

ХАРЬКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

на правах рукописи

Ц Е Х А Н С К И Й

Олег Эрнстович

УДК 625.72:625.855:625.877

ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ ДОРОЖНОГО АСФАЛЬТОБЕТОНА
ПУТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ ЗЕРНОВОГО СОСТАВА СМЕСИ

(05.23.05 - Строительные материалы и изделия)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Харьков - 1995



Диссертация является рукописью.

АВ 33.79

Работа выполнена в Украинском транспортном университете.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Радовский Б.С.

Научный консультант: кандидат технических наук, старший
научный сотрудник Мозговой В.В.

Официальные оппоненты:

1. Доктор химических наук, профессор
Плутин Аркадий Николаевич
2. Кандидат технических наук
Маляр Владимир Владимирович

Ведущая организация: Государственный дорожный научно-исследовательский институт ГОСДОРНИИ.

Защита состоится " 1 " февраль 1996 г. ^{14⁰⁰} на заседании специализированного Ученого Совета КО2.17.01 при Харьковском Государственном автомобильно-дорожном техническом университете по адресу: 310078, г. Харьков, ул. Петровского, 25.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Харьковского Государственного автомобильно-дорожного технического университета.

Автореферат разослан " 25 " декабрь 1995 г.

Ученый секретарь
специализированного Ученого Совета

Космин А.В.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Асфальтобетон — материал, широко применяемый для дорожных покрытий. В развитых зарубежных странах протяженность дорог с асфальтобетонными покрытиями составляет 80-90% от протяженности дорог с твердым покрытием. Столь широкое распространение асфальтобетонные покрытия получили благодаря многочисленным достоинствам, среди которых прочность, технологичность строительства, ровность, шероховатость, гигиеничность и ремонтпригодность. В практике строительства асфальтобетонных покрытий все большее распространение получают тонкие слои износа высокой плотности и дренажные асфальтобетонные покрытия. Первые, наряду с перечисленными достоинствами, обладают еще высокой водонепроницаемостью и износостойкостью, а вторые позволяют обеспечить водоотвод, снизить транспортный шум и повысить безопасность движения. Стремление повысить прочность и долговечность асфальтобетонных покрытий, особенно их новых видов, требует совершенствования методов проектирования составов асфальтобетонных смесей, в частности, — улучшения подбора granulometрии минерального материала.

Преждевременное разрушение асфальтобетонных покрытий является не только следствием низкого качества строительства и эксплуатации, но и в значительной степени обусловлено несовершенством методов проектирования составов асфальтобетона в конкретных природно-климатических и транспортных условиях. В частности, диапазон рекомендуемых ГОСТ 9128-84 составов асфальтобетонной смеси настолько широк, что подбор наиболее рационального состава из имеющихся материалов для конкретных условий работы покрытия является очень трудоемким. Кроме того, действующие нормативные документы не позволяют непосредственно связать характеристики состава асфальтобетонной смеси с расчетными механическими характеристиками материала покрытия. Эти же недостатки присущи американскому стандарту на асфальтобетонные смеси D3515-89 и стандартам других стран.

Цель исследования состоит в разработке методики повышения прочности асфальтобетонного покрытия путем оптимизации зернового состава смеси.

Научная новизна работы. Выведены зависимости показателей прочностных и деформационных свойств асфальтобетона от состава смеси. Получено новое решение задачи о плотности упаковки полидисперсной смеси твердых частиц в зависимости от зернового состава

этой смеси. Решена задача об определении рационального зернового состава полидисперсной смеси твердых частиц при заданной плотности упаковки и ограничениях на содержание отдельных фракций. Разработана модель, позволяющая оптимизировать состав асфальтобетонной смеси с целью получения асфальтобетона максимальной плотности или для достижения заданных пористости минерального остова и остаточной пористости асфальтобетона при минимальном расходе битума. Тем самым созданы предпосылки для направленного регулирования сопротивления растяжению при изгибе и модуля упругости асфальтобетона с помощью изменения зернового состава минеральной части асфальтобетонной смеси и содержания вяжущего.

Достоверность результатов. Теоретические решения найдены современными методами теории вероятностей, геометрии на сфере и сферической тригонометрии, теории композиционных материалов. В частных случаях результаты, следующие из полученных зависимостей деформативных и прочностных характеристик асфальтобетона от состава смеси, совпадают с известными решениями Фойгта и Рейсса. Выполненные экспериментальные исследования качественно и количественно подтвердили закономерности, полученные теоретически.

Практическое значение. Разработана методика проектирования оптимального зернового состава минеральной части смеси из имеющегося набора минеральных составляющих. Даны рекомендации по совершенствованию нормативных требований к зерновому составу асфальтобетонных смесей. Оценена эффективность применения асфальтобетонных оптимальных составов в конструкциях дорожных одежд.

Внедрение. Результаты исследований нашли применение при разработке следующих документов:

1. Методические рекомендации по повышению деформативности и морозостойкости асфальтобетонных покрытий при низких температурах (до минус 50⁰С). - Москва. - Совздорнии, 1990. - 36 с.

2. Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа городских улиц и дорог Украины. ВСН 95. - Госкоммухоз Украины. - Киев, 1995. - 148 с (в печати).

3. Альбом КД-88. Типовые конструкции дорожных одежд для г. Киева. - Киев. - 1989.

4. Проектная документация на площадку для обработки жидкостью "Арктика" и мойки воздушных судов с соединительными РД и бетонным основанием под башенные или козловые фермы в аэропорту "Борисполь" // Проект. В 2-х томах.

Практические предложения, вытекающие из результатов проведен-

ных исследований, используются в проектных организациях (Укргипродор, Киевпроект, Днепркомундорпроект, Житомиркомундорпроект и др.), а также при строительстве и усилении дорожных покрытий в Черниговском и Тернопольском Облавтодорах и аэродромных покрытиях в аэропортах "Борисполь" и "Иваново".

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены на научно-технических конференциях КАДИ (Киев, 1987-1995 гг.), XI Всесоюзной научно-технической конференции молодых ученых и специалистов в Союздорнии (Москва, 1987 г.), Всесоюзной научно-технической конференции молодых ученых и специалистов "Скоростное строительство и новые материалы для дорожного строительства" (Владимир, 1988 г.), семинаре школы передового опыта "Совершенствование технологии ремонта дорожных покрытий при пониженных температурах" (Луцк, 1988 г.), XII Всесоюзной научно-технической конференции молодых ученых и специалистов в Союздорнии (Москва, 1989 г.), V Республиканской конференции "Ресурсосберегающие технологии, структура и свойства дорожных бетонов" в ХАДИ (Харьков, 1989 г.), научно-технических конференциях "Основные проблемы развития наземной базы гражданской авиации" (Киев, 1988г.; Ленинград, 1991 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 10 печатных работ.

Объем работы. Диссертация включает введение, пять глав, заключение, библиографический список из 372 наименований и приложения. Основной текст изложен на 138 страницах машинописи и содержит 26 рисунков и 32 таблицы.

2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

2.1. Состояние вопроса

Зерновой состав является одним из важнейших факторов, определяющих сопротивляемость асфальтобетонного покрытия различным видам внешних воздействий.

Влияние зернового состава минеральной части асфальтобетонных смесей на физико-механические свойства асфальтобетона и прочность асфальтобетонного покрытия изучалась в работах многих исследователей как в нашей стране, так и за рубежом: Н.М.Авласовой, И.И.Беловневой, М.И.Борца, В.А.Верезько, Д.И.Гегелия, Л.Б.Гезендзея, Н.В.Горельшева, И.М.Грушко, В.А.Золотарева, Н.Н.Иванова, Э.А.Казарновской, Г.Н.Кирькина, Б.А.Козловского, В.Н.Консова, И.В.Ко-

ролева, Б.И. Ладыгина, Г.В. Малевенского, Ю.Е. Никольского, Н.Ф. Почапского, В.А. Поырника, С.Ю. Рокаса, И.А. Рыбьева, А.О. Салля, П.В. Сахарова, В.А. Соменова, А.П. Скрыльника, Ю.В. Соколова, М.Б. Сикальской, Г.К. Сюняи, В.С. Титаря, Г.Р. Фоменко, И.М. Щербакова, И.К. Яцевича, М. Бломера, А. Голяма, М. Дурье, У. Мэтью, Г. Хорсфилда, Г. Хербста, Ю. Вдицки, У. Ли, Ф. Робертса, Л. Франкена, Дж. Ферштратена и др.

Благодаря исследованиям этих ученых установлены основные принципы проектирования зерновых составов минеральной части смеси для асфальтобетонов, применяемых в дорожном покрытии. Установлено, что при достаточно большом количестве межзерновых контактов наиболее крупных частиц, чтобы получить наиболее устойчивый пространственный каркас, образованный зёрнами, минеральная часть плотных асфальтобетонов должна обеспечивать максимально плотную упаковку зёрен. При этом битум является, с одной стороны, вяжущим, находящимся в виде структурированных плёнок на минеральных зёрнах и склеивающим их в монолит, а с другой, — играет роль смзки в зонах контакта при уплотнении и формировании пространственного каркаса и, кроме того, заполняет межзерновые поры, обеспечивая водонепроницаемость асфальтобетонного слоя из плотной смеси. Эти представления положены в основу многих известных методов проектирования состава асфальтового бетона: по асфальтовому вяжущему веществу (П.В. Сахаров), по предельным кривым плотных смесей (Н.Н. Иванов, В.В. Охотин), по растворной части (И.А. Рыбьев), по модулю насыщения (М. Дурье), по керосиновому эквиваленту (Ф. Хвим), по заданным эксплуатационным условиям работы покрытия (И.А. Рыбьев) и др.

В настоящее время в СНГ состав асфальтобетонной смеси проектируют в соответствии с ГОСТ 9128-84 по предельным кривым плотных смесей. В основу метода положено выражение, предложенное Н.Н. Ивановым и В.В. Охотиным, которое является одной из многочисленных эмпирических попыток математического описания "плотнейших" зерновых составов полидисперсных смесей (уравнения Фуллера, Гелбота-Ричарда, Болонья, Граффа, Кит-Пефа, Фюрна и др.), среди которых за рубежом наибольшее распространение получила формула Фуллера.

Диапазон возможных зерновых составов, ограниченный эмпирическими "кривыми плотных смесей", весьма широк. Это обуславливает чрезмерное разнообразие зерновых составов, определяемых этими кривыми. Экспериментальная проверка свойств асфальтобетонов из смесей многих возможных составов оказывается чрезвычайно трудоёмкой и требует большого практического опыта, так как приходится варьиро-

вать в широких пределах содержание одновременно нескольких или даже всех фракций. Причем для некоторых фракций нормативные кривые плотных смесей допускают варьирование по массе в пределах до 30 - 40%, и эти изменения нужно увязать с содержанием битума и минерального порошка. В результате нет уверенности, что запроектированный состав смеси является оптимальным, то есть обеспечивает требуемые физико-механические свойства асфальтобетона при минимальных затратах.

Составы дорожных и аэродромных асфальтобетонов, как плотных, так и дренирующих, как литых, так и многощелебнистых, разработаны на основе накопленного опыта службы покрытий. В настоящее время нет общепринятого расчетного метода, позволяющего связать состав асфальтобетона со свойствами материала покрытия. Между тем очевидно, что все прочностные и деформационные характеристики асфальтобетонного покрытия зависят от свойств компонентов асфальтобетона и их содержания в смеси. Назначение составляющих с требуемыми свойствами и направленное изменение зернового состава минеральной части смесей должно позволить регулировать водо- и морозостойкость, сопротивление растяжению при изгибе, модуль упругости, сдвигоустойчивость, температурную трещиностойкость, усталостную прочность, водопроницаемую способность и другие свойства асфальтобетонных слоев. Накопленный опыт о влиянии зернового состава смеси на эти свойства позволяет успешно применять в дорожных покрытиях многощелебнистые плотные и дренирующие асфальтобетоны, а в последние годы - литые и "каменно-мастичные" смеси для тонких защитных слоев и сверхтонких слоев усиления. Несмотря на то, что зерновые составы некоторых из этих смесей не регламентируются национальными стандартами, зарубежный опыт их службы в покрытиях автомобильных дорог свидетельствует об их большей эффективности по сравнению с традиционными плотными смесями.

Проектирование зерновых составов минеральной части асфальтобетонных смесей ставит своей целью достижение заданной (для плотных асфальтобетонов - максимальной) объемной доли минеральной части. В настоящее время не существует общепринятого метода, позволяющего рассчитать объемную долю, занимаемую в пространстве упаковкой частиц заданной granulометрии, или определить зерновой состав смеси, обеспечивающей заданную пористость асфальтобетона. Нет также аналитических зависимостей, связывающих состав и свойства компонентов асфальтобетонной смеси с прочностными свойствами асфальтобетонного покрытия. Это не позволяет объединить проектирование

зернового состава минеральной части асфальтобетонной смеси с проектированием дорожной одежды.

Исходя из цели работы, были поставлены следующие задачи:

1. Разработать теоретические зависимости, связывающие сопротивление растяжению и модуль упругости асфальтобетона с его составом и свойствами компонентов. 2. Разработать теоретические зависимости, позволяющие определить пористость минерального остова и остаточную пористость асфальтобетона по заданному зерновому составу минеральной части смеси и содержанию вяжущего. 3. Разработать методику оптимизации состава асфальтобетонной смеси с целью получения асфальтобетона максимальной плотности или достижения заданной пористости минерального остова и остаточной пористости асфальтобетона при минимальном расходе битума или минимальной стоимости смеси. 4. Экспериментально проверить достоверность полученных зависимостей. 5. Реализовать результаты исследований, разработать предложения по методике проектирования зернового состава смеси из имеющегося набора минеральных составляющих, а также - по совершенствованию нормативных требований к зерновым составам асфальтобетонных смесей, и применить некоторые из этих предложений при проектировании и строительстве дорожных и аэродромных покрытий.

2.2. Теоретическое исследование зависимости деформативных и прочностных характеристик асфальтобетона от зернового состава смеси

Асфальтобетон рассматривался как многокомпонентный композиционный материал, свойства которого определяются структурой минерального остова, свойствами минеральных составляющих и органического вяжущего, особенностями их взаимодействия, содержанием и взаимным расположением компонентов. Считалось, что асфальтобетон как композиционный материал состоит из матрицы и включений. Матрица представляет собой вяжущее и обладает ярко выраженными вязко-упругими свойствами, зависящими от температуры и длительности действия нагрузки. Включения являются составными частями. Каждая составная частица содержит шарообразное минеральное зерно с ориентированным вяжущим вокруг него и свободное вяжущее, свойства которого таковы же, что и у материала матрицы. Размеры включений определяются размерами расположенных в них зерен. Зерна обладают линейно-упругими свойствами. В зависимости от объемной доли C_k зерен в композите ориентированное вяжущее рассматривалось как пленка

в виде шарового слоя, окружающего зерно (при $C_k < C_k^*$, где C_k - критическая объемная доля минеральных зерен, при превышении которой образуется хотя бы одна цепочка контактирующих зерен), либо как пленка с менисками в зонах контакта с соседними зёрнами (при $C_k^* < C_k < C_k^{**}$, где C_k^{**} - максимальная объемная доля зерен в композите). Значения C_k^* и C_k^{**} устанавливали на основе теории перколяции. Рассматриваемый композит имеет воздушные поры, расположенные в матрице и составляющие остаточную пористость асфальтобетона.

Деформационные и прочностные свойства компонентов и их объемные доли в асфальтобетоне полагали известными.

Использовались известные методы механики композитов, позволяющие определить "вилку" эффективных характеристик для двух предельных случаев: однородного напряженного состояния и однородного деформированного состояния композита. Применяя эти методы, учитывали особенности асфальтобетона - наличие ориентированного и свободного вяжущего и воздушных пор, линейно-упругие свойства минерального материала и вязко-упругие свойства органического вяжущего. При определении прочности асфальтобетона на растяжение рассматривался различный возможный характер его разрушения в зависимости от отношения прочностей минеральной и органической составляющих.

Выражения для определения эффективных вязко-упругих деформативных и прочностных свойств асфальтобетона получены в виде интервала (для E - типа "вилки" Фойгта-Рейсса):

$$E_R^*(T, t) \leq E^*(T, t) \leq E_V^*(T, t), \quad (1)$$

$$R_R^*(T, t) \leq R^*(T, t) \leq R_V^*(T, t),$$

где $E^*(T, t)$, $R^*(T, t)$ - эффективные функции релаксации и прочность на растяжение асфальтобетона; $E_R^*(T, t)$, $R_R^*(T, t)$, - нижние границы эффективных функции релаксации и прочности на растяжение, определенные из условия однородного напряженного состояния композита; $E_V^*(T, t)$, $R_V^*(T, t)$ - верхние границы эффективных функции релаксации и прочности на растяжение, определенные из условия однородного деформированного состояния композита; T , t - температура и длительность действия нагрузки, при которых определяются характеристики асфальтобетона. При этом для нижней и верхней границ были получены зависимости от объемных долей соответствующих компонентов: минеральных зерен C_k , ориентированного C_{OV} и свободного вяжущего C_{CB} и пор C_D , а также их модулей упругости E_k , E_{OV} , E_{CB} и прочностей на растяжение R_k , R_{OV} , R_{CB} .

При определении "вилки" эффективных характеристик асфальтобе-

тона, минеральная часть которого состоит из частиц различных горных пород, предусмотрен учет свойств материала частиц каждой горной породы.

Поскольку в зависимости от температуры и длительности действия нагрузки деформационные и прочностные свойства минеральной и органической составляющих могут отличаться на несколько порядков, а объемная доля минерального материала в асфальтобетоне может приближаться к 0,8-0,85, то для направленного регулирования свойств асфальтобетона особое значение приобретает проектирование оптимального состава смеси.

2.3. Теоретическое исследование методики проектирования оптимальных зерновых составов асфальтобетонной смеси

В данной работе была решена задача о плотности упаковки шарообразных частиц различных диаметров, учтены несферичность реальных частиц, а также разброс их размеров в пределах фракций, принято во внимание образование ориентированной пленки битума на поверхности минеральных зерен. Таким путем была разработана математическая модель определения пористости минерального остова и остаточной пористости асфальтобетона в зависимости от зернового состава и содержания вяжущего.

Вначале решалась задача расчета объемной доли ρ (плотности упаковки), занимаемой в пространстве смесью случайно расположенных частиц заданного зернового состава. С этой целью был реализован и развит подход, предложенный М. Вайсом, а затем М. Гогендейком и недавно - Дж. Додсом при построении тетраэдральной модели упаковки шаров.

Рассматривалась плотная случайная упаковка сферических частиц n различных размеров. Частицы одинакового размера считали одним из компонентов упаковки. Если мысленно соединить центры соприкасающихся сфер отрезками, упаковка окажется разбитой на четырехгранники (неправильные тетраэдры), восьмигранники (неправильные октаэдры) и неправильные многогранники с иным количеством граней (трехгранные призмы, антипризмы Архимеда, тетрагональные додекаэдры и др.). При соединении центров любых четырех соприкасающихся частиц с радиусами R_1, R_2, R_3, R_4 ($1, j, k, l = 1, 2, \dots, n$) прямолинейными отрезками образуется разносторонний (неправильный) тетраэдр $ijkl$, шести соприкасающихся частиц с радиусами $R_m, R_n, R_1, R_2, R_3, R_4$ ($m, n, l, g, q, d = 1, 2, \dots, n$) - разносторонний октаэдр $mstgqd$ (рис. 1);

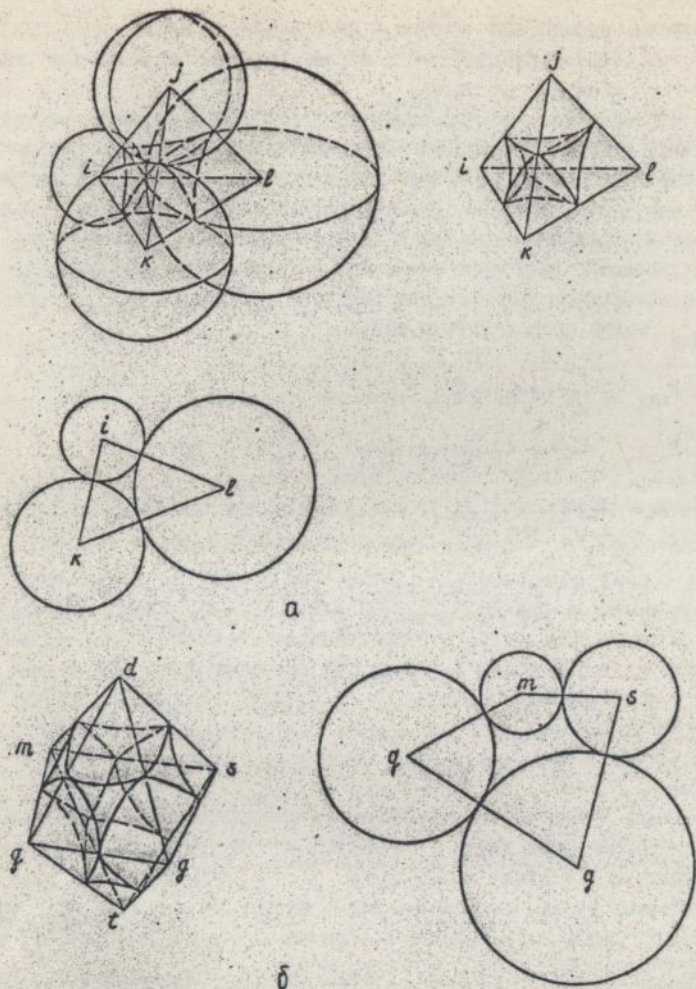


Рис. 1. Наиболее часто встречающиеся сочетания частиц:
 а схема образования тетраэдра и "треугольная" пора в трехмерном и
 двумерном изображениях; б "четырёхугольная" пора в трех- и двумер-
 ном изображениях; i, j, k, l и m, s, t, g, q, d - центры соприкасающихся
 частиц.

а другого количества частиц - многогранник иного вида. При этом известно, что тетраэдров и октаэдров гораздо больше, чем многогранников всех других видов.

Образованию многогранника каждого типа рассматривается как событие, имеющее несколько возможных исходов в виде появления с некоторой вероятностью в вершинах многогранника сферических частиц того или иного размера. В соответствии с известным в теории вероятностей обобщением теоремы о повторении опытов, в результате которых возможно несколько различных исходов, относительные частоты, с которыми в упаковке встречается тетраэдры P_{ijkl} и октаэдры P_{mstgqd} , можно представить в виде:

$$P_{ijkl} = \frac{4!}{n_i n_j n_k n_l} P_i^{n_i} P_j^{n_j} P_k^{n_k} P_l^{n_l},$$

$$P_{mstgqd} = \frac{6!}{n_m n_s n_t n_g n_q n_d} P_m^{n_m} P_s^{n_s} P_t^{n_t} P_g^{n_g} P_q^{n_q} P_d^{n_d}. \quad (2)$$

Здесь $P_\alpha = (f_\alpha / A_\alpha) / \sum_{\alpha=1}^n (f_\alpha / A_\alpha)$, $\alpha=1, j, k, l$ для тетраэдра, $\alpha=m, s, t, g, q, d$ для октаэдра, P_α - относительные частоты появления телесных углов A_α в сферах радиусом R_α ; n_i, \dots, n_l или n_m, \dots, n_d - число сфер соответственно с радиусом R_i, \dots, R_l или R_m, \dots, R_d в тетраэдре $ijkl$ или октаэдре $mstgqd$; f_α - относительное количество сфер, имеющих радиус R_α , в упаковке; A_α - средний телесный угол, образуемый гранями многогранников в сферах с радиусом R_α и определяемый как отношение суммы всех телесных углов, вырезаемых в сферах радиусом R_α , к их общему количеству в этих сферах; n - число компонентов упаковки.

Связь между объемными долями тетраэдров всех видов в упаковке T_v , октаэдров всех видов O_v и других многогранников всех видов X_v получена из следующих соображений. С одной стороны, общее количество телесных углов, вырезаемых всеми многогранниками во всех сферах упаковки, равно произведению общего числа сфер в упаковке на сумму $\sum_{\alpha=1}^n (f_\alpha / A_\alpha)$. С другой стороны, грани каждого тетраэдра вырезают в сферах 4 телесных угла, грани каждого октаэдра - 6, а грани каждого из многогранников остальных видов - в среднем x телесных углов. С учетом этого из условия заполнения всего пространства различными многогранниками, прилегающими друг к другу без "просвета" между гранями, можно прийти к выражению:

$$O_V = \left[\frac{\rho \sum_{\alpha=1}^n f_{\alpha} / A_{\alpha}}{8 \pi \sum_{\alpha=1}^n R_{\alpha}^3 f_{\alpha}} - \frac{2T_V}{3 \sum_T P_{ijkl} V_{ijkl}} - \frac{bX_V}{6 \sum_x P_x V_x} \right] \sum_0 P_{matgqd} V_{matgqd}, \quad (3)$$

где V_{ijkl} , V_{matgqd} , V_x - объемы тетраэдров $ijkl$, октаэдров $matgqd$ и многогранников x соответственно; \sum_T , \sum_0 , \sum_x - означают суммирование соответственно по тетраэдрам всех типов, октаэдрам всех типов и другим многогранникам всех типов; b - среднее количество вершин у многогранников других типов.

Для случайной упаковки одинаковых сферических частиц равенство (3) становится тождеством.

Искомая плотность упаковки ρ определяется как суммарная объемная доля зерен и может быть выражена формулой:

$$\rho = T_V \sum_T k_{ijkl} \rho_{ijkl} + O_V \sum_0 k_{matgqd} \rho_{matgqd} + X_V \sum_x k_x \rho_x, \quad (4)$$

где ρ_{ijkl} , ρ_{matgqd} , ρ_x - объемные доли материала частиц внутри соответствующего многогранника; k_{ijkl} , k_{matgqd} , k_x - объемные доли: тетраэдра $ijkl$ в общем объеме тетраэдров, октаэдра $matgqd$ в общем объеме октаэдров и многогранника x в общем объеме многогранников всех других типов, определяемые выражениями:

$$k_{ijkl} = (P_{ijkl} V_{ijkl}) / \sum_T (P_{ijkl} V_{ijkl}), \quad k_x = (P_x V_x) / \sum_x (P_x V_x),$$

$$k_{matgqd} = (P_{matgqd} V_{matgqd}) / \sum_0 (P_{matgqd} V_{matgqd}).$$

Кроме плотности упаковки, на основе теоремы Эйлера, связывающей между собой число вершин v , ребер e и граней w многогранника ($v+e-w=2$), было найдено среднее число контактов частиц любого данного размера R_{α} с соседними:

$$z_{\alpha} = \frac{4 \pi \sum_{\alpha=1}^n R_{\alpha}^3 f_{\alpha}}{f_{\alpha} \rho} \left[\frac{1}{2} \sum_T \frac{a_{ijkl}^{\alpha} K_{ijkl}}{V_{ijkl}} + \sum_0 \frac{a_{matgqd}^{\alpha} K_{matgqd}}{V_{matgqd}} + \left(\frac{X}{2} - 1 \right) \sum_x \frac{a_x^{\alpha} K_x}{V_x} \right] + 2, \quad (5)$$

$$K_{ijkl} = T_V k_{ijkl}, \quad K_{matgqd} = O_V k_{matgqd}, \quad K_x = X_V k_x,$$

где a_{ijkl}^{α} , a_{matgqd}^{α} , a_x^{α} - количество сфер с радиусом R_{α} , чьи центры являются вершинами тетраэдра $ijkl$, октаэдра $matgqd$ или многогранника x соответственно.

Общее среднее координационное число упаковки z можно представить в виде:

$$z = \sum_{\alpha=1}^n z_{\alpha} f_{\alpha}. \quad (6)$$

Если с учетом (5) пренебречь последним слагаемым в выражении (4), считая $X_V = 0$, а $T_V + O_V = 1$, то получим модель упаковки,

состоящей только из тетраэдров и октаэдров. Такая модель будет давать завышенные значения плотности и координационного числа, поскольку объемная доля материала частиц внутри тетраэдров и октаэдров выше, чем внутри многогранников других видов. Чтобы учесть наличие других типов многогранников в упаковке, можно принять $T_v + O_v = S_v$, где $0 < S_v < 1$.

Величина S_v имеет смысл суммарной объемной доли всех тетраэдров и октаэдров в упаковке. В частности, значение S_v можно оценить в первом приближении из известных данных Дж.Бернала о плотности и координационном числе случайной упаковки равных сферических частиц: $S_v = 0.86$, $T_v = 0.29$, $O_v = 0.57$.

Значение $S_v = 0.86$ было принято при проведении расчетов для упаковок частиц различных размеров, а значения T_v и O_v определялись из (3) с помощью итерационной процедуры.

Выражения (2)–(6) представляют собой основные уравнения, описывающие предлагаемую тетраэдрально-октаэдральную математическую модель плотной случайной упаковки частиц. Число этих уравнений зависит от количества компонентов в упаковке. При определении плотности упаковки ρ и среднего координационного числа z для двухкомпонентного зернистого материала решается система из 16 уравнений, для пяти компонентов число уравнений достигает 287, а для десяти компонентов (минеральная часть мелкозернистого асфальтобетона содержит 10 фракций) – 5732 уравнения.

Математическая модель использовалась для решения двух основных задач: определения плотности упаковки зернистого материала при заданном распределении частиц по размерам (прямая задача); определения требуемого зернового состава для получения упаковки заданной плотности (обратная задача). Конкретизация решения обратной задачи достигается введением ограничений на максимальные и минимальные размеры частиц, содержание отдельных компонентов, предельную стоимость смеси и т.д.

В математической модели применительно к асфальтовому бетону учтена несферичность зерен, а также наличие вяжущего. Отклонение формы зерен от сферической учтено введением эффективного размера частиц, равновеликих по объему зернам фактической формы, а также коэффициентов формы зерен и коэффициентов ширины фракции. Это позволяет представить фракции реального зернистого материала непрерывного зернового состава в виде дискретного набора однородных совокупностей равных сферических частиц (эквивалентных фракций).

Вяжущее в асфальтобетоне рассматривалось в двух состояниях: ориентированное, непосредственно взаимодействующее с минеральными

частицами и находящееся в виде пленки на поверхности частиц и в виде мениска в зоне их контакта; свободное вязущее, непосредственно не взаимодействующее с минеральными зёрнами и заполняющее пустоты между ними. Содержание ориентированного вязущего, находящегося в виде пленки на минеральных зёрнах, определялось из толщин пленки, рассчитанных на основании известных из литературы данных о битумоёмкости минеральных зёрен различных фракций и горных пород. Содержание ориентированного вязущего, находящегося в виде мениска в зоне контакта зёрен, определялось путем расчета объемов менисков для частиц различных фракций. При этом форма менисков описывалась уравнением Кельвина и учитывалось неполное смачивание поверхности зёрен. Содержание свободного вязущего определялось как разность общего содержания вязущего и суммарного содержания ориентированного вязущего, где общее содержанию вязущего в смеси может определяться из известных данных о битумоёмкости минеральных зёрен или задаваться.

Компьютерная реализация описанной математической модели позволяет анализировать и в краткие сроки осуществлять оптимизацию зерновых составов различных зернистых материалов и асфальтобетонных смесей.

2.4. Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования выполняли на бинарных (двухкомпонентных) и тернарных (трехкомпонентных) смесях шаров, полидисперсных смесях минеральных зёрен и асфальтобетонных образцах. При этом для смесей шаров и минеральных зёрен изучали изменения плотности и пористости в зависимости от состава смесей, а на асфальтобетонных образцах — влияние зернового состава минеральной части на физико-механические свойства асфальтобетона.

При исследовании упаковок бинарных и тернарных смесей шаров использовали методы математического планирования эксперимента. Эксперименты проводили по методике Г.Скотта. Смесь шариков засыпали в сосуд цилиндрической формы, высота которого более, чем в три раза, превышала его диаметр. Покачиванием и легким постукиванием по стенкам сосуда достигалась плотная случайная упаковка шаров, после чего определялась объемная доля шаров в этой упаковке.

Для определения коэффициентов формы несферических зёрен были выполнены эксперименты с смесями фракций минеральных частиц. Эксперименты выполняли на фракциях известнякового и гранитного щеб-

ня, отсева и природного кварцевого песка. Частицы каждой фракции помещали в цилиндрический сосуд и измеряли объем, занятый упаковкой минеральных зерен. Объем упаковки определялся как среднее результатов нескольких испытаний. Коэффициент формы зерен вычислялся как отношение плотности упаковки к произведению рассчитанного коэффициента ширины соответствующей фракции на плотность упаковки равных сферических частиц.

Экспериментальные исследования свойств асфальтобетона проводили на образцах из смесей 16 составов, которые относились к мелкозернистым типов А, Б и В, песчаным типа Г и дренирующей (по требованиям ГОСТ для высокопористых смесей). Все смеси готовили по стандартной методике в лабораторных условиях, а образцы формовали на секторном прессе. Испытаниям подвергали образцы в виде балок размером 16x4x4 см. Кроме того, из смеси дренирующего асфальтобетона изготавливали цилиндрические образцы с диаметром основания и высотой, равными 7 см, для определения фильтрационной способности.

По стандартным физико-механическим свойствам асфальтобетона, определяемым согласно ГОСТ 9128-84 и ГОСТ 12801-84, устанавливалось оптимальное содержание битума. Для асфальтобетонов из смесей с оптимальным содержанием битума определяли модуль упругости и сопротивление растяжению при изгибе при различных температурах, а также изменение сопротивления растяжению при изгибе после 10 циклов замораживания-оттаивания.

Кроме того, для образцов дренирующего асфальтобетона определяли дренирующую (фильтрационную) способность и сопротивляемость асфальтобетона колееобразованию. Для определения скорости дренирования на поверхность цилиндрического образца накладывали кольцо из пластилина, в которое вдавливали металлический стакан с наружным диаметром 71,4 мм и высотой 15 см. В стакан выливали 500 см³ воды и отсчитывали время, за которое вода полностью профильтруется через образец. Скорость фильтрации определялась как объем воды, проходящий через рассматриваемое сечение в единицу времени.

Для оценки стойкости дренирующего асфальтобетона к колееобразованию на приборе "TIRA-TEST" испытывали цилиндрические образцы и определяли модуль деформации асфальтобетона.

Результаты экспериментальных исследований (рис. 2, 3) подтвердили полученные теоретические решения.

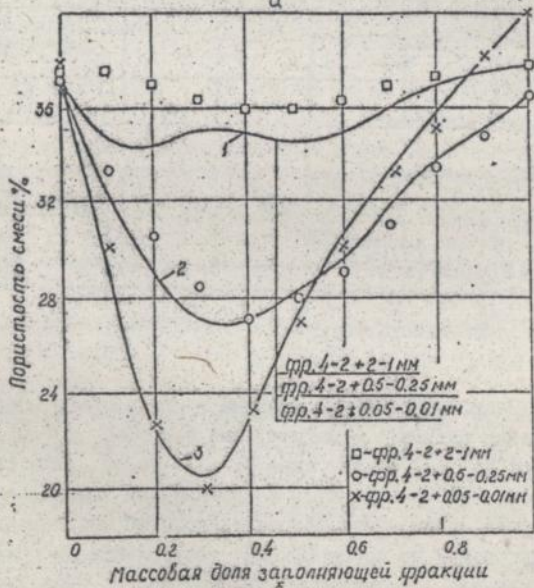
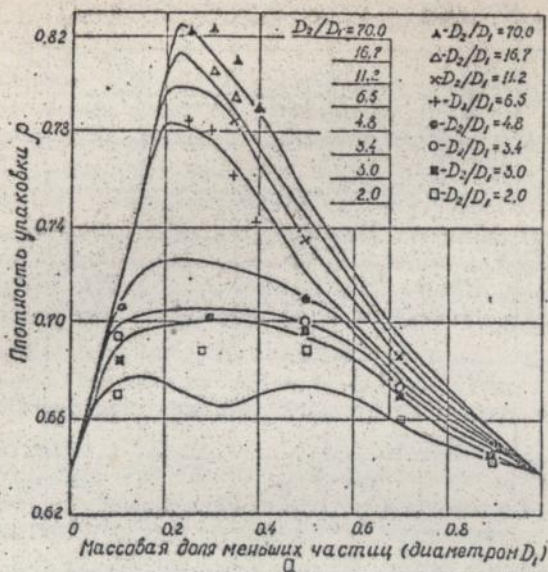


Рис. 2. Сравнение теоретических и экспериментальных данных: а) для бинарных смесей металлических и стеклянных шариков; 1...8 - теоретические кривые; для соотношения диаметров шариков $D_2/D_1 = 2.0$... $D_2/D_1 = 3.0$ приведены экспериментальные данные автора, для остальных соотношений - экспериментальные данные Р. Леккера; б) для смесей фракций минеральных зерен; 1, 2, 3 - теоретические кривые; точками обозначены экспериментальные данные Иванова и Охотина.

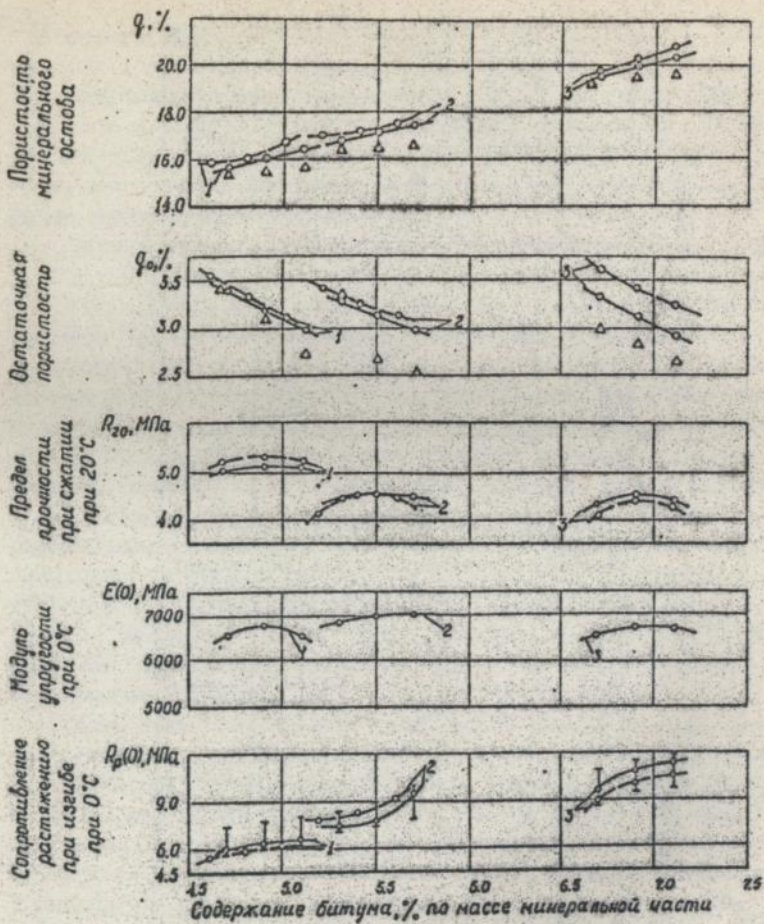


Рис. 3. Зависимость физико-механических свойств асфальтобетона от содержания битума: 1 - оптимальный зерновой состав для гранулометрии типа А; 2 - то же, типа Б; 3 - то же, типа Г; сплошная линия означает, что используется известняковый минеральный порошок (МП), пунктирная линия - что половину массы МП составляет природный песок, дробленный до крупности МП; треугольниками показаны теоретические значения, рассчитанные для составов с известняковым МП; I - диапазон возможных значений, рассчитанный по разработанным зависимостям для составов с известняковым МП.

2.5. Практическое применение результатов исследования

Результаты исследования предлагается использовать для проектирования составов асфальтобетонных смесей.

Разработанная математическая модель плотной случайной упаковки частиц реализована в виде двух компьютерных программ: PACKING для оптимизации гранулометрического состава зернистого материала и ASPHALT, которая позволяет с учетом пленок вяжущего на минеральных зернах и менисков вяжущего в контактах зерен рассчитать пористость минерального остова и остаточную пористость асфальтобетона. Каждая из программ дает возможность решать как прямую (определение пористости минерального остова и остаточной пористости), так и обратную (определение оптимального зернового состава и содержания битума) задачи. Эти программы были использованы для анализа рациональных зерновых составов.

Например, расчеты показали, что если не ограничиваться пределами зерновых составов по ГОСТ 9128-84, то плотнейший асфальтобетон с минеральной частью прерывистой гранулометрии получается из смеси 66% частиц фракции 20-40 мм, 26% частиц фракции 2.5-5 мм и 8% частиц фракции менее 0.071 мм. Пористость минерального остова такого асфальтобетона составляет 13.1%, а для получения остаточной пористости 2% необходимо 4.42% битума марки БНД 90/130.

По выполненным расчетам плотнейший асфальтобетон с минеральной частью непрерывной гранулометрии может быть получен из смеси, зерновой состав которой примерно соответствует формуле Фуллера с показателем степени 0.55. Такая "плотнейшая" смесь содержит 69% по массе щебеночных частиц (5-40 мм), 28% песчаных частиц (0.071-5 мм) и 3% частиц фракции менее 0.071 мм, что соответствует коэффициенту сбега 0.69 в формуле Н.Н.Иванова. Пористость минерального остова такого асфальтобетона составляет 13.3%, а для получения остаточной пористости 2% необходимо 4.53% битума марки БНД 90/130 (сверх 100% минеральной части).

Эти расчеты проводили для гранитного щебня, кварцевого песка и известнякового минерального порошка. При оптимизации стремились к минимальному расходу битума, учитывая необходимость образования пленки на всех зернах и получения заданной остаточной пористости асфальтобетона.

Рассчитанные нами зерновые составы минеральной части смесей, удовлетворяющих требованиям ГОСТ 9128-84, с гранулометрией типов А, Б, В, Г и Д, которые обеспечивают минимальную пористость минерального остова, приведены в табл. 1. "Плотнейшие" смеси содержат мак-

Таблица 1

Оптимальные зерновые составы минеральной части горячих и теплых смесей для плотных асфальтобетонов

Наименование и тип смеси	Массовая доля, %, частиц минерального материала мельче, мм											Содержание битума, % от массы минеральной части
	40	20	15	10	5	2.5	1.25	0.63	0.315	0.14	0.071	
Непрерывные зерновые составы												
Крупнозернистые смеси типов:												
А	95	65	55	45	35	24	17	12	9	9	9	4.7 - 5.1
В	95	79	70	62	50	39	28	20	14	9	9	5.3 - 5.7
Мелкозернистые смеси типов:												
А	100	95	78	60	35	24	17	12	9	8	8	4.8 - 5.2
В	100	95	85	70	50	39	28	20	14	9	8	5.4 - 5.9
В	100	95	89	80	65	52	39	29	20	12	11	6.1 - 6.5
Песчаные смеси типов:												
Г	-	-	-	100	95	68	45	29	18	11	10	6.8 - 7.2
Д	-	-	-	100	95	74	53	37	27	17	14	7.3 - 7.7
Прерывистые зерновые составы												
Крупнозернистые смеси типов:												
А	95	65	55	45	35	29	22	19	14	10	10	4.9 - 5.3
В	95	78	70	62	50	40	34	27	20	14	12	5.6 - 6.0
Мелкозернистые смеси типов:												
А	100	95	78	60	35	29	22	19	14	10	10	4.9 - 5.3
В	100	95	85	70	50	40	34	27	20	14	10	5.7 - 6.1

Таблица 2

Зерновые составы минеральной части смесей для многослойных плотных и дренирующих асфальтобетонов

Массовая доля, %, частиц минерального материала мельче, мм										Содержание битума, % от массы минеральной части
20	15	10	5	2.5	1.25	0.63	0.315	0.14	0.071	
Многослойная смесь для плотных асфальтобетонов										
95-100	55-78	42-60	27-35	17-27	10-17	6-12	4-11	3-10	2-9	4.5 - 5.5
В том числе: многослойная смесь, устойчивая к сегрегации минеральных зерен										
95-100	75-78	55-60	32-35	23-27	15-17	10-12	6-11	5-10	4-9	5.2 - 6.5
многослойная смесь, не устойчивая к сегрегации минеральных зерен										
95-100	55-75	42-55	27-32	17-23	10-15	6-10	4-6	3-5	2-4	4.5 - 5.2
Дренирующая смесь										
-	95-100	15-100	10-25	6-25	5-25	4-15	3-10	2-6	2-6	3.0 - 7.0

симальное количество щебня (песчаные смеси - максимальное количество частиц крупных фракций) и достаточное количество фракций мелкого песка и минерального порошка для создания плотнейшей упаковки минеральных частиц без раздвижки крупных зерен.

Рекомендуемые зерновые составы минеральной части многощебеннистых плотных и дренирующих асфальтобетонных смесей приведены в табл. 2. Расчеты показали, что приведенные составы многощебеннистых плотных асфальтобетонных смесей обеспечивают пористость минерального остова 13-17% по объему, остаточную пористость - 2-4% по объему, а составы дренирующих асфальтобетонных смесей обеспечивают пористость минерального остова 24-36% по объему, остаточную пористость - 18-26% по объему.

Приведенные зерновые составы были рассчитаны для усредненных условий г. Киева. При этом составы оптимизировались по расходу вяжущего и по стоимости. Такие расчеты целесообразно выполнять для каждого конкретного случая (набора исходных каменных материалов, набора фракций, задаваемых ограничений и т.д.).

Подтвердилась возможность и целесообразность замены части известнякового минерального порошка неизвестняковым материалом, дробленным до крупности минерального порошка. Это позволяет использовать в верхнем слое асфальтобетон высокой плотности и, вместе с тем, с пониженным расходом вяжущего. Такое покрытие целесообразно применять в сочетании с одним или двумя асфальтобетонными слоями. Это может позволить снизить стоимость конструкции дорожной одежды при том же сроке службы или увеличить срок службы конструкции дорожной одежды, не изменяя ее стоимости.

Результаты исследования были применены для ряда объектов при оптимизации зерновых составов минеральной части асфальтобетонных смесей, используемых в покрытиях дорог и аэродромов.

Так, был рассчитан зерновой состав дренирующего асфальтобетонного аэродромного покрытия для проекта "Разработка проектной документации на площадку для обработки жидкостью "Арктика" и мойки воздушных судов с соединительными РД и бетонным основанием под "зашенные или козловые фермы", разработанного для аэропорта Борисполь. Особенность этого объекта состояла в том, что нужно было одновременно обеспечить высокую остаточную пористость материала, открытую структуру пор и, вместе с тем, необходимые прочностные свойства (морозостойкость, температурную трещиностойкость, сдвигоустойчивость и др.).

Результаты работы нашли также применение при оптимизации (по расходу вяжущего, а в некоторых случаях - по стоимости смеси) зер-

новых составов минеральной части асфальтобетонных смесей, производимых заводом объединения Киевгоргидродормост для улиц и дорог г. Киева и Киевской области, а также асфальтобетонных смесей для дорог в Ленинградской области и г. Санкт-Петербурге.

Расчеты и испытания образцов смесей, проводившиеся для ряда конкретных объектов, свидетельствуют, что за счет оптимизации состава смеси на основе разработанных решений и алгоритмов может быть достигнута экономия приблизительно до 5-12% битума либо до 6-10% стоимости смеси по сравнению с составом, полученным по традиционной методике. Время счета по программе ASPHALT при определении расхода битума и остаточной пористости для исходного зернового состава из 10 фракций на ПЭВМ IBM PC 486 не превышает 5 минут. Это позволяет использовать разработанную программу для получения оптимальных составов смеси из имеющегося набора составляющих.

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработаны теоретические зависимости, связывающие предельное сопротивление растяжению и модуль упругости асфальтобетона с его составом. При этом определяется диапазон возможных значений сопротивления растяжению и модуля упругости при заданных температуре и длительности действия нагрузки. Полученные зависимости позволяют аналитическим путем проектировать составы асфальтобетона с заданными механическими характеристиками.

2. Получено решение задачи об объемной доле, занимаемой беспорядочно расположенными частицами зернистого материала, и о среднем числе контактов частицы с соседними в зависимости от зернового состава. Это позволяет определить пористость слоя зернистого материала данного зернового состава или рассчитать требуемый зерновой состав материала заданной пористости. Разработана программа PACKING для выполнения таких расчетов на ЭВМ

3. Получено решение задачи об определении пористости минерального остова и остаточной пористости асфальтобетона в зависимости от его состава. При этом учтено влияние вяжущего, находящегося в пленках, в зонах контакта зерен и в межзерновом пространстве, на пористость минерального остова и остаточную пористость. Это позволяет определить пористость минерального остова и остаточную пористость асфальтобетона из смеси заданного зернового состава или рассчитать требуемые зерновой состав и содержание вяжущего для получения асфальтобетонного слоя с заданными пористостями

минерального остова и остаточной пористостью.

4. Экспериментально подтверждена достоверность полученных зависимостей для определения пористости слоя зернистого материала; пористости, модуля упругости и прочности на растяжение асфальтобетона. Получены экспериментальные данные о влиянии зернового состава минеральной части смеси на физико-механические свойства асфальтобетона.

5. Разработаны предложения по методике проектирования зернового состава смеси из имеющегося набора минеральных составляющих.

Даны рекомендации по совершенствованию нормативных требований к зерновому составу асфальтобетонных смесей. Предложены зерновые составы минеральной части мелкозернистых смесей для многослойных плотных и дренирующих асфальтобетонов.

Разработана программа ASPHALT для оптимизации состава асфальтобетонной смеси по стоимости либо расходу вяжущего с помощью ЭЭВМ.

Результаты исследования применены для оптимизации состава дренирующего асфальтобетона аэродромного покрытия, оптимизации состава асфальтобетонной смеси с целью повышения температурной трещиностойкости покрытия, а также оптимизации состава асфальтобетона в комплексе с расчетом дорожной одежды.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Свистула И.И., Цеханский О.Э., Мозговой В.В. Температурные напряжения в асфальтобетонном покрытии при его устройстве в холодное время года // Перспективные экономичные и долговечные конструкции автомобильных дорог и технология их сооружения // Тезисы докладов научно-технической конференции, Владимир, 1987.
2. Мозговой В.В., Цеханский О.Э. Влияние поперечных трещин и швов укрепленного основания на температурную трещиностойкость асфальтобетонного покрытия // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво, 1988, вып. 42, с. 66-72.
3. Свистула И.И., Цеханский О.Э., Мозговой В.В. Повышение точности экспериментального определения температурной трещиностойкости асфальтобетона // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво, 1988, вып. 43, с. 52-57.
4. Цеханский О.Э., Свистула И.И., Мозговой В.В. К вопросу применения ускоренных методов строительства асфальтобетонных покрытий в холодное время года // Скоростное строительство и новые материалы для дорожного строительства // Тезисы докладов научно-технической конференции, Владимир, 1988.
5. Радовский Б.С., Мерзликин А.Е., Малеванский Г.В., Мозговой В.В., Головкин С.К., Цеханский О.Э., Пашинская Л.И. Автоматизированный расчет жестких дорожных одежд городских улиц и дорог на примере г. Киева // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво, 1989, вып. 45, с. 3-9.
6. Пешинская Л.И., Цеханский О.Э. Влияние типа гранулометрического состава асфальтобетона на экономичность и материалоемкость дорожной одежды // Ресурсосберегающие технологии, структура и свойства дорожных бетонов // Тезисы докладов научно-технической конференции, Харьков, 1989, с. 22-23.
7. Свистула И.И., Цеханский О.Э., Мозговой В.В. Температурная трещиностойкость щебня, обработанного битумом, в слоях дорожной одежды // Ресурсосберегающие технологии, структура и свойства дорожных бетонов // Тезисы докладов научно-технической конференции, Харьков, 1989, с. 24-25.
8. Цеханский О.Э. Повышение прочности и долговечности асфальтобетона путем расчета его оптимального зернового состава с помощью математической модели минеральной части // Научно-техническое обеспечение выполнения постановления по строительству автомобильных дорог в Нечерноземной зоне РСФСР // Тезисы докладов научно-технической конференции, Совздорнии, 1989, с. 22-23.
9. Цеханский О.Э. Оптимизация состава асфальтобетонной смеси с помощью математической модели минеральной части // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво, 1991, вып. 48, с. 77-81.
10. Радовский Б.С., Цеханский О.Э. Оптимизация состава асфальтобетонной смеси с помощью модели беспорядочной упаковки частиц // Известия вузов. Строительство, 1993, № 1, с. 92-98.

Анотація

Цеханський О.Е. Підвищення міцності дорожнього асфальтобетону шляхом оптимізації зернового складу суміші.

Дисертація у вигляді рукопису на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук з спеціальності 05.23.05 - "Будівельні матеріали та виробы". Харківський державний автомобільно-дорожній технічний університет, Харків, 1995 р.

Захищається розроблена методика підвищення міцності дорожнього асфальтобетону шляхом оптимізації зернового складу суміші. Виведено залежності міцності та деформаційних властивостей асфальтобетону від складу асфальтобетонної суміші. Знайдено нове рішення задачі про щільність та координаційне число упаковки полідисперсної суміші твердих частинок в залежності від зернового складу цієї суміші. Розроблено модель, що дозволяє оптимізувати склад асфальтобетонної суміші з метов одержання асфальтобетону максимальної щільності або - досягнення заданих пористості мінерального остову та залишкової пористості асфальтобетону при мінімальній витраті в'язучого.

Ключові слова: зерновий склад, упаковка, щільність упаковки, дорожній асфальтобетон, розтяг при згині, модуль пружності, міцності та деформаційні властивості.

Abstract

Tsekhansky O.E. Increase of road asphalt concrete strength by means of optimization of mixture grading.

A thesis is submitted for a candidate's degree of engineering sciences on profession 05.23.05 - "Engineering materials and wares", Kharkov State Automobile and Highway Engineering Technical University, Kharkov, 1995.

The developed methods of increase of road asphalt concrete strength are defended. The relationships of strength and deformation properties of asphalt concrete depending on composition of asphalt concrete mixture are developed. The new solution of the problem of density and coordination number of packing of multidisperse mixture of hard particles depending on mixture grading is obtained. The model which allows to optimize asphalt concrete mixture grading with the aim to obtain asphalt concrete of maximal density or to reach the given porosity of asphalt concrete with the minimal bitumen content is developed.

Key words: grading, packing, packing density, road asphalt concrete, tensile strength, elasticity module, strength and deformation properties.

Подписано в печать 15.12.95. Формат 60х84/16. Бумага типограф.
Офсетная печать. Усл.кр.-отт.7. Усл.печ.л.1,39. Уч.-изд.л.1,5.
Тираж 100 экз. Заказ № 232-1. Цена . Изд. № 275/Ш.

Издательство КМУГА.

252058. Киев-56, проспект Космонавта Комарова, 1.



AB 33.790