния покрытия, учитывающее влияющие факторы. Получены теоретические зависимости для метода расчета асфальтобетонных покрытий на температурную трещиностойкость применительно к двум подходам, используемым в практике эксплуатации асфальтобетонных покрытий: когда не допускается образование температурных трещин за заданный срок службы; когда может допускаться образование температурных трещин с последующей эксплуатацией покрытия без выполнения или с выполнением ремонта трещин. На основании установленных зависимостей, алгоритмов и программ получен расчетно-аналитический аппарат для оценки температурной трещиностойкости асфальтобетонных покрытий.

3.6. Разработаны расчетные и экспериментальные методы определения термо-реологических характеристик и проверки достоверности результатов научных исследований температурной трещиностойкости асфальтобетонных покрытий. Установлены аналитические выражения для вычисления показателей термо-реологических свойств в зависимости от состава и свойств компонентов асфальтобетона. Получены экспериментальные результаты определения термо-реологических характеристик асфальтобетонов различных составов на основании специально созданных методов и приборов. Получены результаты проверки адекватности теоретических исследований, свидетельствующие о достоверности установленных результатов.

3.7. Выполнена оценка влияния различных факторов на температурную трещиностойкость асфальтобетонных покрытий. Установлены новые количественные результаты о влиянии на трещиностойкость: параметров состава

ва и свойств компонентов асфальтобетона; параметров конструкции дорожной или аэродромной одежды; параметров технологии производства работ. Получены результаты по оценке эффективности различных приемов повышения трещиностойкости покрытий.

3.8. Разработаны и внедрены практические разработки по повышению температурной трещиностойкости асфальтобетонных покрытий. Получены алгоритмы и программы для выполнения расчетов асфальтобетонного покрытия на температурную трещиностойкость. Разработаны рекомендации по проектированию асфальтобетонных покрытий повышенной температурной трещиностойкости. Установлен лабораторный показатель и метод его определения для оценки температурной трещиностойкости асфальтобетона. Предложены рациональные способы повышения температурной трещиностойкости асфальтобетонных покрытий. Получены методы диагностики и прогноза температурной трещиностойкости асфальтобетонного покрытия.

3.9. Результаты исследований нашли применение при разработке нормативных документов, проектов, рекомендаций, предложений, рецептов материалов, конструкций, технологий для проектирования, строительства, реконструкции, усиления, ремонта, эксплуатации асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог, мостов и аэродромов.

#### 4. ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ РАБОТ, ОТРАЖАЮЩИХ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ

##### 4.1. Научные работы

1. Радовский Б.С., Могаевой В.В. Прогибы многослойных дорожных одежд // Иав. вузов. Стр-во и архит.- 1976.- № 5.- С. 146-151.
2. Могаевий В.В. Розрахунок напружено-деформованого стану дорожнього одягу за допомогою ЕОМ // Автомоб. дороги і дорожнє будівництво.- Київ: Будівельник, 1980.- вип. 26.- С. 9-12.
3. Радовский Б.С., Сливинский В.И., Могаевой В.В., Супрун А.С., Сом М.И., Швец В.В. Влияние числа и расположения колес на величину допустимой осевой нагрузки автотранспортных средств // Автомобильная промышленность.- 1981.- № 6.- С. 15-17.
4. Могаевий В.В. Визначення температурних напруг в асфальтобетонному покритті з урахуванням в'язко-пружних властивостей матеріалу, що змінюються з температурою // Автомоб. дороги і дорожнє будівництво.- Київ: Будівельник, 1982.- вип. 31.- С. 48-50.
5. Могаевий В.В. Схема розрахунку покритть нежорстких дорожніх одягів на тріщиностійкість // Автомоб. дороги і дорожнє будівництво.- Київ: Будівельник, 1983.- вип.32.- С. 19-22.

6. Моаговой В.В., Радовский В.С. Определение напряжений в покрытии как вязко-упругом слое при колебаниях температуры // В сб.: Исследования по механике дорожных одежд. Тр. Союздорнии.- 1985.- С. 121-132.
7. Моаговой В.В., Высоцкая В.А., Гусев А.В. Мероприятия по повышению трещиностойкости асфальтобетонных и дегтебетонных покрытий с основаниями из укрепленных материалов.- Киев: УкрНИИТИ.- 1986.- 3 с.
8. Моаговий В.В., Гусев О.В. Про визначення модуля пружності асфальтобетону з урахуванням зміни модуля бітуму по товщині // Автомоб. дороги і дорожнє будівництво.- Київ: Будівельник, 1986.- вип. 39.- С. 32-38.
9. Радовский В.С., Моаговой В.В. Температурные напряжения в асфальтобетонном покрытии, лежащем на основании с трещинами либо швами // Повышение долговечности дорожных конструкций. Тр. Союздорнии.- 1986.- С. 29-46.
10. Свистула І.І., Цеханський О.Е., Моаговий В.В. Підвищення точності експериментального визначення температурної тріщиностійкості асфальтобетону // Автомоб. дороги і дорожнє будівництво.- Київ: Будівельник, 1988.- вип.43.- С.52-57.
11. Радовский В.С., Моаговой В.В., Рудок В.В. Влияние режимов движения транспорта на прочность и долговечность дорожных одежд // В сб.: Интенсификация дорожного строительства.- Владимир: ВПИ, 1988.- С. 99-100.
12. Моаговий В.В., Цеханський О.Е. Вплив поперечних тріщин та швів зміцненої основи на температурну тріщиностійкість асфальтобетонного покриття // Автомоб. дороги і дорожнє будівництво.- Київ: Будівельник, 1988.- вип.42.- С. 66-72.
13. Слонь Г.К., Радовский В.С., Мерадикин А.Е., Моаговой В.В. Автоматизированный расчет асфальтобетонных покрытий на температурную трещиностойкость // В сб.: Новое в проектировании конструкций дорожных одежд. Тр. Союздорнии.- 1988.- С. 5-21.
14. Гохман Л.М., Васурманова И.В., Радовский В.С., Моаговой В.В. Применение полимербитумного вяжущего на основе ДСТ // Автомобильные дороги.- 1989.- N 7.- С.12-14.
15. Radovsky V., Mozgovoj V.I. Ways to reduce low temperature cracking of asphalt pavements. 4 Eurobitume symposium.- Madrid.- 1989.- pp.571-575.
16. Радовський В.С., Ючук О.П., Моаговий В.В. Обґрунтування відстані між температурними швами в асфальтобетонному покритті // Автомоб. дороги і дорожнє будівництво.- Київ: Будівельник, 1990.- вип.47.-

С.24-27.

17. Кирюхин Г.И., Бабак О.Г., Мозговой В.В., Никольский Ю.В., Гохман Л.М. Повышение температурной морозо- и трещиностойкости асфальтобетона // Автомобильные дороги.- 1991.- № 1.- С. 14-15.
  18. Мозговой В.В. О стандартизации показателей свойств асфальтобетона, определяющих его температурную трещиностойкость // Пути повышения качества асфальтобетона и эффективность методов испытаний.- М.: МАДИ, 1994.- С. 11-15.
  19. Мозговой В.В. Температурна тріщиностійкість асфальтобетону в покриттях автомобільних доріг і аеродромів // У аб.: Шляхи підвищення ефективності дорожнього господарства України в нових умовах господарювання.- Київ, КАДІ, 1994.- С. 99.
  20. Спосіб охолодження бітуму й аналогічних йому матеріалів перед дозуванням та затарюванням: патент України (Мозговий В.В., Радовський В.С. та ін.- №4086651 від 12.08.94).
- 4.2. Нормативно-технічні документи
21. Технология строительства дорожных одежд с применением каменноугольных дегтей и смол.- Инструкция ИН 218 УССР 024-86.- Киев, 1986.- 55 с.
  22. Назначение рациональных составов асфальтобетонов для дорог разных категорий с учетом региональных климатических условий УССР.- Киев: Миндорстрой УССР, ИН 218 УССР 067-87, 1987.- 42 с.
  23. Альбом КД-88. Типовые конструкции дорожных одежд для г.Киева.- Киев, 1988.
  24. Методические рекомендации по повышению деформативности и морозостойкости асфальтобетонных покрытий при низких температурах (до минус 50 °С).- М.: Союздорнии, 1990.- 36 с.
  25. Проектная документация на площадку для обработки антигололедной жидкостью "Артика" и мойки воздушных судов с соединительными РД и бетонным основанием под башенные и коаловые фермы.// Проект. В 2-х томах.- Киев, аэропорт Борисполь, 1991.
  26. Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа городских улиц и дорог Украины. ВСН-93.- Госкоммунхоз Украины. - Киев, 1993.- 148 с.
  27. Державні будівельні норми "Проектування та будівництво автомобільних доріг".- Київ, 1996 (проект).

## АНОТАЦІЯ

Могазовий В.В. Наукові основи забезпечення температурної тріщиностійкості асфальтобетонних покриттів.

Дисертація у вигляді рукопису на здобуття наукового ступеню доктора технічних наук з спеціальності 05.22.11 - "Автомобільні дороги та аеродроми". Український транспортний університет, Київ, 1996 р.

Захищається наукове обґрунтування вирішення важливої практичної проблеми - забезпечення температурної тріщиностійкості асфальтобетонних покриттів. Створений метод оцінки асфальтобетонних покриттів на тріщиностійкість при охолодженні чи коливанні температури. Запропоновано теорію та методи визначення термо-напруженого стану покриття в залежності від термо-реологічних властивостей асфальтобетону та параметрів конструкції дорожнього одягу. Розроблені критерії визначення граничного стану асфальтобетонного покриття на кількісний аналіз впливу різних факторів. Запропоновані практичні шляхи забезпечення температурної тріщиностійкості асфальтобетонного покриття.

Ключові слова: асфальтобетонне покриття, температурні напруження, критерій граничного стану, термо-реологічні характеристики, метод оцінки температурної тріщиностійкості, шляхи підвищення тріщиностійкості.

## Abstract

Mozgovoj V.V. Scientific foundation of ways to reduce low-temperature cracking of asphalt pavement.

A thesis is submitted for a doctor's degree of engineering sciences on profession 05.22.11 - "Road and aerodrome". Ukrainian Transport University, Kiev, 1996.

The scientific foundations for new branch of ways to reduce low-temperature cracking of asphalt pavements. The design method to estimate cracking resistance of asphalt pavement under cooling or temperature fluctuation was suggested. The analytical expressions for determining the temperature stress in the pavement as a function of relaxation and thermomechanical properties of the materials of pavement and base thickness, length of blocks and the axial block clearance, coefficient of friction between a pavement and a base, conditions of temperature changes in time e.t.c. The damage index based on Bailey's hypothesis was accepted as a measure of cracking danger. Different factors affecting the danger of temperature cracking of pavement are estimated. Ways to reduce the danger of temperature cracks occurrence are suggested.

Key words: asphalt pavement, temperature stress, relaxation and thermomechanical properties, ways to reduce low-temperature cracking, ways to reduce the danger of temperature cracks.

AB 34.912

**AB 34.912**

RECEIVED  
FEB 10 1964  
U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE  
WASHINGTON, D.C.