

Ю.Г. Бабаскин

У

КРЕПЛЕНИЕ ГРУНТОВ

ИНЪЕКТИРОВАНИЕМ



при ремонте
автомобильных дорог

Ю. Г. Бабаскин

**УКРЕПЛЕНИЕ ГРУНТОВ
ИНЪЕКТИРОВАНИЕМ
ПРИ РЕМОНТЕ
АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ**

Минск
УП "Технопринт"
2002

Бабаскин Ю.Г. **Укрепление грунтов инъектированием при ремонте автомобильных дорог** /Под ред. И.И.Леонovichа — Мн.: УП “Технопринт”, 2002. — 177 с. ISBN 985-464-302-6

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

БУСЕЛ Алексей Владимирович – д. техн. наук

ВЫРКО Николай Павлович – д. техн. наук, профессор

СОБОЛЕВСКИЙ Дмитрий Юрьевич – д-р техн. наук, профессор

Монография содержит результаты теоретических и экспериментальных исследований по укреплению грунтов вяжущими материалами, вводимыми в грунт при поверхностном и глубинном инъектировании. Показана возможность усиления бетонных дорожных конструкций без ее разрушения. Установлены зависимости между технологическими параметрами нагнетания. Произведена оценка качественного состояния дорожной конструкции, при которой автомобильная дорога, как объект изучения, рассмотрена в трех состояниях: как новая конструкция, конструкция подверженная дефектам и отремонтированная.

Монография рассчитана на научных работников, занимающихся вопросами теории и практики применения способа инъектирования при укреплении грунтов во время строительства и ремонта автомобильных дорог, инженерно-технических работников и студентов строительных специальностей.

Табл. 17. Ил. 53. Библиогр. 109 назв.

ВВЕДЕНИЕ

В Республике Беларусь имеется свыше тысячи семисот километров автомобильных дорог различной категории с цементобетонным покрытием. Больше всего их построено в Минской области. По территории Беларуси проходит почти 600 км самой оживленной транспортной магистрали Лондон — Берлин — Варшава — Минск — Москва, имеющей участки с цементобетонным покрытием, расчетный срок службы которых, по зарубежным данным, составляет 30–40 лет, по российским 20–25 лет.

Цементобетон по сравнению с асфальтобетоном имеет много положительных технических качеств: он более прочен, менее подвержен действию повышенных температур в жаркое время года, обладает необходимым сопротивлением трению, возникающему при интенсивном движении транспорта. Он относительно мало истирается (0,1 мм в год), толщина покрытия из него не превышает 16–24 см.

На цементобетонное покрытие в течение всего срока службы действует целый комплекс всевозможных факторов:

- механическое воздействие автомобильного транспорта, вызывающее в бетоне напряжения при изгибе и абразивный износ поверхностных слоев;
- суточные и годовые изменения температуры и относительной влажности воздуха, сопровождающиеся циклическим замораживанием-оттаиванием, что приводит к возникновению в бетоне растягивающих или сжимающих напряжений;
- неравномерные деформации земляного полотна, вызванные гидрогеологическими условиями нахождения трассы дороги, пучением грунтового основания при зимнем промерзании или весеннем оттаивании, которые вызывают в бетоне растягивающие напряжения при изгибе;
- применение химических реагентов для борьбы со снежно-ледяными образованиями и влияние химических соединений окружающей среды, при

этом совместное воздействие на цементобетон мороза и антигололедных химических реагентов гораздо агрессивнее, чем действие только отрицательных температур.

Воздействие всех этих факторов приводит к возникновению различного рода дефектов:

- трещин различной конфигурации и направления относительно расположения цементобетонной плиты. На наш взгляд, трещина является начальным показателем любого дефекта и ведет к развитию и переходу в другие виды разрушения;

- поверхностного разрушения различной интенсивности в виде сплошного или очагового шелушения, раковин, каверн, выбоин различной глубины и площади;

- коррозии цементобетона как материала, в котором происходят внутренние деструктивные процессы, уничтожающие сцепление между заполнителями и цементным камнем.

В связи с этим проблема долговечности цементобетонных покрытий носит комплексный характер, включая конструктивный, материаловедческий и технологический аспекты.

При анализе метода борьбы с дефектами на цементобетонном покрытии автомобильных дорог установлено, что в настоящее время все существующие способы и методы направлены на ликвидацию локального нарушения прочности в самой дорожной цементобетонной плите. Другими словами, бетон с нарушенными структурными связями заменяется на новый, а изоляция цементобетона от воздействия агрессивных противогололедных смесей осуществляется путем укладки слоя асфальтобетонного покрытия. При этом не принимаются или недостаточно принимаются во внимание деформации, возникшие в земляном полотне или в основании цементобетонной конструкции. Все материалы, применяемые в настоящее время для ремонта, по своей прочности ниже прочности цементобетона, следовательно, они не могут увеличить прочность всей конструкции, а выполняют лишь роль изолятора.

Дефект в виде трещины будет продолжать развиваться, если не создать прочную основу, исключаящую деформацию всей плиты. Причем сделать это необходимо не при строительстве, когда до укладки цементобетона основание можно усиливать всеми известными способами, а при ремонте, когда покрытие уже просуществовало несколько лет и под воздействием вышесписанных факторов стали возникать различного рода дефекты. Кроме того,

следует учесть, что если дефект возник по причине деформации основания, то трещина, появившаяся в покрытии, будет продолжать развиваться и в основании. В этом случае единственным способом усиления всей дорожной конструкции является усиление основания, чтобы прекратить вертикальные деформации покрытия. Это возможно при использовании способа инъектирования, причем без какого-либо разрушения цементобетонного покрытия.

Инъектирование в данном случае рассматривается как способ внесения вяжущего вещества в пористую среду грунта или дорожно-строительного материала.

Процессы, связанные с распространением закрепляющего раствора в пористой системе, относятся к технологическим — это зависимость скорости, расхода и радиуса распространения раствора от создаваемого давления, времени нагнетания, конструкции инжектора, вязкости или плотности раствора, наличия воды в порах грунта и других факторов.

Процессы, происходящие при обработке грунта, относятся к химическим. Результаты адгезионного сцепления минеральных частиц с вяжущим веществом и когезионного сцепления молекул внутри вяжущего вещества характеризуются прочностью закрепленного массива и его морозостойкостью.

Процессы, связанные с работой цементобетонной конструкции, усиленной массивами укрепленного грунта, относятся к расчетным эксплуатационным показателям, основным из которых является упругая деформация, подтверждающая равномерность работы всего цементобетонного покрытия, включая и в местах ранее существовавших дефектов.

Для изучения всех перечисленных процессов выполнены теоретические исследования, включающие вывод уравнений для определения радиуса распространения раствора в зависимости от технологических факторов при ламинарном режиме течения жидкости в порах грунта, обеспечивающем наиболее эффективное распространение раствора; обоснование модели цементобетона с позиции принципа континуумизации, объясняющей возникновение и развитие различных видов дефектов и их взаимное влияние друг на друга и в целом на состояние цементобетонного покрытия.

Следует отметить, что все исследования, приведенные в данной работе, основываются на теориях и положениях, раскрытых и развитых в трудах многих отечественных и зарубежных ученых. Оновоположниками отечественного развития способов искусственного улучшения грунтов являются М. М. Филатов и В. В. Охотин. Особая роль в разработке теоретических основ на-

правленного структурообразования и формирования заданных свойств укрепленных грунтов на основе использования принципов физико-химической механики дисперсных тел принадлежит академику П. А. Ребиндеру.

Большое влияние на развитие теории и практики химического закрепления грунтов оказали работы М. Г. Кострико, В. М. Безрука, А. Н. Адамовича, Е. М. Сергеева, С. С. Морозова, М. Н. Першина, В. М. Кнатько, Б. И. Врублевского, Т. М. Луканиной и многих других ученых.

Вопросам фильтрации жидкости в пористой системе грунта посвящены работы Н. Е. Жуковского, Н. Н. Павловского, Л. С. Лейбензона, Д. С. Вилькера, Б. Б. Лапука, Г. Н. Каменского и др.

Инъектированию грунтов посвящены исследования Б. А. Ржаницына, В. Е. Соколовича, В. П. Горбунова, Д. В. Волоцкого, Е. В. Степановой, Н. А. Блескиной, А. Н. Мещерякова и др.

Процессы происходящие в цементобетоне отражены в работах И. Н. Ахвердова, М. А. Шалимо, Л. Я. Лаврега, И. М. Грушко, Н. Ф. Глущенко, М. В. Бунина, Т. Ю. Любимовой, В. М. Москвина и др.

Расчет инженерных конструкций на упругом основании выполнен и представлен в работах М. И. Горбунова-Посадова, И. А. Симвулиди, Т. А. Маликова, Н. М. Герсеванова, В. Г. Березанцева, К. Терцаги, Н. Н. Маслова и других исследователей.

В настоящей работе изложены результаты научных исследований, выполненные по разработке теоретических и технологических основ укрепления грунтов способом инъектирования при ремонте автомобильных дорог с цементобетонным покрытием на протяжении 1975–2002 годов. Разработка технологических процессов производилась под руководством доктора технических наук, профессора Ивана Иосифовича Леоновича. Автор выражает глубокую признательность докторам технических наук, профессорам Н. П. Вырко, Д. Ю. Соболевскому, а также доктору технических наук А. В. Буслу за помощь при обсуждении результатов работы и советы по улучшению содержания рукописи.

1. ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ И ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СПОСОБА ИНЪЕКТИРОВАНИЯ ПРИ УКРЕПЛЕНИИ ГРУНТОВ

Сущность способа инъектирования, относящегося к способам укрепления грунтов, заключается во введении под давлением через иньектор закрепляющего раствора, который распространяется в поровом пространстве грунта и образует области пропитки, размеры которых зависят от технологических параметров нагнетания, свойств грунта и вяжущего материала.

Способ инъектирования грунтов начал применяться во Франции в начале XIX в. Изобрел его в 1802 г. Бериньи (Berigny), успешно инъектировавший цементные растворы, с пуццолановыми добавками [1]. Инженеры того времени инъектировали растворы под действием силы тяжести, а в настоящее время в гражданском строительстве давление достигает 30–40 МПа.

Широкое признание метод нашел только в 1920–1930 г. , в период развития плотиностроения.

Для инъектирования растворов в песчано-гравийные породы в течение многих лет применялся метод Джустена (Joosten), заключающийся в последовательном нагнетании в грунт силиката натрия и реактива, вызывающего образование геля. Однако этот метод оказался дорогим и неприемлемым для использования в мелкозернистых песках [2].

В 1938 г. А. Майером (A. Mayer) были предложены глинистые растворы для создания противифльтрационных завес в гидротехнических сооружениях.

В настоящее время развитие способов укрепления грунтов идет по двум направлениям. Первое объединяет способы, основанные на перемешивании грунта с вяжущим материалом, второе — способы пропитки.

Способы смешения заключаются в распределении вяжущего материала в поровом пространстве грунта при их тщательном перемешивании. Это одинаково эффективно как для закрепления грунтов так называемыми поверхностными способами, нашедшими развитие в дорожном и аэродром-

ном строительстве, так и глубинными — перемешивании грунта с вяжущим материалом с помощью глубинных фрез и шнеков. При закреплении грунтов способом смешения в дорожном строительстве обязательным является выполнение ряда технологических операций: предварительного рыхления и размельчения грунтовых агрегатов; точного дозирования и перемешивания составляющих компонентов; распределения и укладки готовой смеси; максимального уплотнения и ухода за укрепленным грунтом.

Способы пропитки заключаются в нагнетании вяжущих растворов в грунт. Эффективность этих способов зависит от фильтрационных свойств грунта (пористости) и проникающей способности раствора (вязкости).

Вопросы глубинного инъекционного закрепления грунтов в общестроительной практике освещены в работах Б. А. Ржаницына (1931), В. Е. Соколовича (1939), А. Н. Адамовича (1947), М. Пападакиса (1955), Б. П. Горбунова (1960), Н. А. Блескиной (1964), А. Камбефора (1964), В. М. Марголина (1969), Н. Ш. Белевитиной (1971), Л. В. Гончаровой (1973), С. Д. Воронкевича (1974), Д. Ю. Соболевского (1994) и других исследователей. Они наибольшее внимание уделяли подбору рецептур закрепляющих растворов и разработке технологических параметров.

В дорожной практике вопросы инъекции закрепляющих растворов для повышения устойчивости откосов отражены в работах Д. В. Волоцкого (1978), Р. З. Порицкого (1971), Ш. Х. Нетфуллоа (1985).

Критерий для установления возможности инъекции песчаных пород [3] выражается соотношением:

$$\frac{D_{15}(\text{порода})}{D_{85}(\text{раствор})} > 25, \quad (1.1.)$$

где D_{15} — эффективный диаметр частиц грунта, мм; D_{85} — характерный диаметр наиболее крупных частиц раствора, мм.

Американский исследователь Граф для определения проникающей способности раствора пользуется следующим критерием:

$$N \equiv \frac{D_{10}(\text{породы})}{D_{95}(\text{раствор})} \quad (2.2.)$$

При $N < 6$ частицы раствора совершенно не проникают в поры породы; $N = 8$ — предельное значение критерия, при котором возможна инъекция раствора; а при $N > 11$ всегда возможно успешное инъектирование.

Нагнетание цементных, цементно-силикатных, цементно-известковых, цементно-глинистых суспензий наиболее эффективно в грунты с коэффициентом фильтрации более 30–50 м/сутки.

Горячая битумизация (битум при температуре 180–200° С) возможна на грунтах с коэффициентом фильтрации свыше 120–150 м/сутки, а холодная, с использованием битумных эмульсий, на грунтах с Кф от 10 до 120 м/сутки.

При использовании в качестве закрепляющих растворов силиката натрия границы применимости способа инъектирования можно расширить. На грунтах с Кф от 0,1 до 2 м/сутки используется метод однорастворной силикатизации, а с Кф от 2 до 120 м/сутки — метод двухрастворной силикатизации.

Синтетические смолы позволяют расширить диапазон применения способа инъектирования до грунтов, характеризующихся коэффициентом фильтрации до 0,05 м/сутки.

Отходы целлюлозно-бумажной промышленности (сульфитно-спиртовая барда или бражка) позволяют закреплять грунты с коэффициентом фильтрации от 0,1 до 0,05 м/сутки.

Способы инъектирования особенно эффективно применяются в гражданском строительстве при сооружении фундаментов, в гидротехническом, при сооружении противофильтрационных завес, в горнопроходческих работах. Глубина нагнетания раствора достигала: 170 м (Асуанская плотина, 1965–1969 гг); 120 м (плотины Сильвенштейн, 1956–1958 гг., и Серр-Понсон, 1952–1958 гг); 100 м (плотина Маттмарк, 1964–1966 гг).

При закреплении грунтов способом пропитки основными операциями являются: приготовление закрепляющих растворов, погружение и извлечение инъекторов и сам процесс нагнетания раствора.

В дорожном строительстве способ инъектирования применяется при ликвидации нарушения общей и местной устойчивости земляного полотна [4, 5, 6, 7, 8, 9]: пучинных деформаций, оползней откосов, сплывов, суффозионных разрушений, повреждений и разрушений тела земляного полотна. К 1977 году построено свыше 15 тыс. км дорожных оснований и покрытий из грунтов, укрепленных цементом, битумом, битумными эмульсиями, тяжелыми нефтями, известью и другими реагентами [6].

На отечественных дорогах имеется ряд участков, на которых земляное полотно укреплено глубинными химическими методами. В 1969 г. в г. Казани на насыпи высотой 12 м, сложенной пылеватыми супесями и суглинками, производили укрепление откоса.

На дороге Горький — Казань на откосе высотой 5 м в 1971 году сделана подпорная стенка методом инъектирования. На дороге Сеченово — Кочетовка в Горьковской области были проведены работы по глубинному известкованию грунтов.

В 1974 году на дороге Кишинев — Полтава в выемке создавалась противофильтрационная завеса на глубину 8–10 м путем нагнетания карбамидной смолы УКС.

В 1971–73 г. на дорогах Белорусской ССР производилась ликвидация пучинистых участков путем глубинного закрепления грунтов [7, 8]. Всего закреплены грунты на восьми пучинистых участках общей протяженностью 1850 п. м. Использовались растворы на основе битума, этилсиликата натрия (ГКЖ-10), силиката натрия и других реагентов. Грунты представляли собой пылеватую супесь с коэффициентом фильтрации 0,08 м/сут, пористостью 28–32% и естественной влажностью равной 7–10% в период закрепления.

Богатый опыт по глубинному закреплению грунтов накоплен за рубежом.

С 1959 г. в США применяется глубинное известкование на железных дорогах (штат Арканзас). Закреплен участок протяженностью 160 км и глубиной от 2 до 6 м. В штате Оклахома глубинным известкованием стабилизированы многие неустойчивые участки автомобильных дорог по скважиной технологии.

Во Франции широко применяется химическое закрепление грунтов. Преимущество отдано (до 90%) растворам на основе силиката натрия. Высокий уровень механизации позволяет доводить давление нагнетания до 10–15 МПа, а в шахтном строительстве до 30–40 МПа. В Париже при строительстве тоннеля диаметром 10 м, а также метрополитена фирма “Солетанш” производила закрепление грунта раствором смолы.

В Канаде, Швеции, Норвегии, в северных штатах США применяют глубинное закрепление при борьбе с пучинами на автомобильных и железных дорогах путем нагнетания растворов на основе лигносульфонатов.

В Англии при строительстве моста в г. Ричмонде через р. Темзу, а также проходке тоннелей, устройстве набережных применялась двухрастворная и однорастворная силикатизация, цементация, горячая и холодная битумизация, смолизация.

В ФРГ применяется глубинный способ закрепления верхней части земляного полотна под балластным слоем на железных дорогах и под дорожной одеждой на автомобильных дорогах. В качестве примера можно привести

реконструкцию в 1971 году в г. Гамбурге городской улицы с асфальтобетонным покрытием. Для усиления основания в асфальтобетонном покрытии пробивались в шахматном порядке через 3 м отверстия диаметром 40 мм, в них вставлялись инъекционные трубы несколько большего диаметра, (50 мм), и через них под давлением до 1,5 МПа нагнеталась суспензия цементного шлама. Обработанный днем участок набирал необходимую прочность и вечером открывался для движения [6].

В Японии широко применяется глубинное химическое закрепление грунтов при проходке тоннелей, при прокладке автомобильных и железных дорог. Технология работ позволяет закреплять в неоднородных напластованиях любые небольшие прослойки грунта, толщиной 20–30 см. Особенность глубинного закрепления в Японии состоит в том, что инъекторы после нагнетания, как правило, не извлекаются, а образуют в закрепленном массиве грунта своеобразную пространственную арматуру. Разработана новая технология инъекции цементных растворов, основанная на предварительном образовании в грунтовом массиве разрывов при помощи воздушно-водяной струи, нагнетаемой под давлением до 50 МПа.

В Польше особенно широко распространено электрохимическое закрепление. В Венгрии и Румынии для стабилизации оползневых процессов применяют химическое закрепление околосвайного пространства. В Чехии применяют комбинированные методы, сочетающие глубинное закрепление грунта силикатом натрия с укладкой пленочных материалов.

В 1980 году изобретен способ укрепления грунта [10], который рекомендован для использования в дорожном строительстве. Сущность способа заключается в том, что после отсыпки насыпи необходимой высоты и создания профиля земляного полотна с предварительным уплотнением осуществляется последовательное погружение в грунт инъекторов, смонтированных рядами на раме передвижного средства в шахматном порядке, и нагнетание через инъекторы вяжущего материала под давлением с перекрытием сопрягаемых зон укрепления. Этим изобретением предпринята попытка по распространению способа инъектирования для закрепления поверхностных слоев земляного полотна или грунтового основания в дорожном и аэродромном строительстве.

На основании проведенного анализа по применению способа инъектирования в отечественном и зарубежном строительстве можно заключить, что инъектирование широко используется в основном для глубинного укрепле-

ния грунтов. В дорожном строительстве оно нашло применение при нагнетании раствора в основание земляного полотна или откосы на глубину, при которой мощность грунта над областью пропитки предотвращает выход раствора на поверхность. При таком способе практически не ограничиваются давление и время нагнетания.

Выводы по главе 1

Инъектированием называется введение в грунт под давлением раствора на основе вяжущего вещества, заполняющего поровое пространство грунта и образующего области пропитки, размер которых зависит от технологических параметров нагнетания, свойств грунта и раствора, а после затвердения вяжущего вещества — область закрепленного грунта.

Изобретен способ инъектирования в 1802 году во Франции.

Существуют критерии для проникания в грунты суспензий, составленных на основе цементов, представляющие собой соотношения диаметров зерен грунта и наиболее крупных частиц суспензии. Растворы вяжущих веществ практически не ограничиваются в применимости в способе инъектирования, а для эффективного их использования следует учитывать их вязкость.

Наиболее эффективными вяжущими веществами для инъектирования являются синтетические смолы, силикат натрия и отходы целлюлозно-бумажной промышленности.

В строительной практике наибольшее распространение получил способ глубинного инъектирования, в котором глубина нагнетания достигала 170 и более метров. В дорожном строительстве глубина нагнетания раствора составляет примерно 4–10 м, а способ применяется при ликвидации деформаций земляного полотна или закреплении слабых грунтов. В обоих случаях массив грунта, расположенный над областью пропитки, не позволяет раствору выходить на поверхность, а следовательно, давление и время нагнетания могут достигать больших значений.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ НАГНЕТЕНИЯ ВЯЗКИХ РАСТВОРОВ В ПОРИСТУЮ СРЕДУ ГРУНТА

2. 1. Проницаемость грунта при ламинарной фильтрации жидкости

Согласно закону Дарси, скорость ламинарной фильтрации выражается уравнением

$$W = K_{\phi} I, \quad (2.1)$$

где K_{ϕ} — коэффициент фильтрации грунта, I — гидравлический градиент, определяемый из выражения:

$$I = \frac{P_1 - P_2}{h}. \quad (2.2)$$

Изучению коэффициента фильтрации посвящены работы многих исследователей. В теории фильтрации известны математические выражения выведенные Зельгеймом, Алланом Газена, И. И. Заурбреем, Е. А. Замариным, Крюгером, Донатом. При лабораторных исследованиях фильтрационных свойств грунтов этот показатель вычисляется из выражения

$$K_{\phi} = \frac{864}{t T} h_1 f \left[\frac{S}{H_0} \right]. \quad (2.3)$$

где h_1 — высота образца грунта в трубке, см; 864 — переводной коэффициент из см/с в м/сутки; t — время падения уровня воды, с; $T = (0,7 + 0,03 T_{\phi})$ — температурная поправка в условиях фильтрации воды при температуре 10°C ; T_{ϕ} — фактическая температура воды во время опыта; S — наблюдаемое падение уровня воды в пьезометре, отсчитанное от первоначального уровня, см; H_0 — начальный напор, см; $f = \left[\frac{S}{H_0} \right]$ — безразмерный коэффициент, определяемый по таблицам.

Все составляющие определяют по методике, изложенной в ГОСТ 25584-90 на приборе СоюздорНИИ.

Грунты представлены частицами различной крупности, а поры — каналами, имеющими переменное сечение и переплетающимися между собой. Поэтому при изучении фильтрации в основу положен статистический метод. Частицы грунта имеют неправильную форму и самые разнообразные размеры, исследование вязкой жидкости и решение уравнений для нее производилось с учетом допущения, что гидродинамическая фильтрация осуществляется на идеальном или фиктивном грунте. Причем под идеальным понимается грунт, у которого все поры цилиндрические, и оси цилиндров параллельны между собой, а под фиктивным — грунт, сложенный из одинаковых шарообразных частиц.

Слихтер путем простых геометрических преобразований определил пористость фиктивного грунта и установил, что она не зависит от диаметра шарообразных частиц, а зависит только от их относительной конфигурации, обуславливаемой величиной угла Θ (рис. 2.1).

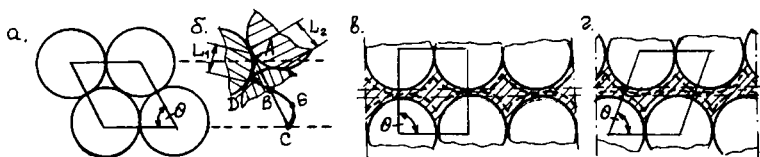


Рис. 2. 1. Расположение минеральных частиц в фиктивном грунте: а — смещение частиц при рядной упаковке; б — траектория движения жидкости в поровом пространстве; в — поры в фиктивной рядной упаковке; г — поры в фиктивной шахматной упаковке.

Рассматривая модель фиктивного грунта, можно установить, что движение элементарной струйки между шарообразными частицами фиктивного грунта осуществляется по криволинейной траектории, искривленной в пространстве. Слихтер исследовал изменение поперечного сечения канала при плотном расположении шаров ($\Theta = 60^\circ$) и установил, что траектория имеет как сужения, так и расширения. Наименьшее поперечное сечение порового канала является криволинейным треугольником (точка А на рис. 2. 1, б). Далее сечение понемногу увеличивается до наибольшего в точке D, а затем снова падает до своей первоначальной величины в точке В. В дальнейшем проис-

ходит увеличение порового пространства до максимума в точке G и уменьшение до первоначальной величины в точке C.

Пористость, по фундаментальной формуле Сликтера, характеризующей фиктивный грунт, равна:

$$n = 1 - \frac{\pi}{6(1 - \cos \Theta)\sqrt{1 + 2 \cos \Theta}} \quad (2.4)$$

Поскольку крайние значения угла Θ равны 60° и 90° , следовательно экстремальные значения пористости $n_{\min} = 0,259$; $n_{\max} = 0,476$, что будет обуславливать интервал теоретической пористости. Просвет фиктивного грунта изменяется в пределах от $m_{\min} = 0,0931$ до $m_{\max} = 0,2146$. Помимо рассмотренных аспектов следует учитывать, что поры имеют не только изменяющуюся конфигурацию, но и застойные зоны, не участвующие в процессе фильтрации.

При соприкосновении твердой минеральной частицы с водой возникают электромолекулярные силы, которые притягивают диполи воды к поверхности частиц. Самые близкие к частице слои (1–3 ряда молекул воды) образуют пленки прочносвязанной воды, что сопровождается энергетическим эффектом. Слои молекул воды, связанные меньшими силами, образуют слой рыхлосвязанной воды. Следовательно, можно рассмотреть систему, включающую в себя объем частиц грунта, объем свободной воды и объем связанной воды.

П. И. Андрианов [11] отождествляет связанную воду в грунте с максимальной молекулярной влагоемкостью по А. Ф. Лебедеву. Толщина пленки связанной воды в % от среднего диаметра частиц может изменяться в следующих пределах:

- для крупного песка при $d_{\text{cp}} = 0,75$ мм максимальная молекулярная влагоемкость составляет 1,57 % при толщине пленки 0,7% ;
- для глинистых частиц при $d_{\text{cp}} = 0,0025$ мм влагоемкость составляет 44,85% при толщине пленки равной 20,0% .

Наличие пленок жидкости вокруг частиц грунта уменьшает его пористость на 5% .

При обтекании вязкой жидкостью твердого тела может произойти отрыв обтекающей жидкости от поверхности тела, причем за местом отрыва образуется область застойной зоны (рис. 2.2).

Угол отрыва при ламинарном обтекании шара вязкой жидкостью составляет $\varphi = 116,2^\circ$. Застойные области как бы увеличивают объем каждой шарообразной частицы на 12% . Пористость грунта с учетом пленки воды на

поверхности частиц и мертвых зон, образованных в углах треугольного сечения, называют эффективной. Эффективную пористость n_1 можно выразить через истинную:

$$n_1 = n \left[1 - 3 \left(\frac{1-n}{n} \right) \xi \right] \quad (2.5)$$

где $\xi = \frac{d_1}{d_w} - 1$, d_1 — диаметр шарообразной частицы с учетом пленки воды; d_w — диаметр минеральной частицы грунта.

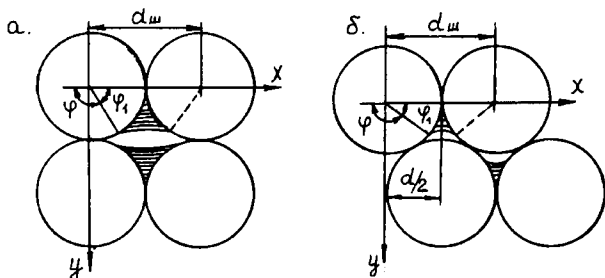


Рис. 2. 2. Области застойных зон: а — при рядной упаковке; б — при шахматной.

Ламинарная фильтрация зависит от двух основных параметров: гранулометрического состава и вязкости жидкости. Гранулометрический состав характеризуется коэффициентом фильтрации, эффективным диаметром, удельной поверхностью, пористостью. Поскольку жидкость, характеризуемая определенной вязкостью, распространяется в пористой среде от источника, в котором создается давление, то в самой струе жидкости давление также будет изменяться — от \max у источника до \min на периферии. Это явление в теории фильтрации характеризуется коэффициентом пьезопроводности.

Принципы движения несжимаемой жидкости через пористую среду рассмотрены на основе исследований Л. С. Лейбензона [12, 13], В. Н. Щелкачева [14], П. Я. Полубаринова-Кочиной [15, 16], Н. Н. Веригина [17, 18], Д. В. Волоцкого [5, 19, 20], В. С. Истоминой [21], Н. Е. Жуковского [22], Д. В. Минца [23], В. И. Аравина [24], Г. М. Ломидзе [25], Ю. А. Соболевского [26], А. Камбефора [2] и других исследователей.

Скорость фильтрации через идеальный грунт может быть выражена через действительную скорость течения жидкости W_0 с учетом пористости n :

$$W_1 = n W_0 \quad (2.6)$$

Поскольку в идеальном грунте все поры цилиндрические, то они будут характеризоваться гидравлическим радиусом, представляющим собой отношение площади поперечного сечения порового канала ω к периметру χ :

$$\delta = \frac{\omega}{\chi} \quad (2.7)$$

Скорость фильтрации через идеальный грунт может быть выражена не через пористость, а через коэффициент проницаемости k , имеющий размерность площади

$$W = \frac{k(P_1 - P_2)}{\mu \ell}, \quad (2.8)$$

где

$$k = nk_0 = n \frac{\delta^2}{\beta^2}; \quad \beta = \sqrt{\frac{\tau}{8}} \quad (2.9)$$

τ — показатель, зависящий от режима течения жидкости; $(P_1 - P_2)$ — падение гидродинамического давления; ℓ — длина порового канала. μ — абсолютная вязкость, на основании которой, а также плотности жидкости можно определить и кинематическую вязкость ν .

Гидравлический радиус идеального грунта определяется из выражения:

$$\delta = \beta \sqrt{\frac{k}{n}} \quad (2.10)$$

Между коэффициентами фильтрации и проницаемости существует взаимосвязь:

$$K_\phi = k \frac{\rho}{\mu}, \quad (2.11)$$

где ρ — плотность раствора.

Фильтрация через фиктивный грунт подробно изучена Сликтером, Козени, Терцаги, Смрекером, Рейнольдсом. Скорость фильтрации в фиктивном грунте определяется из выражения:

$$W_2 = m W_0, \quad (2.12)$$

где m — просвет фиктивного грунта. **ШАВКОВАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ**

$$m = 1 - \frac{\pi}{4 \sin \Theta}, \quad (2.13)$$

где Θ — угол ромба, из которого образованы грани ромбоэдра и который изменяется от $\Theta = 90^\circ$ до $\Theta = 60^\circ$.

Скорости фильтрации в идеальном и фиктивном грунте описываются одним и тем же выражением (2.8), однако проницаемость по Сликтеру находится по формуле:

$$k = \frac{m^2 r_w^2}{96(1-n)}, \quad (2.14)$$

где r_w — радиус шара, вписанного в ромбоэдр.

Л. С. Лейбензон [12] вывел ту же самую формулу, но по отношению к выражению Сликтера результаты, получаемые по формуле Лейбензона, вдвое больше.

Между пористостью грунта и просветом существует взаимосвязь, которая описывается уравнением:

$$m = N n^{1.4}, \quad (2.15)$$

где N — постоянная величина.

Таким образом, при изучении фильтрации в основу положен метод, позволяющий рассматривать грунт как идеальный или фиктивный, характеризующие пористостью или просветом. Течение жидкости при ламинарном режиме подчиняется закону Дарси, на основании которого можно получить выражения, характеризующие скорость течения жидкости с учетом характеристик грунта.

2. 2. Реологические особенности течения вязких жидкостей в пористой среде

Простейшим типом жидкостей, с точки зрения теории вязкости, являются ньютоновские растворы, к которым относятся инъекционные растворы высокомолекулярных органических соединений типа карбамидных смол и неорганических соединений силикатных растворов.

При ламинарном течении жидкости между ее соседними слоями, имеющими различную скорость, возникают касательные напряжения. Вязкая

жидкость, текущая вблизи твердой поверхности, прилипает к ней, из-за чего появляются силы сопротивления. Когда жидкость течет в пористой среде, то скорость любого ее элемента быстро изменяется от точки к точке, по мере того как элемент продвигается по своему извилистому пути.

Касательные напряжения вязких ньютоновских жидкостей определяются уравнением Ньютона:

$$\tau = -\mu \frac{\partial W}{\partial N}, \quad (2.16)$$

где τ — касательное напряжение; μ — вязкость жидкости; $\frac{\partial W}{\partial N}$ — градиент скорости при переходе от одного слоя жидкости к другому.

Реологическая кривая истинной жидкости всегда характеризуется абсолютной вязкостью. Истинные жидкости начинают течь при сколь угодно малых напряжениях сдвига. Уравнение движения этой жидкости, протекающей через круглую капиллярную трубку, было получено Пуазейлем в 1842 году:

$$Q = \frac{\pi \delta^4 (P_1 - P_2)}{8 \ell \mu}, \quad (2.17)$$

где Q — объем вытекающий из капилляра в единицу времени; δ — радиус капилляра; $(P_1 - P_2)$ — разность давлений на конце трубки; ℓ — длина капилляра.

Течение вязко-пластичной жидкости описывается уравнением Бингама [27]

$$\tau = \mu \frac{\partial W}{\partial N} + \tau_c, \quad (2.18)$$

где τ_c — статическое напряжение сдвига.

Для полной гидродинамической характеристики пористой среды Н. Н. Веригиным [18] было выведено понятие коэффициента пьезопроводности, характеризующего скорость распространения давления в упругой пористой среде. Если в какой-нибудь точке (источник инъектирования) произойдет изменение давления, то это изменение в пористой среде передается в другую точку через некоторый промежуток времени. Поэтому в точке пласта, расположенной ближе к источнику нагнетания, перераспределение давления наступает раньше и проявляется более интенсивно, чем на участке, более удаленном от источника. Для определения коэффициента пьезопроводности Н. Н. Веригин привел выражение:

$$a = \frac{k}{\mu(e\beta_{ж} + \beta_{породы})}, \quad (2.19)$$

где $\beta_{ж}$ — коэффициент сжимаемости жидкости; $\beta_{породы}$ — коэффициент сжимаемости породы; e — коэффициент пористости.

В дальнейших теоретических построениях, рассматривая инъекцию вязких синтетических смол, будем относить их к ньютоновским жидкостям, которые применительно к пористым средам подчиняются закону Дарси, т. е. имеют ламинарный режим течения.

2.3. Принципы инъектирования грунтов

Теоретически нагнетание раствора в грунты может происходить при постоянных давлении, расходе или скорости фильтрации (рис 2.3).

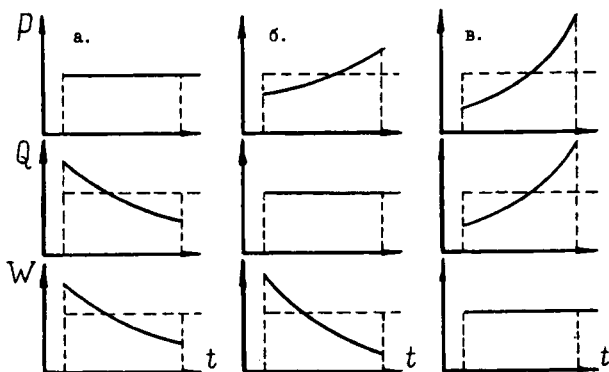


Рис. 2.3. График зависимости параметров нагнетания от времени:
 а — при постоянном давлении P ; б — при постоянном расходе Q ; в — при постоянной скорости распространения раствора W .

Общепринятым считается первый режим, когда нагнетание раствора происходит при постоянном давлении. Второй режим возможен при очень ограниченном времени, когда поры грунта свободны, и тогда небольшое увеличение давления приведет к постоянному расходу. Однако со временем поры заполнятся раствором, и повышение давления приведет к нарушению ламинарного режима течения жидкости и к разрыву сплошности грунтового массива.

Третий режим связан с постоянным увеличением расхода раствора и давления нагнетания. Такой режим возможен при нагнетании раствора в трещиноватые породы или породы, имеющие большие пустоты и полости. Нагнетать таким режимом растворы в песчаные грунты невозможно.

При рассмотрении процесса нагнетания жидкости в пористую среду могут возникнуть следующие задачи: одномерная, плоско-радиальная и сферическая.

Одномерная задача, представляющая собой поток из совокупности параллельных линий, может быть рассмотрена при инъектировании в сухие и водонасыщенные грунты (рис. 2.4).

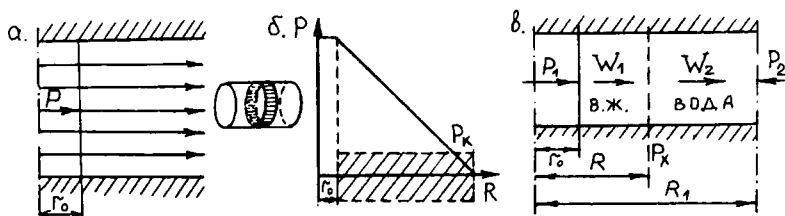


Рис. 2.4. Одномерная задача:

а — схема инъектирования в сухие грунты; б — зависимость радиуса распространения раствора в сухих грунтах от создаваемого давления; в — инъектирование в водонасыщенные грунты.

График, обозначающий процесс нагнетания (рис. 2.4, б), составлен с учетом постоянного давления и переменного расхода ньютоновской жидкости, фильтрующейся по закону Дарси. При этом упругостью воды, крепителя и грунта, а также сопротивлением вытесненного из пор воздуха пренебрегаем. Поскольку течение жидкости происходит от источника по открытым порам, то давление возле инжектора имеет максимальное значение. За счет возникновения трения между струей раствора и стенкой поры давление на периферии снижается до нуля. Учитывая, что скорость фильтрации описывается уравнением (2.8), а между коэффициентами фильтрации и проницаемости существует взаимосвязь описываемая уравнением (2.11), легко получить выражение:

$$W = \frac{K_{\phi}(P_1 - P_2)}{\rho n(R - r_0)}, \quad (2.20)$$

где длину фильтрационного потока ℓ заменим на разность между радиусом распространения раствора R и радиусом иньектора r_0 .

Пользуясь методом смены стационарных режимов Л. С. Лейбензона [13], сущность которого заключается в том, что процесс неустановившейся фильтрации рассматривается как совокупность мгновенных, установившихся процессов с непрерывно изменяющимися во времени характеристиками, и выражая скорость через изменение радиуса во времени:

$$W = \frac{\partial R}{\partial t}, \quad (2.21)$$

можно получить выражение:

$$\frac{\partial R}{\partial t} = \frac{K_\phi (P_1 - P_2)}{\rho n (R - r_0)} \quad (2.22)$$

Интегрируя выражение в пределах от r_0 до R и от 0 до t и введя безразмерный радиус χ , были получены формулы для всех трех задач [28, 29].

Для плоского одномерного источника продолжительность иньектирования в зависимости от глубины проникновения жидкости выражается уравнением:

$$t = \frac{\rho n r_0^2}{K_\phi (P_1 - P_2)} f(\chi), \quad (2.23)$$

где
$$f(\chi) = \left(\frac{\chi - 1}{2} \right) \text{ и } \chi = \frac{R}{r_0}; \quad (2.24)$$

K_ϕ — коэффициент фильтрации грунта, соответствующий плотности и вязкости жидкости.

Практически для песков при давлении в иньекторе измеряемом атмосферами, капиллярное давление можно принимать равным нулю.

При иньектировании водонасыщенных грунтов одномерная задача будет иметь вид, изображенный на рис. 2.4, в. Предположим, что за время t вязкая жидкость проникла в грунт на глубину R . На эту жидкость действует избыточное давление P_1 — слева, на воду P_2 — справа. В плоскости раздела жидкостей будет давление P_x . Определим скорость фильтрации в зонах согласно уравнению Дарси:

$$W_1 = \frac{K_{\phi 1} (P_1 - P_x)}{\rho_1 (R - r_0)}, \quad (2.25)$$

$$W_2 = \frac{K_{\phi 2}(P_x - P_2)}{\rho_2(R_1 - R)}. \quad (2.26)$$

Уравнение неразрывности потока должно удовлетворять условию:

$$W_1 = W_2 \quad (2.27)$$

Отсюда P_x будет равно:

$$P_x = \frac{(R_1 - R)P_1 - b(R - r_0)P_2}{(R_1 - R) + b(R - r_0)}, \quad (2.28)$$

где $b = \frac{K_{\phi 2}\rho_1}{K_{\phi 1}\rho_2}$

Подставляя полученное выражение в формулу (2.25), получим скорость фильтрации

$$W_1 = \frac{K_{\phi 1}b(P_1 - P_x)}{\rho_1(R_1 - R) + b(R - r_0)} \quad (2.29)$$

Продолжительность инъецирования на расстояние R определим интегрированием уравнения (2.21) в пределах от 0 до t и от r_0 до R :

$$\int_0^t \partial t = n \int_{r_0}^R \frac{\partial R}{W_1} \quad (2.30)$$

Подставив значения из предыдущего выражения и проинтегрировав его в указанных пределах, можно определить продолжительность инъецирования на глубину R :

$$\int_0^t \partial t = \frac{n\rho_1}{K_{\phi 1}b(P_1 - P_2)} \int_{r_0}^R [(R_1 - R) + b(R - r_0)] \partial R, \quad (2.31)$$

$$t = \frac{n\rho_1 r_0}{K_{\phi 1}(P_1 - P_2)} \left[\chi_1(\chi - 1) + (b - 1) \frac{(\chi - 1)^2}{2} \right], \quad (2.32)$$

где $\chi_1 = \frac{R_1}{r_0}$ — безразмерный радиус влияния источника.

Последнее выражение можно представить в виде

$$t = \frac{nr_0^2}{(P_1 - P_2)} \Phi(\chi), \quad (2.33)$$

$$\Phi(\chi) = \left(\frac{\rho_1}{K_{\phi_1}} - \frac{\rho_2}{K_{\phi_2}} \right) f(\chi) + \frac{\rho_2}{K_{\phi_2}} \chi_1 \Phi(\chi), \quad (2.24)$$

где $\Phi(\chi) = \chi - 1$; $f(\chi)$ и χ — те же, что и в формуле (2.24).

Плоско-радиальная задача (рис. 2.5) может рассматриваться в двух случаях:

а) когда сверху и снизу область распространения жидкости ограничена водоупорами;

б) когда отношение длины перфорированной части иньектора к его диаметру больше пяти.

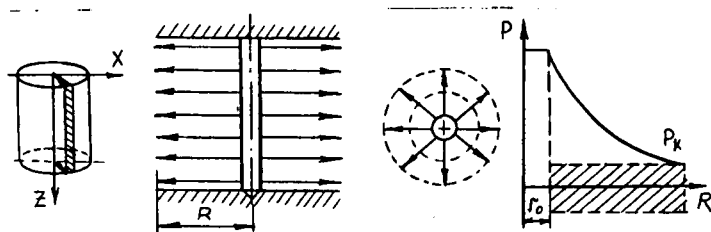


Рис. 2.5. Плоско-радиальная задача.

Для плоско-радиального источника, что соответствует длинным иньекторам (отношение длины перфорированной части L к диаметру иньектора D_n $L/D_n > 5$), зависимость радиуса от времени выражается той же формулой, что и в плоской задаче (2.23), а безразмерная величина равна:

$$f(\chi)_R = \frac{\chi^2 \left(\ln^2 \chi + \frac{1}{\chi^2} - 1 \right)}{4} \quad (2.35)$$

Для практических расчетов при $\chi > 10$ величиной $1/\chi^2$ можно пренебречь, и тогда выражение примет вид:

$$f(\chi)_R = \frac{\chi^2 (\ln^2 \chi - 1)}{4} \quad (2.36)$$

Сферическая задача (рис. 2.6). Рассматривается при отношении длины перфорированной части иньектора к его длине меньше пяти или при нагнетании раствора через трубу с открытым концом.

Для сферического источника безразмерная величина равна:

$$f(\chi)_c = \frac{2\chi^3 - 3\chi^2 + 1}{6} \quad (2.37)$$

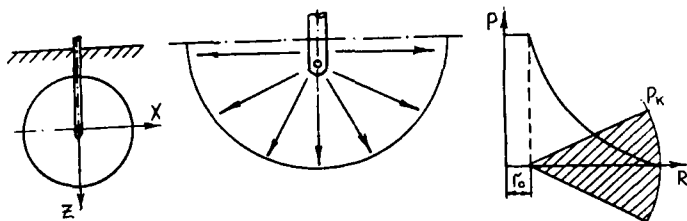


Рис. 2.6. Расчетная схема нагнетания жидкости через сферический источник в сухой грунт.

Сравнивая безразмерные части (2.24), (2.35), (2.37) можно сделать вывод, что быстрее всего инъекция идет через одномерный источник, затем через плоско-радиальный и наиболее медленно через сферический. Приведем соотношение между безразмерными величинами

$$\begin{aligned} \frac{t_R}{t_c} &= \frac{6\chi^2 \left(\ln\chi^2 + \frac{1}{\chi^2} - 1 \right)}{4(2\chi^3 - 3\chi^2 + 1)} = \frac{6\chi^2 \left(\ln\chi^2 + \frac{1}{\chi^2} - 1 \right)}{4 \left[\chi^2 (2\chi - 3) + 1 \right]} = \\ &= \frac{6\chi^2 \left(\ln\chi^2 + \frac{1}{\chi^2} - 1 \right)}{\left[4\chi^2 \left(2\chi - 3 + \frac{1}{\chi^2} \right) \right]} = 1,5 \frac{\left(\ln\chi^2 + \frac{1}{\chi^2} - 1 \right)}{\left[\left(2\chi - 3 + \frac{1}{\chi^2} \right) \right]} \end{aligned} \quad (2.38)$$

На основании приведенного выражения можно заключить, что при увеличении радиуса распространения раствора время нагнетания через радиальный источник будет приближаться ко времени через сферический.

2.4. Вывод уравнения для определения радиуса распространения раствора

При нагнетании раствора в грунт область пропитки представляет собой геометрическую фигуру, изображенную на рис. 2.7 и состоящую из плоско-радиальной и полусферической частей.



Рис. 2.7. Области пропитки, получаемые в лабораторных условиях.

Рассмотрим гидродинамическую схему фильтрации раствора через одиночный иньектор (рис. 2.8). График зависимости $R = f(P)$ свидетельствует о том, что наибольшая величина давления в области пропитки будет у самого иньектора, т. е. при выходе раствора из отверстия. На периферии давление падает до капиллярного.

Общий расход раствора через иньектор будет состоять из расхода в радиальной области и расхода в сферической:

$$Q_{\Sigma} = Q_R + Q_c \quad (2.39)$$

Следовательно, истечение из иньектора раствора Q_{Σ} приведет к поровому заполнению одновременно цилиндрической и полусферической областей, причем каждая из них будет заполняться за время t . Но поскольку $t_c > t_R$, то для дальнейших выводов остановимся на t_R , так как именно это время позволяет определить радиус распространения раствора. Полусферическая область будет иметь овальные очертания, поскольку раствора будет недостаточно для пропитки, что и подтверждается опытными результатами (рис. 2.7).

Время, необходимое для иньектирования раствора может быть определено из выражения (2.23). Для плоско-радиального источника безразмерная часть определяется из выражения (2.36), а для сферического — (2.37).

Выразим безразмерную часть уравнения через технологические параметры и характеристики грунта:

$$f(\chi) = \frac{tK_{\phi}(P_1 - P_2)}{\rho n r_0^2} \quad (2.40)$$

Как видно, в полученном выражении в числителе представлена разница давлений в инжекторе и на периферии распространения раствора. Кроме того, раствор, выходя из отверстия инжектора, распределяется на большую площадь, чем в самом отверстии инжектора, что приводит к падению давления при выходе раствора из отверстия инжектора.

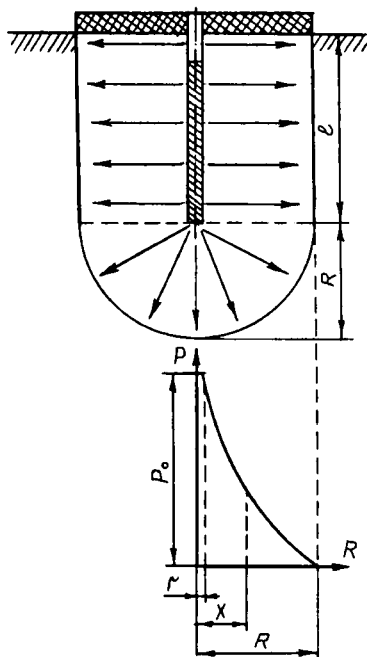


Рис. 2.8. Гидродинамическая схема фильтрации через одиночный инжектор.

Б. П. Горбунов [29] предложил рассматривать коэффициент гидравлических потерь как отношение разности давлений внутри инжектора P_0 и на внешней его стороне P_1 :

$$K_2 = \frac{P_0}{P_1} \quad (2.41)$$

Рассматривая разницу давлений в инжекторе и на границе растекания раствора, где это давление будет равно капиллярному, можно заключить, что для песков при давлении в инжекторе, измеренном атмосферами, капиллярное давление можно принимать равным нулю.

Проведенные лабораторные исследования по нагнетанию вязких растворов в песчаный грунт подтверждают потери, возникающие при инъектировании. Особенно их следует учитывать при нагнетании раствора в поверхностные слои, где каждое отверстие и его размер влияют на эффективность пропитки. Поэтому, приняв коэффициент гидравлических потерь за показатель, характеризующий размеры и количество отверстий инжектора, получаем выражение:

$$K_z = \frac{\sum N_i r_i}{2r_0 + \sum N_i r_i} \quad (2.42)$$

где N_i — число отверстий одного диаметра в инжекторе; r_0 — радиус инжектора; r_i — радиус отверстий одного диаметра.

Коэффициент гидравлических потерь выведем для инжектора, перфорированного отверстиями разного диаметра. Следует отметить, что он будет тем больше, чем больше разница между диаметром инжектора и количеством отверстий одного сечения. Отсюда следует вывод, что перфорация инжектора является важной величиной, которую необходимо учитывать при расчетах.

Для определения коэффициента гидравлических потерь обозначим $\sum N_i r_i$ через показатель конструктивных параметров инжектора Π_k . Приняв граничные условия составляющих коэффициента гидравлических потерь, строим номограмму (рис. 2.9).

Рассмотрев процесс неустановившейся фильтрации как совокупность мгновенных, установившихся процессов с непрерывно изменяющимися во времени характеристиками, можно записать выражение:

$$t = \frac{\rho n r_0^2}{K_\phi P_o K_z} \cdot f(\chi) \quad (2.43)$$

Определение радиуса распространения раствора по выражению 2.43. производим в следующем порядке.

1. Определяем коэффициент гидравлических потерь. Для этого по разработанной номограмме [30] для параметров инжектора $2 \text{ мм} < N < 32 \text{ мм}$; $1 \text{ мм} < r < 4 \text{ мм}$; $5 \text{ мм} < r_0 < 15 \text{ мм}$ определяем численное значение этого коэффициента.

2. Подставляем параметры, характеризующие фильтрационные свойства грунта, технологические данные и определяем размерную часть выражения (2.43).

3. Зная численное значение размерной части, определяем безразмерную функцию $f(\chi)$, по которой вычисляем радиус распространения раствора.

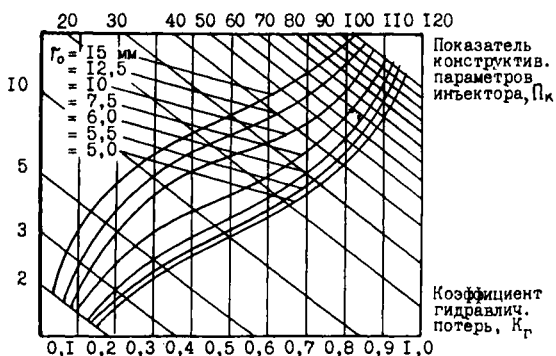


Рис. 2.9. Номограмма определения коэффициента гидравлических потерь.

Для характеристики значений радиуса распространения раствора, полученного по выведенной формуле, определяли показатель точности:

$$P_T = \pm \frac{100m_0}{X}, \quad (2.44)$$

где m_0 — средняя ошибка среднего арифметического, определяемая из выражения:

$$m_0 = \frac{L\vartheta}{\sum n_0}, \quad (2.45)$$

где L — гарантийный коэффициент, определяемый по интегралу вероятности Лапласа (при $L = 1$ значение X будет подтверждено в 683 случаях из 1000, при $L = 1,3$ в 800, при $L = 2$ в 995); ϑ — среднее квадратичное отклонение; n_0 — число наблюдений; X — среднеарифметическое значение рассматриваемых случайных величин.

Чем меньше показатель точности, тем надежнее результат исследований. Как отмечено в работах Н. В. Леонтьева [31] и И. Е. Евгеньева [32], достаточная надежность эксперимента будет обеспечена только в случае, если показатель точности не превышает 5%.

Радиус распространения раствора, помимо выражения 2.43, определялся по формулам, выведенным Т. С. Каранфиловым [33] с допущением, что коэффициент фильтрации в процессе нагнетания раствора остается постоянным, а характер движения раствора в грунте является ламинарным. В таком случае радиус распространения раствора составляет:

– для сферического источника:

$$R = 1,54 \sqrt{\frac{r_0 K_\phi \frac{\nu}{\nu_p} P_0 t}{\beta n}}; \quad (2.46)$$

– для плоско-радиального

$$R = 0,8 \sqrt{\frac{K_\phi \frac{\nu}{\nu_p} P_0 t}{\beta n}}, \quad (2.47)$$

где ν — кинематический коэффициент вязкости воды, связанный с абсолютной вязкостью μ через выражение:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.48)$$

где ρ — плотность жидкости; ν_p — кинематический коэффициент вязкости раствора; β — коэффициент заполнения пор раствором.

Магг [3] вывел формулу для определения времени нагнетания ньютоновских жидкостей. Изменив это выражение и сгруппировав исходные данные относительно основного показателя получаем зависимость:

$$R = 1,4 \sqrt[3]{\frac{r_0 (3tK_\phi P - r_0^2 an)}{an}} \quad (2.49)$$

где a — коэффициент, учитывающий отношение вязкости раствора к вязкости воды; n — пористость грунта.

А. Камбефор [2] вывел выражение по определению времени нагнетания с учетом расхода жидкости. Изменив выражение и выразив его относительно радиуса, можно получить:

$$R = \sqrt[3]{\frac{3Qt}{4\pi n} + r_0^3} = \sqrt[3]{\frac{0,23Qt}{n} + r_0^3} \quad (2.50)$$

В указаниях по смолизации грунтов [34] приведена формула, по которой рекомендуется определять количество раствора на одну заходку. Изменив это выражение относительно радиуса распространения раствора, получим:

$$R = \frac{Q}{10\pi n \ell} \quad (2.51)$$

где ℓ — величина заходки.

В Белорусском дорожном научно-исследовательском институте разработаны методические рекомендации по борьбе с пучинами инъекцией закрепляющих растворов [35]. В этих рекомендациях радиус закрепления рекомендуется определять по формуле Т. С. Каранфилова (2.47).

С опытными данными сравнивались значения радиуса распространения раствора, вычисленные по формулам Б. П. Горбунова и В. М. Марголина (2.23, 2.35, 2.36), Т. С. Каранфилова (2.46, 2.47), Маага (2.49), указаний по смолизации (2.51) и формуле, выведенной с учетом коэффициента гидравлических потерь (2.43).

Анализируя результаты вычислений (табл. 2.1), можно заметить, что данные, полученные по формуле, выведенной с учетом коэффициента гидравлических потерь, дают показатель точности не более 5%. В связи с этим заключаем, что при нахождении радиуса распространения раствора в пористой среде это выражение с достоверной точностью описывает его зависимость от свойств грунта, материала, параметров нагнетания и конструкции инжектора. Определение численных значений каждого из вышеперечисленных показателей, обеспечивающих наибольшее распространение раствора в радиальном направлении при экономичном расходе и ограниченном времени нагнетания, легло в основу экспериментальных исследований.

В таблице 2.1. в числителе приведены значения радиусов, вычисленных по формулам, а в знаменателе — показатель точности, определяемый по формуле (2.44).

Выводы по главе 2

Распространение жидких растворов, составленных на основе высокомолекулярных соединений, относящихся к ньютоновским жидкостям, в пористой среде грунта имеет ламинарный характер и подчиняется закону Дарси. Ламинарная фильтрация зависит от гранулометрического состава грунта и вязкости раствора. Касательные напряжения вязких ньютоновских жидкостей определяются уравнением Ньютона. При изучении фильтрации применяется статистический метод с допущением, что гидродинамическая фильтрация осуществляется на идеальном или фиктивном грунте.

На основании теоретических предпосылок можно заключить, что инъецирование раствора в грунты может осуществляться при постоянных: давлении, расходе и скорости распространения раствора. Общепринятым считается режим, при котором нагнетание раствора осуществляется при постоянном давлении. Рассмотрены три задачи распространения раствора в пористой системе грунта: в виде совокупности параллельных линий (одномерная задача), в виде радиальных линий (плоско-радиальная задача), в виде сферических областей пропитки (сферическая задача). Решение каждой задачи обуславливает определение радиуса распространения раствора с учетом технологических параметров нагнетания, фильтрационных свойств грунта, плотности и вязкости раствора. Впервые эти задачи были сформулированы д. т. н., проф. Б. П. Горбуновым.

Учитывая разницу давлений внутри инъектора и на периферии распространения раствора, была предложена формула для определения коэффициента гидравлических потерь с учетом конструктивных параметров инъектора. Введение этого коэффициента в выражение для определения радиуса распространения раствора позволило скорректировать формулу, выведенную для плоско-радиального источника, с помощью которой стало возможным определять радиус с достоверной точностью.

**Результаты вычислений радиусов распространения
растворов в пористой среде**

№ п/п	Принадлежность математических выражений	Радиус распространения раствора в м при давлении Р, МПа и коэффициенте фильтрации К _ф , м/сут					
		Р=0,1 МПа, К _ф =9,5 м/сут			Р=0,15 МПа, К _ф =5,2 м/сут		
		10	20	30	10	20	30
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Экспериментальные данные	0,128	0,153	0,166	0,100	0,138	0,150
2	Указания по смолизации (2.51)	<u>0,136</u> 6,20	<u>0,199</u> 30,0	<u>0,244</u> 47,0	<u>0,054</u> 46,0	<u>0,103</u> 25,3	<u>0,140</u> 6,6
3	Формула Маага (2.49)	<u>0,079</u> 38,3	<u>0,100</u> 34,6	<u>0,115</u> 30,7	<u>0,076</u> 24,0	<u>0,095</u> 31,1	<u>0,108</u> 28,0
4	Формула Каранфилова (2.46)	<u>0,097</u> 24,2	<u>0,138</u> 9,8	<u>0,169</u> 1,8	<u>0,089</u> 11,0	<u>0,126</u> 8,7	<u>0,152</u> 1,3
5	Формула Каранфилова (2.47)	<u>0,051</u> 60,1	<u>0,072</u> 52,9	<u>0,088</u> 46,9	<u>0,047</u> 53,0	<u>0,067</u> 51,4	<u>0,082</u> 45,3
6	Формула Горбунова и Марголина (2.23 и 2.35)	<u>0,087</u> 32,0	<u>0,108</u> 29,4	<u>0,120</u> 27,7	<u>0,085</u> 15,0	<u>0,105</u> 23,9	<u>0,117</u> 22,0
7	Формула Горбунова и Марголина (2.23 и 2.36)	<u>0,132</u> 3,1	<u>0,176</u> 15,0	<u>0,208</u> 25,3	<u>0,124</u> 19,3	<u>0,165</u> 19,5	<u>0,195</u> 30,0
8	Формула с учетом коэффициента гидравлических потерь (2.43)	<u>0,127</u> 0,8	<u>0,167</u> 9,1	<u>0,192</u> 15,6	<u>0,101</u> 1,0	<u>0,134</u> 2,9	<u>0,158</u> 5,3

3. ОЦЕНКА КАЧЕСТВЕННОГО СОСТОЯНИЯ ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

3.1. Виды дефектов на автомобильных дорогах с бетонным покрытием

В Республике Беларусь принята государственная программа “Дороги Беларуси” на период 1997-2005 годы. Основные показатели программы следующие.

Протяженность сети	на 1. 01. 1997 г. — 51,5 тыс. км; на 1. 01. 2006 г. — 85,5 тыс. км.
Плотность дорог на 1000 км ²	на 1. 01. 1997 г. — 249 км; на 1. 01. 2006 г. — 412 км.

Объем работ: дороги общего пользования

ввод — 2373,7 км;
капитальный ремонт — 47145 км;
средний ремонт — 100771 км;

внутрихозяйственные дороги

ввод — 24825 км;
капитальный ремонт — 8239 км;
средний ремонт — 24803 км.

Объем инвестиций:

дороги общего пользования — 26620 млрд руб;
модернизация дороги Брест — Москва — 1502 млрд руб;
содержание и ремонт — 122137 млрд руб;
внутрихозяйственные дороги строительство — 34261 млрд руб;
содержание и ремонт — 20445 млрд руб.

Уже к 2002 году протяженность дорог общего пользования составила около 75 тыс. км, из которых 15462 км относятся к дорогам республиканского значения (2915 км магистральных дорог) и 37947 км — к дорогам мест-

ного значения. На 1000 км² территории приходится 292 км дорог общего пользования с твердым покрытием [36]. Дороги с асфальтобетонным и цементобетонным покрытиями составляют 70 % от общей протяженности, т. е. 36936 км [37].

По статистическим данным, в республике имеется 1771,966 км дорог различной категории с цементобетонным покрытием, т. е. около 5% от дорог с твердым покрытием.

Республиканские дороги имеют обозначения Р1–Р148, магистральные М1–М10. Дорожная сеть магистралей носит рациональный характер и в большинстве своем соединяет периферийные области с центром республики, ее столицей городом Минском (табл. 3.1; рис. 3.1) [38].

По территории Республики Беларусь проходят два общеевропейских транспортных коридора № II (Запад — Восток) и № XI (Север — Юг) с ответвлением XI–В общей протяженностью 1530 км. Эти транспортные коридоры соответствуют автомобильным дорогам М-1/Е 30 Брест — Минск — граница Российской Федерации; М-8/Е 95 граница Российской Федерации — Витебск — Могилев — Гомель — граница Украины, а также ответвление Гомель — Минск — граница Литвы.

Таблица 3.1.

Характеристика магистральных дорог

№ п/п	Обозначение	Направление	Особенности	Наличие цементобетонного покрытия
1	2	3	4	5
1	М1	Брест — Минск — граница Российской Федерации	Категория I Имеет южный обход г. Минска	Брест — Борисов
2	М2	Минск — аэропорт Минск-2	Категория Ia. Заасфальтированная обочина, бордюрный камень	Полностью
3	М3	Минск — Витебск	Первые 50 км относятся к категории Ia	Первые 50 км
4	М4	Минск — Могилев	Общий выход из Минска с дорогой Минск — Гомель	Первые 24 км
5	М5	Минск — Гомель	Крупные мосты через реки Березина и Днепр	Минск — Пуховичи
6	М6	Минск — Гродно	Первые 50 км относятся к I категории	Первые 50 км

1	2	3	4	5
7	М7	Минск — Микашевичи	Первые 50 км относятся к I категории	Первые 50 км
8	М8	Граница Российской Федерации — граница Украины	Имеет обходы крупных городов	
9	М9	Минск — Мядель	Повышенная интенсивность движения	
10	М10	Брест — Гомель	Пролегает по территории Белорусского Полесья	

Таким образом, приведенные цифры и схемы свидетельствуют о том, что в республике существует разветвленная сеть автомобильных дорог с цементобетонным покрытием, а также имеются большие перспективы по их расширению.

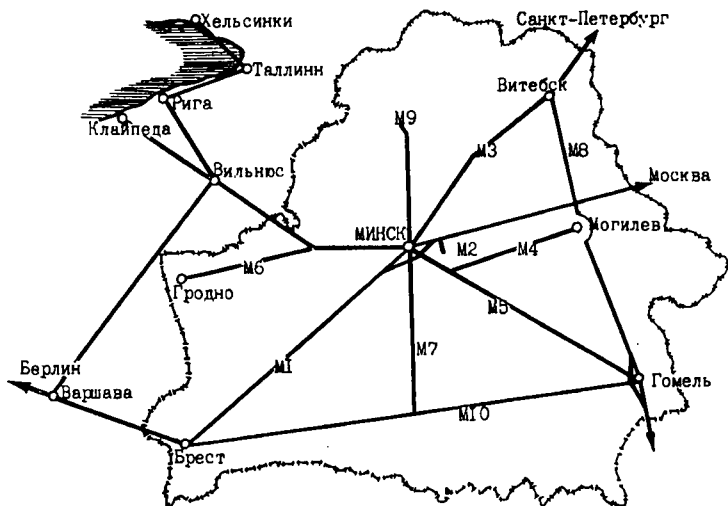


Рис. 3.1. Схема магистральных дорог и транспортных коридоров.

Основополагающим фактором при разработке и реализации технической политики в дорожной отрасли является необходимость поддержания на должном уровне уже существующей сети автомобильных дорог. По резуль-

татам диагностики установлено, что 62 % автомобильных дорог не соответствуют нормативным требованиям. Создавшаяся ситуация усугубляется ростом интенсивности движения на автомобильных дорогах и постоянным увеличением нагрузок на дорожное покрытие. Только за последние 5 лет количество грузовых автомобилей возросло в 1,5 раза, а легковых — в 1,8 [36].

На цементобетонное покрытие в течение всего срока службы действует целый комплекс всевозможных факторов, оценка которых приведена во введении и которые объединяют: механическое воздействие, изменение температуры и влажности, деформацию земляного полотна, воздействие агрессивных химических реагентов.

В связи с этим проблема долговечности цементобетонных покрытий носит комплексный характер, включая конструктивный, материаловедческий и технологический аспекты.

Таким образом, под действием эксплуатационных и погодноклиматических факторов на автомобильных дорогах возникают разнообразные дефекты в виде трещин, выбоин, шелушения, деформаций основания и др. Каждый из них характеризуется параметром, отражающим величину дефекта и косвенно свидетельствующим о стадии разрушения (табл. 3.2).

Таблица 3.2.

Параметры, характеризующие виды разрушения

Вид дефекта	Трещина		Выбойна, яма	Шелушение	Разрушение кромки покрытия	Отставание поверхностной обработки	Деформация основания
	продольная	поперечная					
1	2	3	4	5	6	7	8
Параметры, характеризующие дефект	Длина и ширина раскрытия, глубина		Площадь и глубина		Площадь		Осадка, сдвиг

При строительстве дороги, до момента укладки цементобетонного покрытия, усиление основания может осуществляться всеми известными способами. Задача усложняется тогда, когда бетонное покрытие уже просуществовало несколько лет и под воздействием вышеперечисленных факторов в нем стали возникать различного рода дефекты. Перед проведением ремонт-

ных работ необходимо обследовать разрушающийся участок, и если результаты этого обследования позволят сделать вывод, что причиной образования дефекта является низкая плотность или местное разуплотнение основания, то единственным способом усиления дорожной конструкции будет усиление основания, чтобы прекратить вертикальные деформации покрытия. Это возможно при использовании способа инъектирования, причем без какого-либо разрушения цементобетонного покрытия.

3.2. Формирование системы оценки дефекта

Автомобильная дорога как объект изучения может находиться в трех состояниях:

D_{10} — новая дорога без дефектов (исходная система);

D_{20} — дорога, подверженная дефектам;

D_{30} — отремонтированная дорога с использованием материала и технологии.

Переход системы D_{10} в D_{20} происходит по причинам внутреннего или внешнего характера. Перевод системы D_{20} в D_{30} происходит искусственным путем с использованием нового материала и современной технологии, что требует дополнительного воздействия — труда и затрат материальных средств. Система D_{30} должна приближаться к D_{10} , однако абсолютно равными они никогда не будут вследствие дискретности системы D_{20} и адгезионных качеств между компонентами нового материала и первоначального.

Следовательно, можно записать систему:

$$D_{10} \Rightarrow D_{20} \Rightarrow D_{30} \cong D_{10} \quad (3.1)$$

Рассмотрим первую ступень этой системы, т. е. возможные варианты перехода системы D_{10} в D_{20} (табл. 3.3).

Анализируя вышеприведенные варианты возможного возникновения дефектов, можно заключить, что каждый из рассматриваемых случаев является самостоятельной темой исследований и невозможно установить зависимость каждого от остальных.

Причина возникновения дефекта — как в самом бетоне, так и в основании, на котором лежит бетонная плита. Поэтому построим схему формирования структуры бетона с указанием возможных причин начала образова-

ния дефекта: в период твердения цементного геля; во время роста прочности бетона за счет формирования его кристаллической структуры и при контакте конструкции с окружающей средой (табл. 3.4).

На первой стадии формирования структуры, от геля до пространственной кристаллизации гидроксида кальция, технологическая последовательность приготовления бетонной смеси взаимосвязана с изменением взаимного расположения отдельных зерен, ведущим к росту пористости. На этом этапе образуются все виды пор, концентрация которых на поверхности конструкции или в глубине сказывается на развитии коррозионных процессов. При гидролизе минералов, составляющих цемент, происходит вовлечение воздуха за счет постепенного проникновения воды от поверхности до центра этих минералов возникает раздвижка зерен. Согласно эффекту П. А. Ребиндера, адсорбированные пленки жидкостей обладают расклинивающим действием, что ведет к концентрации на поверхности материала микротрещин. Все это приводит к образованию пор и пустот [39].

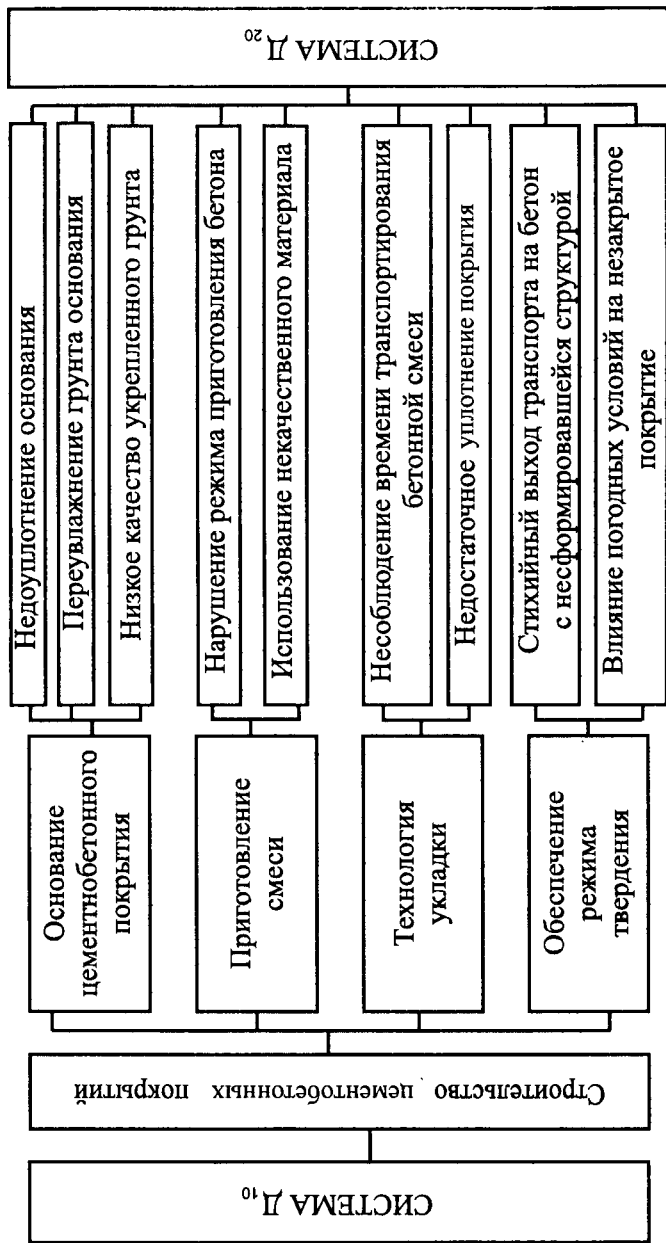
В период развития пространственной коллоидной системы за счет седиментации происходит образование контактных пор.

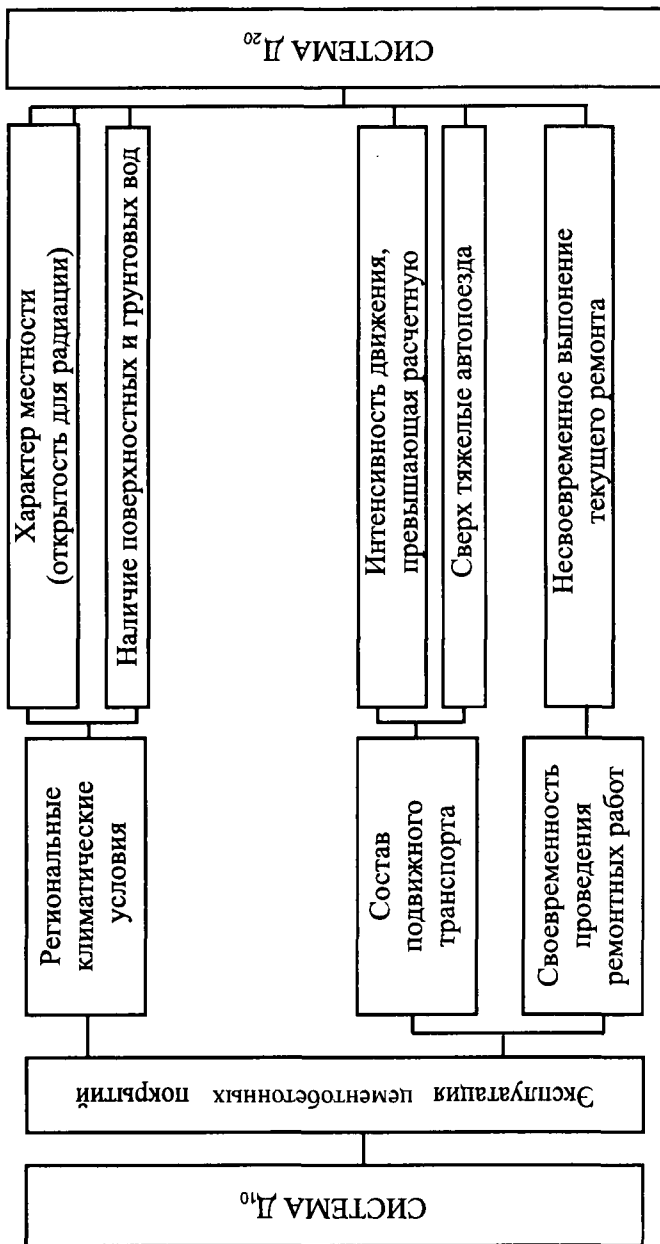
При кристаллизации гидроксида кальция, во время схватывания и затвердевания цементного теста появляются поры на поверхности раздела заполнителя и геля, а также на месте объема, первоначально занятого водой [40].

В процессе твердения цементного геля происходит не только физическое защемление воздуха, ведущее к образованию пористой структуры, но и образование капилляров за счет вступления воды в химическую связь с минералами, осмотического давления воды, седиментации твердых частиц. В результате этих процессов возникает капиллярно-пористая структура цементного камня.

Приготовленный бетон укладывается в виде плиты с большой контактирующей площадью: нижней, осуществляющей контакт с основанием, выполненным из укрепленных грунтов либо слоя щебня, и верхней с боковыми гранями, осуществляющей контакт с окружающей средой и подвижной нагрузкой. Дорожная плита имеет высокоразвитую поверхность (соотношение длины к толщине превышает 25). Небольшая глубина конструкции вызывает полное промерзание плиты в зимних условиях и значительную разницу температур между верхней и нижней плоскостями в летний период. Это сказывается на возникновении и концентрации напряжений в местах продольных и поперечных швов.

Возможные варианты возникновения дефектов при строительстве и эксплуатации дорог





Дефекты в дорожной плите начинают возникать при наличии одного из определяющих факторов:

- 1) концентрации напряжений, ведущих к деформации плиты или к просадке основания, сопровождающихся возникновением трещин;
- 2) воздействии динамических нагрузок от транспорта, которое ведет к образованию продольных и поперечных трещин. Этот вид воздействия тесно связан с качеством уплотнения основания, его гидрогеологическими условиями;
- 3) возникновении различных видов коррозии [41].

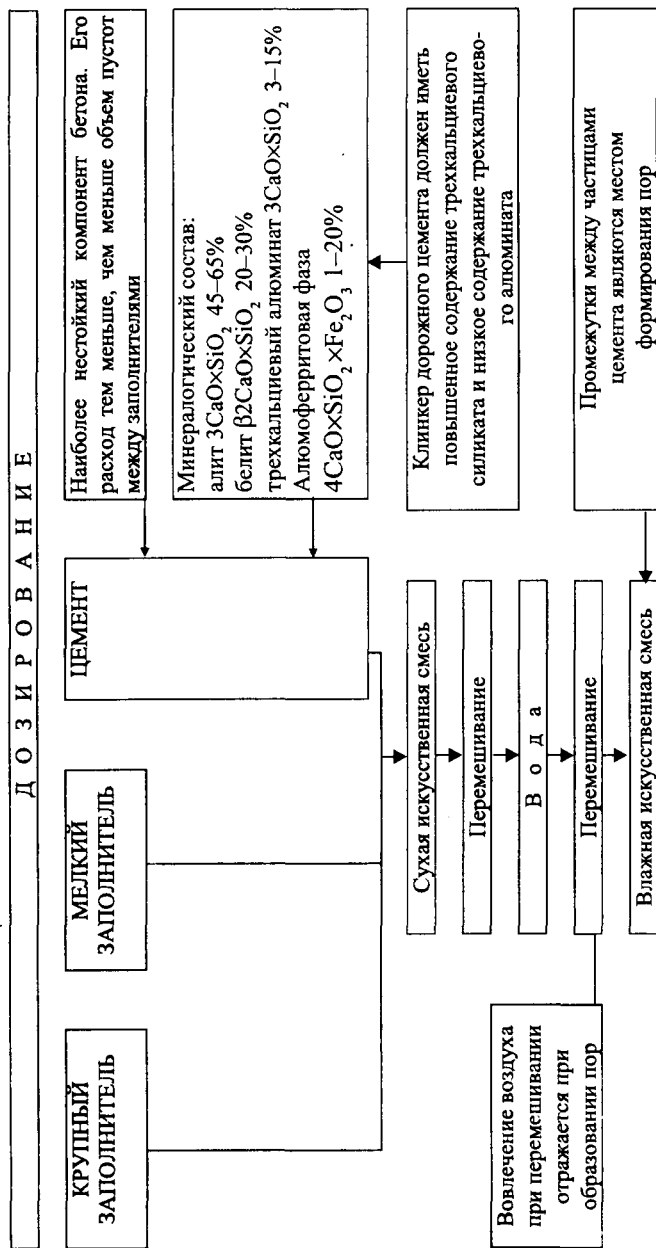
Как правило, коррозионные процессы начинаются на поверхности конструкции, проникая в глубь ее. В соответствии с имеющейся классификацией видов коррозии можно заметить, что наиболее часто возникающей коррозией является выщелачивание. Оно ведет к уменьшению содержания портландита в цементном геле, делая его непрочным, а структуру — рыхлой. В результате исчезает цементирующая основа материала, и цементобетон начинает разрушаться от поверхности в глубь.

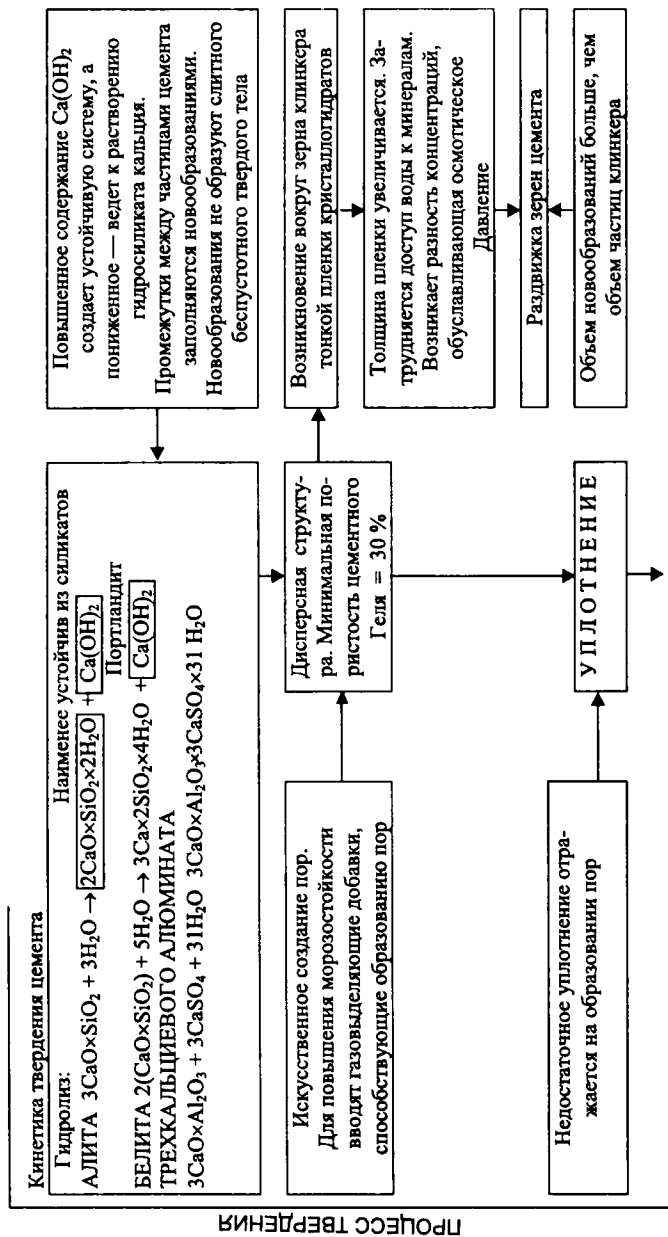
Точно так же, от поверхности в глубь, развивается и второй вид коррозии, представляющий собой протекание обменных реакций между кислотами, солями и составными частями цементного камня. Эти реакции приводят к перекристаллизации структуры, о чем мы можем судить по наличию ваттерита, на основании рентгенофазового анализа бетона.

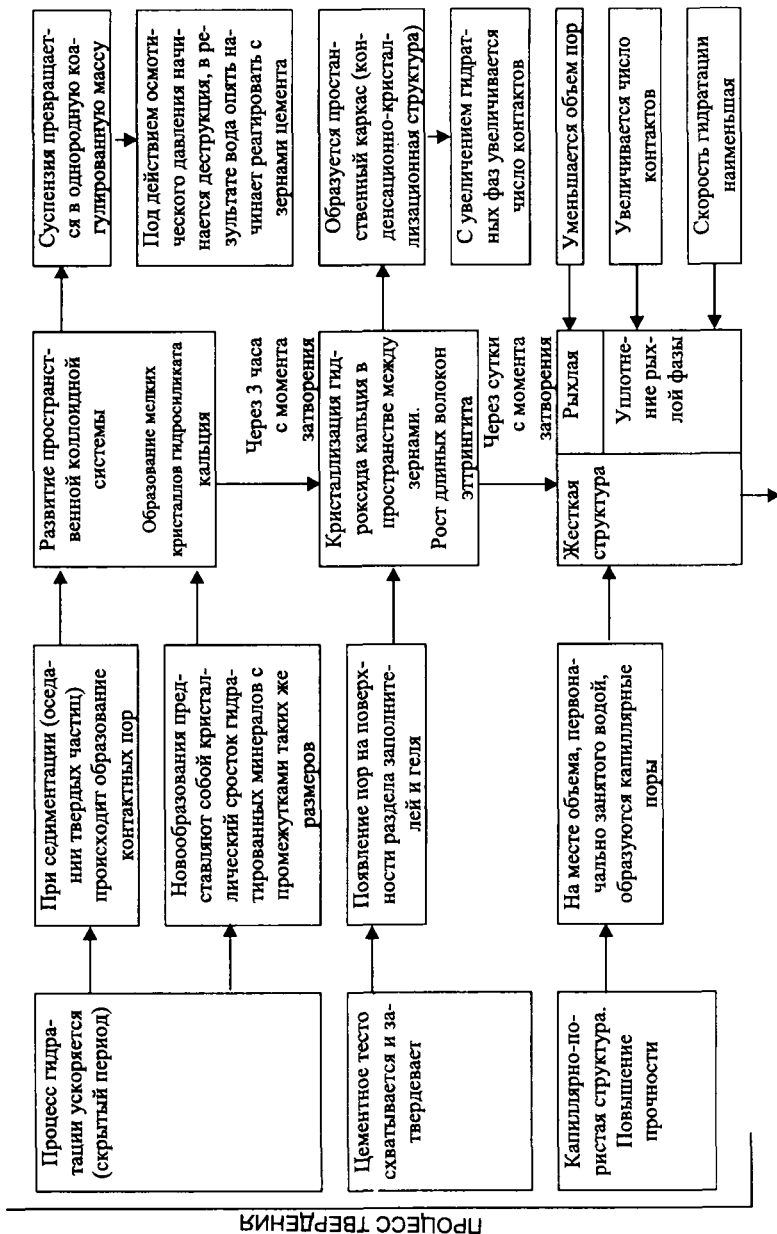
Что же касается третьего вида коррозии, то она может развиваться не только на поверхности, но и в глубине конструкции. Этот вид коррозии представляет собой накопление в порах солей, их кристаллизации с увеличением объема твердой фазы, что ведет к возникновению растягивающих напряжений, приводящих к образованию трещин. Эта так называемая сульфатная коррозия связана с образованием этtringита и вначале, за счет уплотняющего действия соли, создает ложную картину уплотнения структуры. Возникновение сульфатной коррозии в глубине плиты может быть объяснено наличием трещин и системы каналов или пор, способствующих прониканию солей в глубь конструкции.

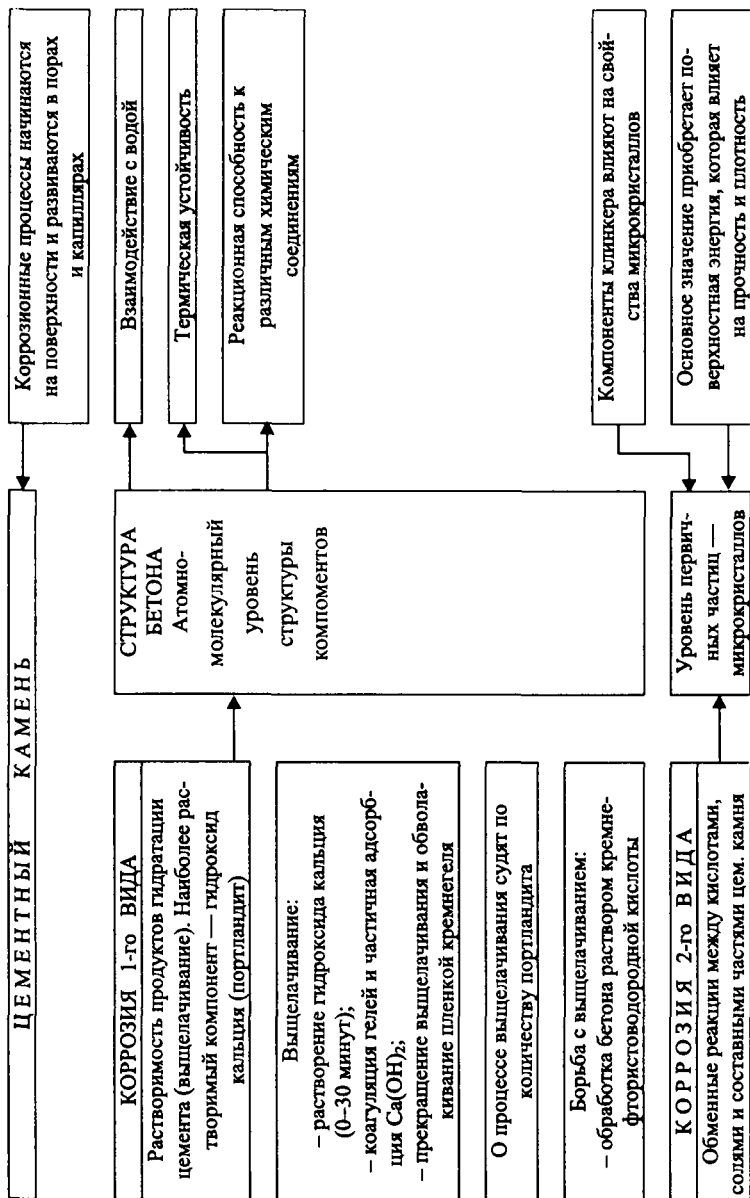
В зависимости от гидрологических условий расположения дорожной плиты на нее постоянно воздействует жидкая фаза осадков, грунтовых вод и капиллярное давление в подстилающих грунтах. При наличии в жидкой фазе растворенных агрессивных соединений происходит их концентрация на поверхности конструкции, а затем под влиянием градиента проникание в глубь дорожной плиты.

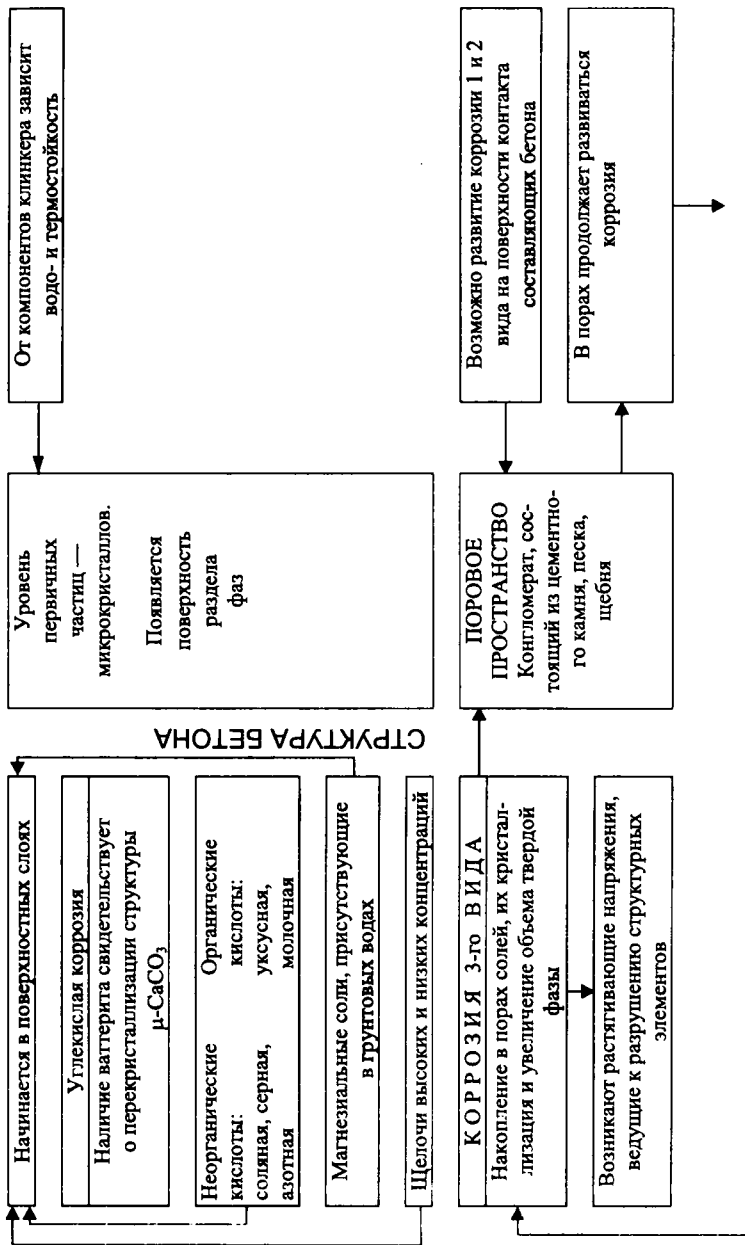
Таблица 3.4.
 Схема образования кристаллической структуры бетона с указанием возможных причин возникновения дефектов

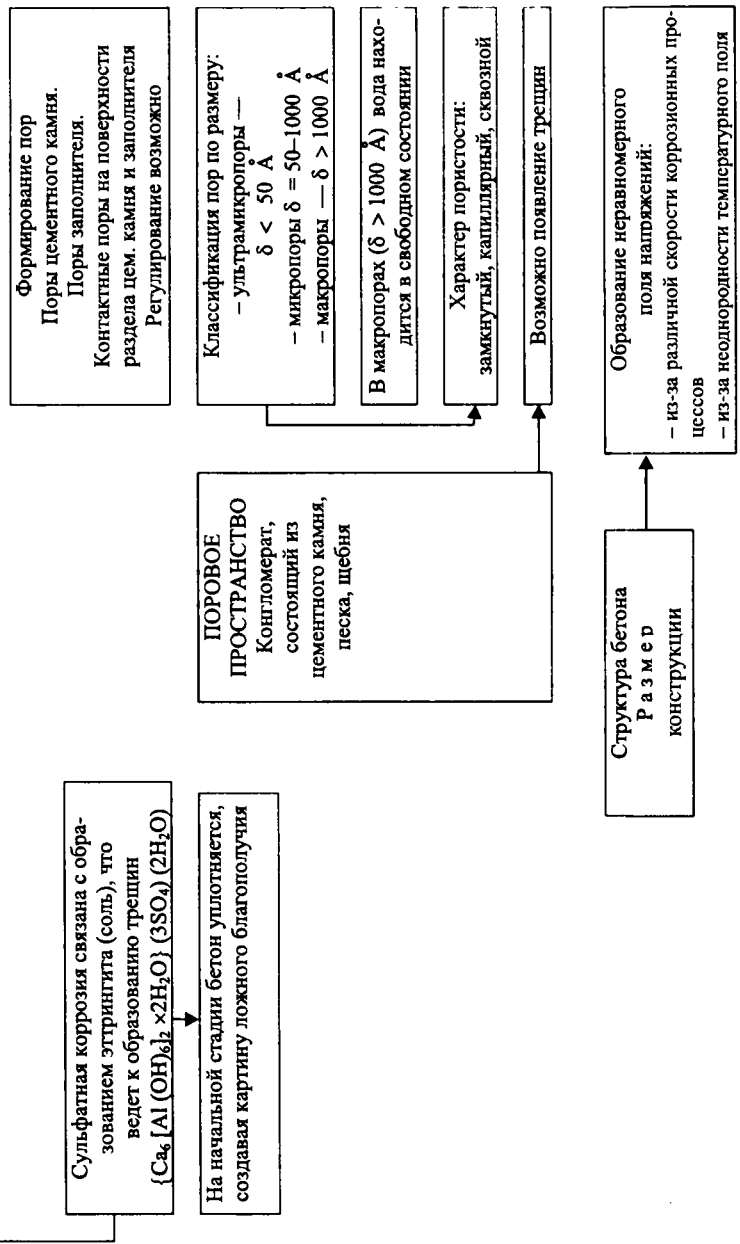








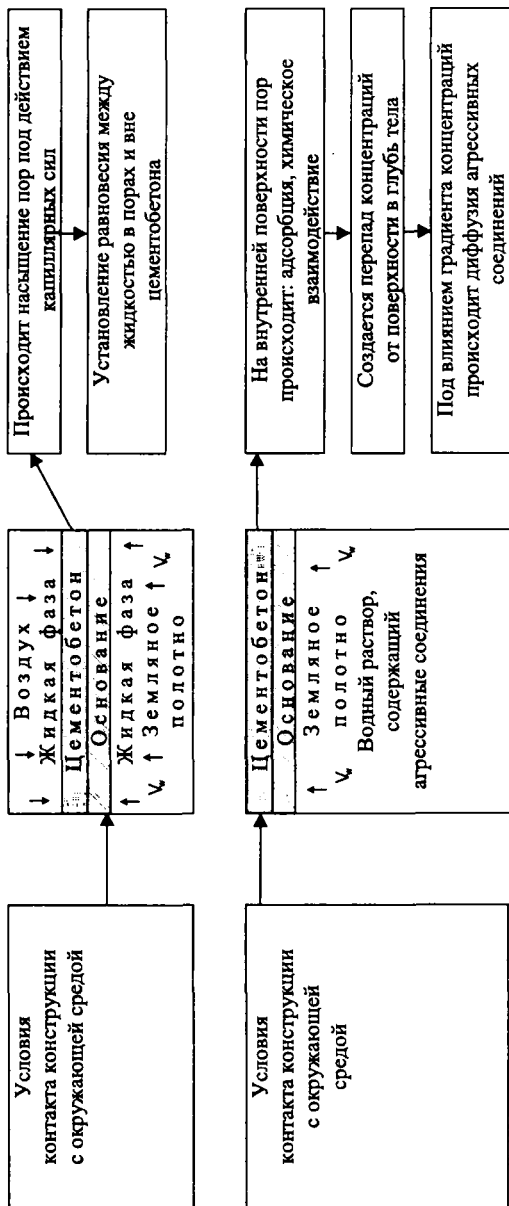




Сульфатная коррозия связана с образованием этtringита (соль), что ведет к образованию трещин
 $\{Ca_6 [Al(OH)_6]_2 \times 2H_2O\} (3SO_4) (2H_2O)$

На начальной стадии бетон уплотняется, создавая картину ложного благополучия

ПОРОВОЕ ПРОСТРАНСТВО
 Конгломерат, состоящий из цементного камня, песка, щебня



На основании схемы образования кристаллической структуры (табл. 3.4), отражающей возникновение системы пор, пустот, трещин, протекания различных видов коррозии, сопровождающейся потерей связи в цементном камне, можно заключить, что условия, способствующие развитию дефектов или различных видов коррозии на дорожных цементобетонных покрытиях, имеются как в процессе твердения цементного геля, так и дальнейшего упрочнения кристаллической структуры бетона. Основными особенностями дорожных цементобетонных плит, приводящими к возникновению дефектов, являются открытость их поверхности, большая площадь соприкосновения с окружающей средой, наличие большого количества пор, как на их поверхности, так и в глубине конструкции, перепады влажности и температуры между верхней и нижней плоскостями плит. Некоторые из этих условий закладываются из-за несовершенной технологии приготовления цементобетонной смеси. Но их можно избежать или сократить благодаря разработке новых способов приготовления смеси, основанных на применении более современного и оригинального оборудования, а также добавок для получения более плотных материалов. Других условий, таких как раздвижка зерен за счет возникновения пленки кристаллогидратов, избежать невозможно, но воздействовать можно и на этот процесс за счет интенсификации твердения. Для предотвращения возникновения трещин под действием движущегося автомобиля, из-за неравномерных просадок основания можно применять способ упрочнения основания путем инъектирования закрепляющих растворов в земляное полотно автомобильной дороги.

Следовательно, первая ступень выражения (3.1) характеризуется причинным фактором. В теории непрерывных сред для облегчения исследования процессов, протекающих в структуре неоднородных материалов, может быть использован принцип континуумизации [42], который дает возможность применять непрерывные функции для описания явлений и процессов, происходящих в неоднородных структурированных материалах, и, таким образом, рассматривать неоднородные структуры как континуум (непрерывность). Следует отметить, что континуум является типизацией объекта и не отражает структуру реальной среды.

Используя принцип континуумизации, цементобетонное покрытие можно рассмотреть в виде материальной точки, элемента и цикла. Учитывая, что за материальную точку принимается объем тела, в пределах которого физические свойства объекта одинаковы, размеры этого объекта минимальны, в ре-

зультате чего его деформацией можно пренебречь. В нашем случае это компоненты, составляющие цементобетон. За материальный элемент принимаем объем, в пределах которого напряженное и деформируемое состояние являются сложившимися. В нашем случае это минимальный объем бетона, в который входят все его компоненты. Обычно элементу придают форму куба. И, наконец, за материальный цикл принимаем объем, отражающий в себе основные особенности всей конструкции в целом. Причем следует учитывать, что конструкция — это материальное тело, характеризующееся наряду со свойствами, присущими материалу, также геометрическими размерами. Таковым является конструктивный элемент цементобетонного покрытия, ограниченный продольными и поперечными швами, т. е. дорожная плита.

Рассмотрим цементобетонное покрытие автомобильной дороги в пределах плиты. С позиции принципа континуумизации дорожная плита является материальным циклом, отражающим основные особенности всей конструкции — автомобильной дороги, и в то же время включает в себя как составляющие компоненты, так и элементы, имеющие различные напряженные и деформируемые состояния. Примем эту плиту за систему D_{10} , которая будет характеризоваться определенным прочностным или деформативным показателем.

При изучении этих показателей, в процессе образования различных дефектов на цементобетонных покрытиях, примем некоторые ограничения и допущения.

1. Бетон состоит только из трех компонентов: крупного и мелкого заполнителей, а также из цементного камня.

2. Весь крупный заполнитель, независимо от минералогического состава, характеризуем одним общим показателем, например прочностью (дробимостью) — $R_{кр}$.

3. Весь мелкий заполнитель, независимо от минералогического состава, характеризуем одним общим показателем — $R_{м}$.

4. Цементный камень принимаем однородным материалом в рассматриваемом бетоне и характеризуем — $R_{ц}$.

5. Не рассматриваем сравнительные показатели между различными видами заполнителей или марками цемента.

6. Прочность основания характеризуем показателем $R_{осн}$.

Рассмотрим прочностные показатели компонентов цементобетона (табл. 3.5).

Прочностные характеристики составляющих цементобетона

ЦЕМЕНТ			ЩЕБЕНЬ				ПЕСОК		
Марка М	Предел прочн. при сжатии $R_{сж}$, МПа	Модуль упругости E_y , МПа	Наименование региона	Порода	Предел прочн. при сжатии $R_{сж}$, МПа	Модуль упругости E_y , МПа	Разновидность	Модуль упругости E_y , МПа	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Портландцемент М400	40	3200	ИНТРУЗИВНЫЕ				7500	Крупн. Средн. Мелк. Пылеватый	130 120 110 50
			Балт. щит	Гранит $SiO_2 > 70\%$	100–300	7500			
			Укр. щит	Гранит	140–160	7100–7800			
			ЭФФУЗИВНЫЕ						
			Базальт $SiO_2 = 46–51\%$	180–440	9000				
МЕТАМОРФИЧЕСКИЕ									
Балт. щит	Кварциты $SiO_2 > 90\%$	120–250	8300–8800						
ОСАДОЧНЫЕ									
Балт. щит	Песчаники $SiO_2 = 90–99\%$	15–280	6300						
Укр. щит	Песчаники	120–140	6200–7000						

На основании представленных данных самым низким по прочности является цементный камень, предел прочности при сжатии которого более чем в 2 раза меньше аналогичного показателя каменного заполнителя. Если для приготовления цементобетона применяется цемент марки М400, то бетон получается марки М300. Это объясняется возникновением между цементным камнем и заполнителем контактов, которые снижают прочность получаемого искусственного конгломерата.

Сократив объект рассмотрения до плоскости контакта составляющих, можно заметить, что каждое из рассматриваемых состояний характеризует двухкомпонентную структуру:

- а) щебень — цементный камень;
- б) песок — цементный камень.

Контактная зона — это объем заполнителя и цементного камня, в котором ощущается влияние этих компонентов. Контактным слоем следует считать микрослой, отличающийся по своим свойствам от основного материала. При затворении бетона и до начала гелеобразования между компонентами существуют адгезионные силы, а после затвердения бетона — силы сцепления. Поэтому обозначим силы сцепления цементного камня с крупным заполнителем через $R_{кр}^{cu}$, и мелким заполнителем — через $R_{м}^{cu}$. Поскольку вся система в целом характеризуется показателем R_{max} , то можно составить выражение:

$$R_{max} \Rightarrow R_{кр}^{cu} \Rightarrow R_{м}^{cu} \Rightarrow f(R_{ц}) \quad (3.2)$$

Если любой из показателей окажется равным нулю либо несколько показателей будут равны нулю, то система свидетельствует о наличии дефекта. Предложенный принцип рассуждений справедлив не для всего покрытия в целом, а для конкретной точки в цементобетонном покрытии, через которую проходит дефект. Физический смысл заключается в разрыве связей, вызванном возникновением дефекта. Таким образом, дефект образуется при следующих условиях:

1. $R_{ц} = 0$.
2. $R_{ц} = 0, R_{кр}^{cu} = 0, (R_{ц} = 0, R_{кр}^{cu} = 0, R_{м}^{cu} = 0)$.
3. $R_{ц} = 0, R_{м}^{cu} = 0$,
4. $R_{ц} = 0, R_{кр}^{cu} = 0, R_{м}^{cu} = 0$.
5. $R_{осн} = 0$, которое повлечет за собой $R_{ц} = 0, R_{кр}^{cu} = 0, R_{м}^{cu} = 0, R_{кр} = 0$.

На основании приведенных условий можно описать виды дефектов.

1. **Возникновение трещины** (без рассмотрения причины ее возникновения).

Ослабление физических связей может проходить по следующим вариантам.

1. 1.	$R_{ц} = 0$ $R_{м}^{cu} = 0$	Трещина проходит по цементному камню. Экспериментальные исследования показывают, что кварцевый песок практически не разрушается, т. е. $R_{м} \neq 0$.
1. 2.	$R_{ц} = 0$ $R_{м}^{cu} = 0$ $R_{кр}^{cu} = 0$	Трещина проходит в контакте с крупным и мелким заполнителем по цементному камню.

1. 3.	$R_{ц} = 0$ $R_{м}^{сц} = 0$ $R_{кр}^{сц} = 0$ $R_{кр} = 0$	Трещина проходит отчасти в контакте со щебнем и отчасти по самому щебню.
1. 4.	$R_{ц} = 0$ $R_{м}^{сц} = 0$ $R_{кр} = 0$	Это частный случай третьего варианта, когда трещина входит перпендикулярно поверхности щебня, практически не затрагивая силы сцепления.

Влияние причины возникновения трещины отразится следующим образом. Причина может быть заложена внутри бетона либо быть вне его. Если причина внутри бетона, то она может быть вызвана либо одним из трех видов коррозии, подробно рассмотренных в логической схеме формирования структуры (таблица 3.4), либо температурными напряжениями. Но все они приведут к разрушению бетона. Если причина разрушения заложена вне структуры бетона, то она может быть вызвана либо изменением прочности основания, либо динамической нагрузкой, превышающей допустимую, либо напряжением накопленным в результате многократного воздействия нагрузки или температуры.

При недостаточном уплотнении или просадке насыпи $R_{осн}^{min} < R_{осн}$, образуется разуплотненная зона под плитой, где происходит провал покрытия с образованием трещины. При пучинообразовании $R_{осн}^{max} > R_{осн}$, т. е. происходит внутреннее воздействие на покрытие глинистого грунта или замерзшей воды, приводящее к его поднятию с образованием тех же дефектов.

Максимальная сила воздействия, как правило, вызывается динамическим ударом, происходящим за счет колебания массы автомобиля, вызванного дорожными неровностями.

2. Шелушение характеризуется следующими условиями.

2. 1.	$R_{ц} = 0$	Происходит полное разрушение цементобетона. Причем следует учитывать, что прочность цементного камня в этом случае отличается от того же показателя в первом варианте. При шелушении разрушение происходит не за счет клинообразного раскола цементного камня, а за счет плохого сцепления.
2. 2.	$R_{ц} = 0$ $R_{м}^{сц} = 0$	Происходит выкрашивание песка из цементобетона.
2. 3.	$R_{кр} = 0$ или $R_{кр} = 0$ $R_{кр}^{сц} = 0$	Если щебень расположен на поверхности покрытия, будет происходить его выкрашивание. Если щебень находится внутри массива, происходит проламывание цементного камня с последующим выкрашиванием.

3. Выбоина, яма, разрушение кромки покрытия. Причины их возникновения зависят от месторасположения дефекта. На краю покрытия причиной является трещина. Посередине покрытия возникновению дефекта может предшествовать шелушение, сетка трещин из-за пучения или локальной просадки.

Анализ приведенных условий показывает, что во всех случаях наблюдается разрушение цементного камня, следовательно, этот фактор является определяющим.

Ввиду сложности систем, включающих многообразие факторов, система D_{10} будет характеризоваться четырьмя подсистемами (рис. 3.2), объединяющими компоненты цементобетона, основным фактором которых является их прочность, а также компоненты, характеризующие основание бетонного покрытия. Особенность системы D_{10} заключается в том, что она должна иметь оптимальную плотность, характеризуемую вполне определенным количеством каждого из компонентов. В связи с этим введены показатели плотности $\rho_{кр}$, ρ_m , $\rho_{зп}$, $\rho_{ц}$, $\rho_{бет}$, обозначающие соответственно оптимальное содержание крупного, мелкого, их смеси, цемента и в целом бетона. Четвертая подсистема характеризует качественное основание, выполненное из укрепленного грунта или из щебня.

Система D_{20} , характеризующая дефектное покрытие, включает в себя пять подсистем, объединяющих, с учетом ранее рассмотренных условий, основные возможные виды дефектов и сопутствующие факторы (рис. 3.3).

Третья система, D_{30} характеризует восстановленное после ремонта покрытие (рис. 3.4). Она включает в себя пять подсистем, каждая из которых отражает один из видов ремонтных работ.

Усиление основания (подсистема $D_{30}-1$) может осуществляться как при строительстве, так и при ремонте дорожных покрытий. В первом случае инъектирование может объединять все известные способы. Во втором случае, для предохранения от разрушения цементобетонного покрытия, инъектирование предусматривается проводить при горизонтальном положении инъектора или наклонном, (при восстановлении устойчивости откосов). Каждый из упомянутых вариантов усилит основание и устранит причину прогрессирующей трещины, и после этого заделка самой трещины позволит получить качественное покрытие. Если же не производить усиления основания, то никакие работы по заделке трещины результата не дадут, поскольку они обеспечивают герметизацию стыков на разделе отдельных частей плиты и не по-

вышают прочность всего покрытия в целом. Причем вышеперечисленными работами возможно не только восстановление первоначальной прочности основания, но и ее повышение, т. е. $R_{\text{осн}} \Rightarrow R_{\text{осн}}^{\text{max}}$.

В настоящее время ремонт цементобетонных покрытий осуществляется путем изоляции дефекта органическим метериалом и укладкой поверх цементобетонного покрытия органоминеральной смеси. Качественное сцепление органического и минерального материала может быть достигнуто двумя путями:

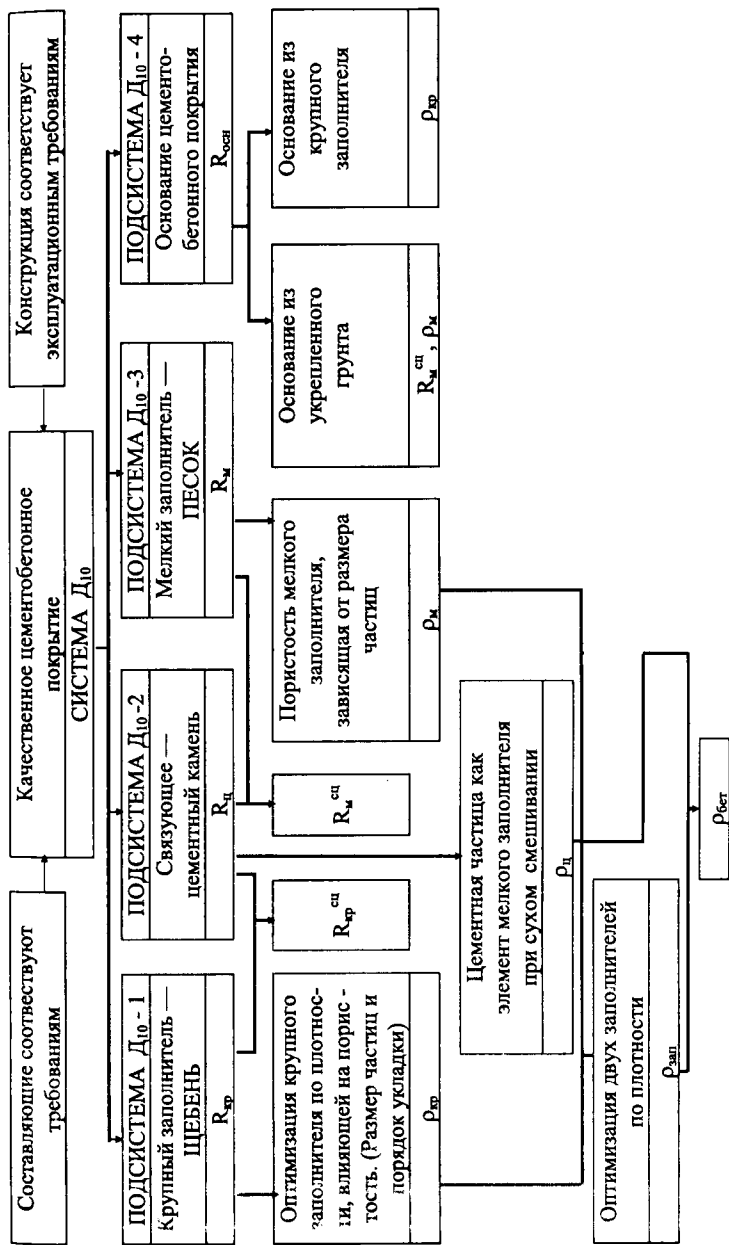
1) введением в состав органической смеси веществ, повышающих их адгезию к минеральному материалу;

2) созданием промежуточного слоя из минерала, имеющего высокие сцепные свойства как с цементобетоном, так и с органическим материалом. Этот слой материала называется праймером.

Учитывая, что в зоне контакта между минеральным и органическим материалами свойства будут отличаться от свойств внутри цементобетона или органоминеральной смеси, в дальнейшей этот слой будет характеризоваться прочностью сцепления — $R_{\text{пр}}^{\text{сц}}$.

Ремонт трещин может проводиться по двум направлениям в зависимости от ширины раскрытия трещины: путем обработки трещины герметиком либо распиловкой трещины с последующей обработкой канала. Первый вариант характеризуется прочностью сцепления герметика, который будет выполнять роль праймера ($R_{\text{пр}}^{\text{сц}}$), а второй — прочностью сцепления используемой смеси для заделки канала, также играющей роль праймера и характеризуемой прочностью ($R_{\text{пр}}^{\text{сц}}$) и плотностью ($\rho_{\text{бет}}$), обеспечивающей однородность бетонной смеси. В первом случае восстановление первоначальной прочности бетона невозможно, поскольку герметик только закрывает канал, но не восстанавливает монолитность цементного камня. Во втором случае восстановление первоначальной прочности возможно при подборе смеси соответствующей показателям бетона, и в особенности при усилении шва разрушенной конструкции путем закладки арматуры.

Заделка выбоин, ям и кромок предусматривает вырезку дефекта по контуру с его пломбированием бетонной смесью, аналогичной по составу самой плиты. При закладке арматуры и ее закреплении в стенках плиты возможно полное восстановление покрытия, прочность которого будет соответствовать прочности цементного камня, т. е. $R_{\text{max}} \Rightarrow R_{\text{ц}}$. Этой же цели можно достичь, если укрепить основание под возникшим дефектом способом инъектирования.



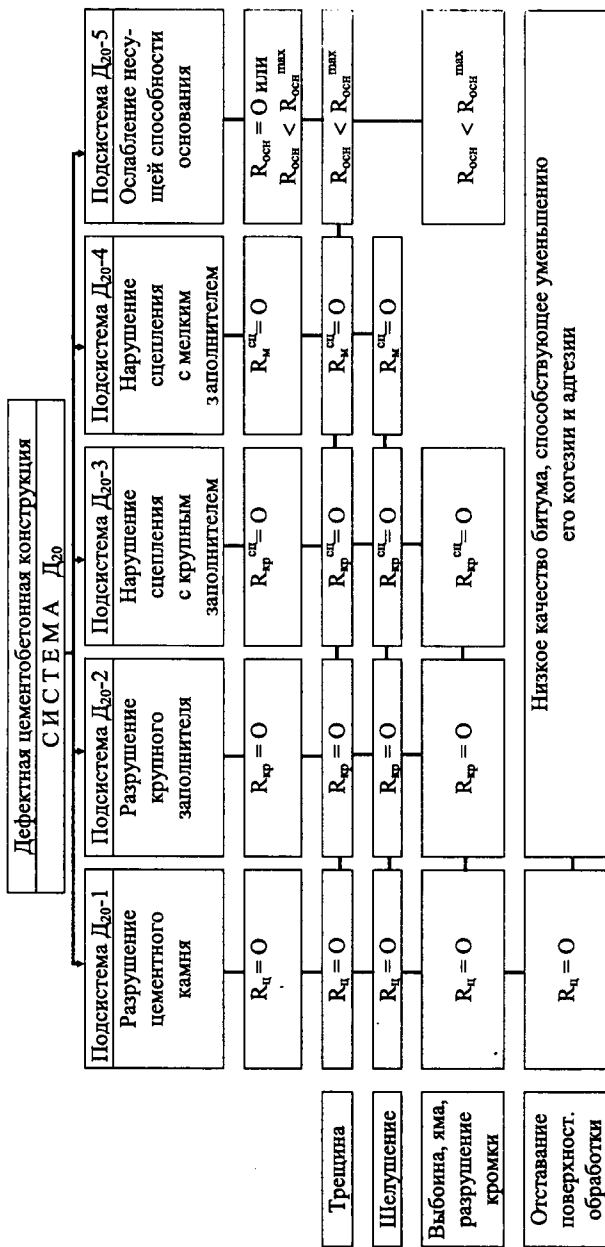


Рис. 3.3. Схематическая характеристика системы D_{20}

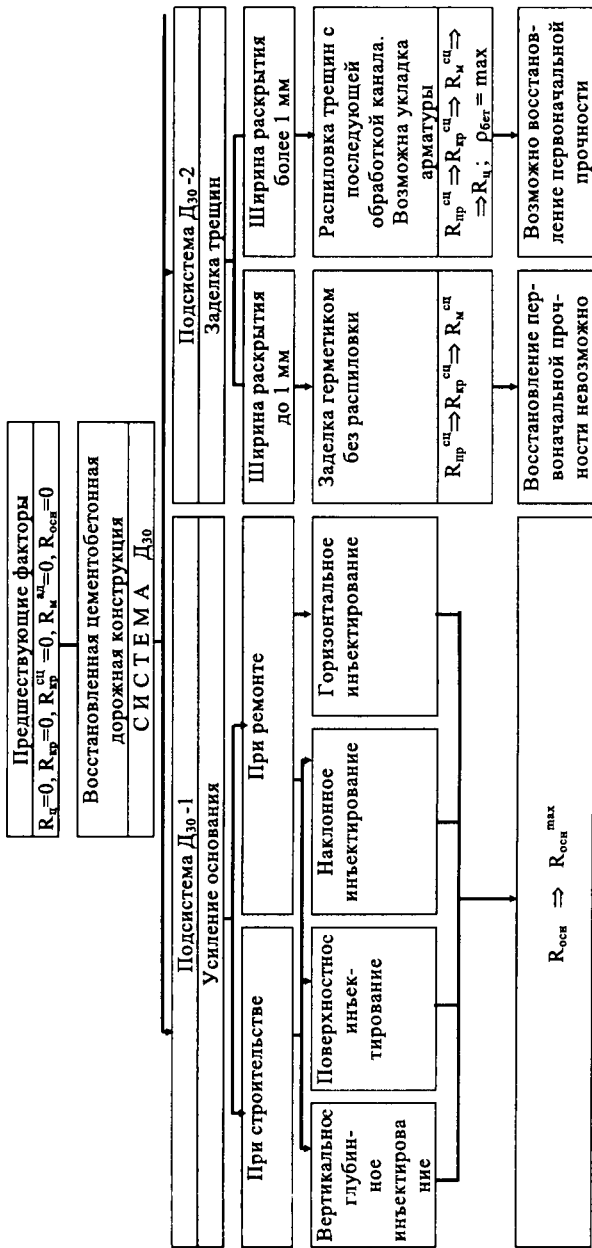


Рис. 3.4. Схематическая характеристика системы D_{30} (продолжение на стр. 60)

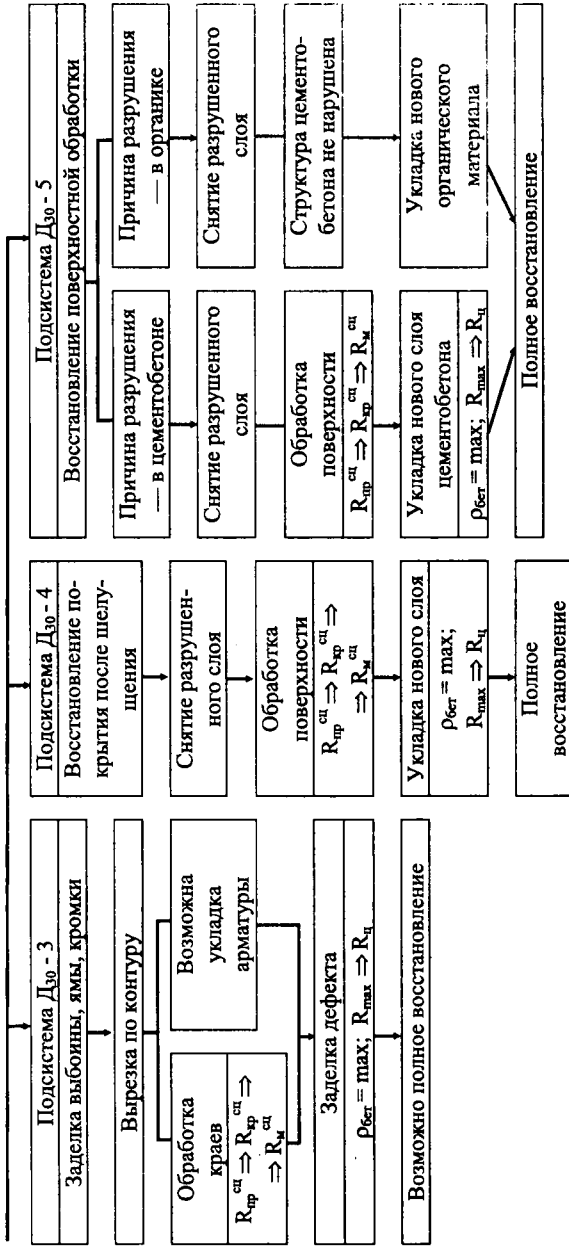


Рис. 3.4. Схематическая характеристика системы Д₃₀

Восстановление покрытия после шелушения является наиболее трудоемкой операцией, поскольку оно предусматривает полное снятие разрушенного слоя, обработку оголенной поверхности праймером и укладку нового качественного слоя бетонной смеси. При таком виде ремонта верхний, новый бетонный слой может быть по прочностным характеристикам равен первоначальному качественному бетону либо даже быть выше. При устранении этого дефекта большое значение играет глубина коррозии, вызывающей шелушение. Если глубина превышает $1/3$ толщины покрытия, то целесообразно усилить основание инъекционным способом.

Работы по восстановлению поверхностной обработки являются косвенными и могут быть использованы только в тех случаях, когда бетонная поверхность покрытия обработана органическим материалом. Причина отставания такой обработки может заключаться как в составе цементобетона за счет того же шелушения, так и в недоброкачественном органическом материале. Восстановление поверхностной обработки необходимо рассматривать с учетом причины образования этого дефекта. Если отставание поверхностной обработки происходит с частичным разрушением верхнего слоя цементобетона, то работы ведутся по модели шелушения с возможностью восстановления первоначальной прочности и монолитности. Если отставание поверхностной обработки связано со свойствами ее органической части, то структура цементобетона вообще не нарушается и дальнейшие рассуждения не касаются особенностей бетона.

Таким образом, рассматриваемая система оценки дефектов [43] цементобетонных покрытий заключается в анализе перехода от нового покрытия к разрушенному и от него к восстановленному. Эта взаимосвязь основывается на наличии трех основных сгруппированных видов дефектов в самом покрытии и пяти причинах их возникновения. Для восстановления прочности покрытия предлагается ликвидировать одну из основных причин возникновения дефектов путем применения метода инъектирования для усиления прочности основания покрытия.

3.3. Характеристика структурной и функционально-структурной моделей дорожной бетонной конструкции

Прежде чем оценить влияние дефекта, необходимо обозначить исходную систему. Качественное цементобетонное покрытие D_{10} представляет со-

бой бетон, состоящий из отдельных компонентов: крупного ($D_{10}-1$), мелкого ($D_{10}-3$) заполнителей, цементного камня ($D_{10}-2$), плиты, лежащей на прочном однородном основании ($D_{осн}-4$).

Система оценки дефекта основывается на разработке структурной модели с последующим переходом к функционально-структурной. Структурная модель формируется на основе оценки каждого компонента, взятого в определенном объеме и характеризующегося плотностью.

Проектирование состава бетона [44, 45, 46] осуществляется в соответствии с “Руководством по проектированию состава тяжелого бетона” по расчетно-экспериментальному методу, согласно которому рассчитывается расход компонентов, выраженный в весовых единицах определенного объема составляющих. Следовательно, каждый из компонентов занимает определенный объем, а в сумме эти объемы составляют единичный объем, например 1 м^3 : $V_1 + V_2 + \dots + V_n = 1$.

Каждый из компонентов характеризуется своей плотностью, с помощью которой содержание компонента можно рассмотреть через весовой показатель:

$$V_1 \rho_1 + V_2 \rho_2 + \dots + V_n \rho_n = G, \quad (3.3)$$

где G — суммарный вес бетона, показатель, характеризующий номинальный состав единицы объема.

Полученное в итоге значение G является расчетной плотностью бетонной смеси, т. е. $G = \rho_{\text{бет}}$. Это выражение свидетельствует о том, что компоненты бетона, взятые в определенном весовом количестве, обеспечат вполне определенную плотность бетона. Кроме того, объемы, занимаемые каждым компонентом смеси, будут стремиться к минимальной величине, обеспечивая максимальную плотность составляющих. Это физическое состояние обеспечит оптимальную плотность смеси:

$$\rho_{\text{опт}} = \sum_{i=1}^n V_i \rho_i, \quad \left. \begin{array}{l} V_i \Rightarrow \min \\ \rho_i \Rightarrow \max \end{array} \right\} \rho_{\text{опт}} \quad (3.4)$$

Для перехода от структурной модели к функционально-структурной необходимо обозначить связь $\rho_{\text{опт}}$ с соответствующими параметрами, характеризующими свойства структуры. Такими параметрами могут быть механические характеристики — деформативные и прочностные, которые являются

ся связующим звеном между тремя системами — $D_{10} \Rightarrow D_{20} \Rightarrow D_{30}$. Основной характеристикой среди прочностных показателей является модуль упругости E_y , дополнительными: предел прочности при сжатии — $R_{сж}$ и предел прочности на растяжение при изгибе — $R_{изг}$. Можно записать, что каждый из выбранных показателей будет зависеть от плотности бетонной смеси, что позволит оценить состояние дорожной конструкции:

$$E_y = f(\rho_{\text{опт}}); R_{сж} = f(\rho_{\text{опт}}); R_{изг} = f(\rho_{\text{опт}}) \quad (3.5)$$

Данные зависимости представляют собой однофакторную ситуацию, которая, с учетом предположения линейной зависимости между факторами, описывается выражением в общем виде:

$$Y = b_0 + b_1 X. \quad (3.6)$$

Учитывая отличие лабораторных данных от производственных необходимо добиваться, чтобы разница между коэффициентом a , характеризующим реальную зависимость, и коэффициентом b , характеризующим теоретическую, была как можно меньше, т. е. $b \Rightarrow a$. Тогда предыдущее выражение с учетом реального коэффициента запишется:

$$Y_p = a_0 + a_1 X_p. \quad (3.7)$$

Следует учесть, что между значениями Y_p , рассчитанными по выбранной модели, и значениями Y_s , полученными в результате инструментального обследования, всегда будет погрешность Δ_s , поскольку принятое нами условие прямолинейности между $\rho_{\text{опт}}$ и показателями деформативности покрытий не всегда будет соответствовать истине. Следовательно,

$$\Delta_s = Y_s - Y_p \quad (3.8)$$

где Y_s — показатель, характеризующий эксплуатационное состояние покрытия.

Данное выражения показывает, что чем меньше погрешность, тем выше сходимость расчетных и экспериментальных результатов. Погрешности отдельных характеристик в сумме будут отражать полную систему, т. е.

$$\Delta_{s1} + \Delta_{s2} + \dots + \Delta_{sn} = \sum_{i=1}^n \Delta_{si} \quad (3.9)$$

Задача сводится к минимизации суммы всех погрешностей. Для облегчения решения будем минимизировать не сумму, а сумму квадратов отклонений:

$$\sum_{i=1}^n (\Delta_{y_i})^2 = \sum_{i=1}^n (Y_{yi} - Y_{pi})^2 \quad (3.10)$$

Для нахождения минимального отклонения приравняем к нулю частные производные по всем неизвестным. После дифференцирования получим систему нормальных отклонений

$$\left. \begin{aligned} -2 \sum_{i=1}^n (Y_{yi} - a_0 - a_1 X_{pi}) &= 0 \\ -2 \sum_{i=1}^n (Y_{yi} - a_0 - a_1 X_{pi}) X_{pi} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

или

$$\left. \begin{aligned} n a_0 + (\sum_{i=1}^n X_{pi}) a_1 &= \sum_{i=1}^n Y_{yi} \\ (\sum_{i=1}^n X_{pi}) a_0 + (\sum_{i=1}^n X_{pi}^2) a_1 &= \sum_{i=1}^n X_{pi} Y_{yi} \end{aligned} \right\} \quad (3.12)$$

Согласно теоретическим представлениям, изложенным Ю. М. Баженовым и В. А. Вознесенским [47], введем упрощение записи:

$$\begin{aligned} n &= (OO); \quad \sum_{i=1}^n X_{pi} = (1O); \quad \sum_{i=1}^n X_{pi}^2 = (11); \\ \sum_{i=1}^n Y_{yi} &= (OY); \quad \sum_{i=1}^n X_{pi} Y_{yi} = (1Y) \end{aligned} \quad (3.13)$$

Тогда предыдущее выражение запишется в виде:

$$\left. \begin{aligned} (OO)a_0 + (1O)a_1 &= (OY) \\ (1O)a_0 + (11)a_1 &= (1Y) \end{aligned} \right\} \quad (3.14)$$

Для определения коэффициентов применим правило Крамера [48, 49]

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{(OY)(11)}{(OO)(1O)} = \frac{(OY)(11) - (1Y)(1O)}{(OO)(11) - (1O)(1O)} \\ a_1 &= \frac{(1O)(OY)}{(OO)(1O)} = \frac{(OO)(1Y) - (1O)(OY)}{(OO)(11) - (1O)(1O)} \end{aligned} \right\} \quad (3.15)$$

Для численного определения значений коэффициентов a_0 и a_1 можно составить табл. 3.6.

Определение значений коэффициентов a_0 и a_1

N значений	X_{pi}	X_{pi}^2	Y_{3i}	$X_{pi} Y_{3i}$
1	X_{p1}	$(X_{p1})^2$	Y_{31}	$X_{p1} Y_{31}$
2	X_{p2}	$(X_{p2})^2$	Y_{32}	$X_{p2} Y_{32}$
3	X_{p3}	$(X_{p3})^2$	Y_{33}	$X_{p3} Y_{33}$
...
n (OO)	$\sum_{i=1}^n X_{pi} =$ (IO)	$\sum_{i=1}^n (X_{pi})^2 =$ (11)	$\sum_{i=1}^n Y_{3i} =$ (OY)	$\sum_{i=1}^n X_{pi} Y_{3i} =$ (1Y)

Для перевода выражения (3.12) из общей формы в конкретную, характеризующую зависимость между прочностными показателями и оптимальной плотностью бетона, подставим вместо X_{pi} значения одного из показателей ($E_y, R_{сж}, R_{изг}$), а вместо Y_{3i} значение $\rho_{опт}$.

Оптимальную плотность $\rho_{опт}$ можно получить двумя путями: во-первых, экспериментальным с использованием выражения (3.4), во-вторых, теоретическим, расположив в вариационный ряд значения параметров $E_y, R_{сж}, R_{изг}$. Максимальным значениям этих параметров соответствует модель с $\rho_{опт}$. Таким образом, строится ряд с убывающими значениями параметров в пределах вида компонента бетона. Аналогичным образом составляется ряд для плотности с учетом того, что максимальным значениям прочностных показателей соответствует оптимальное значение плотности, характеризующее минимальным объемом и максимальной плотностью. На основании представленных рассуждений рассчитываем коэффициенты a_0 и a_1 . В результате получаем функционально-структурную модель единицы объема бетона.

Следующим этапом является переход от моделирования единицы объема, полученного в виде оптимальной функционально-структурной модели, к моделированию конструктивного элемента покрытия, ограниченного продольными и поперечными швами, т. е. дорожной плиты. Для этого необходимо экспериментальные прочностные результаты перевести в расчетные, которые можно применять при оценке системы D_{10} . Для этого можно использовать выражения:

$$\begin{aligned}
 E_y^{расч} &= \left(a_0^{E_y} + a_1^{E_y} \sum_{i=1}^n V_i \rho_i \right) K_3 \\
 R_{сж}^{расч} &= \left(a_0^{R_{сж}} + a_1^{R_{сж}} \sum_{i=1}^n V_i \rho_i \right) K_3 \\
 R_{изг}^{расч} &= \left(a_0^{R_{изг}} + a_1^{R_{изг}} \sum_{i=1}^n V_i \rho_i \right) K_3
 \end{aligned} \tag{3.16}$$

где K_z — коэффициент запаса при переходе прочностных значений к расчетным:

$$K_z = K_o K_g K_m K_d,$$

где K_o — коэффициент однородности структуры; K_g — коэффициент возраста; K_m — коэффициент температурный; K_d — коэффициент динамичности.

Поскольку бетонная плита лежит на упругом однородном основании, характеризуемом $E_y^{осн}$, то можно записать

$$E_y^{покр} = f(E_y^{плиты}, E_y^{осн}) \quad (3.17)$$

Следовательно, модуль упругости покрытия будет зависеть от двух факторов: от аналогичного показателя бетонной смеси и основания, на котором находится плита [50, 51].

На основании проведенных рассуждений можно заключить, что исходная система D_{10} характеризуется прочностными показателями, основным из которых является модуль упругости покрытия, зависящий от аналогичного показателя цементобетонной плиты и основания.

Для расчета прочностных показателей могут быть использованы выражения, полученные с учетом реальных коэффициентов a_0 и a_1 , а также коэффициента запаса.

3.5. Качественная оценка дефекта покрытия

В результате возникновения дефектов дорога как объект изучения переходит в другое качественное состояние, характеризуемое системой D_{20} , которая отличается от системы D_{10} следующими факторами: нарушением ровности покрытия, снижением прочности цементобетонного покрытия или основания, изменением геометрических размеров.

Нарушение ровности покрытия связано с возникновением выступающих или углубленных в покрытие участков цементобетона, имеющих различную форму и степень повторяемости. Неровности можно аппроксимировать следующими функциями (рис. 3.5) [52]:

синусоидой:

$$X = \frac{h_0 \sin 2\pi Y}{S} \quad (3.18)$$

параболой: $(Y - S/2)^2 = 2 P (X + h_0)$, учитывая, что $P = S^4/8 h_0$, можно получить:

$$\left(Y - \frac{S}{2}\right)^2 = \frac{S(X - h_0)}{4h_0}, \quad (3.19)$$

треугольной кусочно-прерывистой:

$$Y - k(S + \Delta S) = -\Delta S X / h_0 + X$$

$$\text{где } k = 0, 1, 2, \dots; \quad X = 0; \quad k(S + \Delta S) \leq Y < S + k(S + \Delta S), \quad (3.20)$$

прямоугольной кусочно-прерывистой:

$$X = 0, \quad k(S + \Delta S) \leq Y < S + k(S + \Delta S)$$

$$X = h_0, \quad S + k(S + \Delta S) \leq Y < (k + 1)(S + \Delta S) \quad (3.21)$$

$$-h_0 < X \leq 0, \quad Y = (k - 1)(S - \Delta S), \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

Рассмотренные виды неровностей связаны с определенными дефектами:

1) синусоида, треугольная и прямоугольная кусочно-прерывистая функция могут иметь место при сочетании шелушения с отставанием поверхностной обработки;

2) вторая половина синусоиды отражает такие виды дефектов, как яма или выбоина, шелушение, разрушение кромки покрытия;

3) парабола имеет место при отставании поверхностной обработки или шелушении;

4) прямоугольная кусочно-прерывистая функция описывает поперечную трещину или поперечные швы, имеющие деформацию одной из плит из-за просадки основания.

Таким образом, каждый вид дефекта, описанного соответствующей функцией, можно представить в виде простой геометрической фигуры:

1) второй половины синусоиды (ямы, выбоины, шелушение);

2) кусочно-прерывистой функции (швы, поперечные трещины);

3) параболы (бугор, шелушение, отставание поверхностной обработки).

Критическое значение дефекта связываем с определением ударных нагрузок на ходовую часть автомобиля [53, 54, 55, 56, 57, 58, 59]. При встрече автомобильного колеса, катящегося по поверхности, имеющей форму, изобра-

женную на рис. 3.5, шина ударяется о верхнее ребро препятствия. Причем из всех приведенных выше препятствий самым опасным будет яма, т. к. колесо, в зависимости от размера дефекта, вначале опускается вниз от поверхности движения, ударяется о препятствие и перемещается вверх к подвеске, увеличивая тем самым амплитуду своего колебания. В момент удара происходит деформация шины и препятствия.

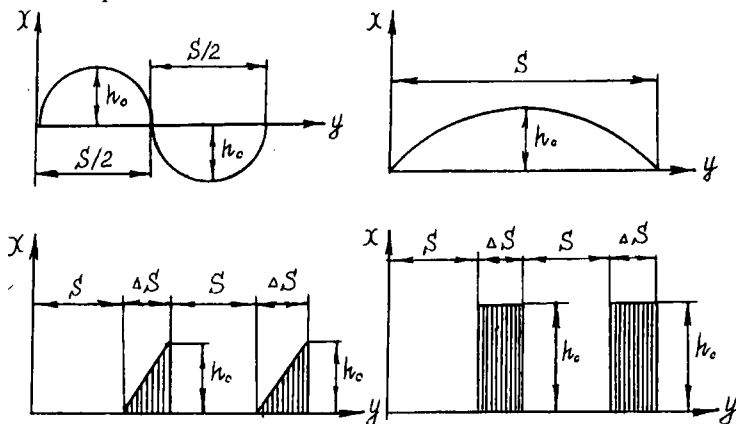


Рис. 3.5. Аппроксимация дорожных неровностей в виде функций: а — синусоиды; б — параболы; в — треугольной кусочно-прерывистой; г — прямоугольной кусочно-прерывистой.

Однако, учитывая гораздо большую жесткость препятствия (в среднем 6000–10000 кг/см), его деформация будет незначительна по сравнению с деформацией шины (жесткость шины 400–600 кг/см). Величину деформации шины [60] можно определить из выражения:

$$l_{ш} = \frac{P_a}{C_{ш}} \quad (3.22)$$

где P_a — сила удара; $C_{ш}$ — жесткость шины.

Сила радиального удара колеса о препятствие может быть определена из равенства кинетической и потенциальной энергии. Приравняв их величины можно получить:

$$P_a = \sqrt{0,5G_k \frac{C_{ш}}{g}} V_0 k_g \cos \alpha, \quad (3.23)$$

где G_x — вес колеса; V_0 — первоначальная скорость колеса; k_n — коэффициент восстановления; α — угол между направлением движения и направлением радиальной скорости колеса после удара.

Как видно из этого выражения, величина радиальной ударной силы зависит от угла α , который меняется с изменением высоты препятствия и радиуса колеса. Между этими параметрами существует зависимость:

$$\sin \alpha = \frac{R_k - h_n}{R_k}, \quad (3.24)$$

где R_k — радиус колеса; h_n — высота препятствия.

Таким образом, величина ударного усилия достигает своего максимального значения при $\alpha = 0$, т. е. $\cos \alpha = 1$. Это возможно при $h_n = R_k$. При дальнейшем увеличении высоты препятствия проезд колеса через него становится невозможным. Снижение высоты препятствия уменьшает радиальные динамические нагрузки. Причем характер этого снижения неравномерный. Зависимость ударного усилия от высоты препятствия $P_a = f(h_n)$ имеет вид, показанный на рис. 3.6.

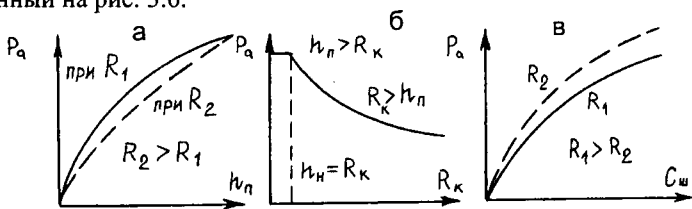


Рис. 3.6. Зависимость силы радиального удара от: а — высоты препятствия; б — радиуса колеса автомобиля; в — жесткости шины

Две кривые (рис. 3.6, а) свидетельствуют о том, что увеличение радиуса колеса снижает ударное усилие, т. е. увеличивает проходимость транспортного средства.

Если радиус колеса меньше высоты препятствия, то нагрузка остается постоянной до тех пор, пока эти два параметра не станут равными между собой, т. е. $P_a = f(R_k)$ (рис. 3.6, б). При дальнейшем увеличении радиуса колеса ($R_k > h_n$) усилие начинает уменьшаться, причем сначала интенсивно, а затем все более медленно. Значит, снижение ударных нагрузок за счет увеличения радиуса колеса происходит только в определенных пределах.

Анализ зависимости показывает, что силу радиального удара можно снизить за счет жесткости шины $P_a = f(C_{ш})$ (рис. 3.6, в). При малой жесткости шин увеличение ударной силы происходит более интенсивно, чем при более высокой жесткости. Кроме того, при одной и той же жесткости шины у колеса с меньшим радиусом ударные нагрузки выше, чем у больших колес. Исходя из вышеизложенного, можно заключить, что критическими значениями таких дефектов, как яма, выбоина, разрушение боковой кромки и отставание поверхностной обработки, будут объемы этих дефектов, соизмеримые с отпечатком следа колеса на покрытии. Учитывая неоднородность транспортного потока, выделим наиболее скоростные транспортные средства, имеющие наименьший радиус колеса, т. е. легковые автомобили. При оптимальном давлении в шине колеса (0,19–0,22 МПа), соответствующем наибольшей жесткости шины, отпечаток следа колеса будет составлять ориентировочно 0,0192 м² (площадь отпечатка колеблется от 0,018 до 0,0396 м²). Для учета глубины или высоты дефекта воспользуемся экспериментальными результатами д. т. н., профессора А. В. Жукова и д. т. н., профессора И. И. Леоновича [61].

Из графика, изображенного на рис. 3.7, видно, что наибольший рост зависимости силы радиального удара от высоты препятствия наблюдается до $h_n = 10$ см, далее прирост на каждые 10 см составляет 19%, 10%, 7%. Рассмотрим интервал $0 < h_n \leq 10$. В этом диапазоне рост силы радиального удара не прямопропорционален. При высоте преграды от 0 до 3 см прирост функции составляет 52% по отношению к значению при 10 см, при высоте преграды h_n от 3 см до 5 см — 18,5%. Далее при увеличении высоты препятствия на каждый сантиметр (от 5 до 10 см) прирост ударного усилия составляет около 7%.

Исходя из этих данных, за критическую глубину принимаем $h_n = 5$ см.

На основании вышеизложенного, с учетом глубины препятствия, ширины и радиуса колеса, заключаем, что наименьший объем дефекта, вызывающий максимальный рост силы радиального удара колеса о верхнее ребро препятствия, составляет: $V_{\text{дефекта}} = 0,00096 \text{ м}^3$ ($0,12 \times 0,16 \times 0,05$) м. Такой дефект, как трещина, а также поперечный и продольный швы, представляют собой разделение плиты на отдельные составляющие, которые приводят в конечном счете из-за вертикального смещения составляющих плиты к дефекту, описываемому кусочно-прерывистой функцией. Такой дефект всегда вызывает удар о верхнюю грань, величина которого зависит от высоты препятствия и колеблется в пределах от 1,0 до 2,0 кН от колеса легкового автомобиля. Критические значения трещин связаны в основном с шириной раскрытия трещин, поскольку

ку это влияет на проникание воды в глубь бетонного покрытия, а в зимнее время, при замерзании воды, возникает расклинивающий эффект.

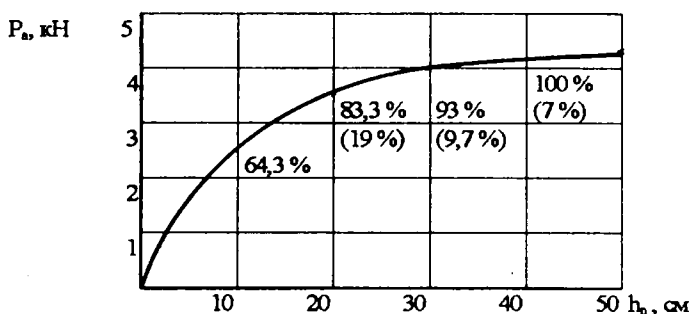


Рис. 3.7. Зависимость силы радиального удара от высоты препятствия ($k_s = 1$, $V_0 = 4$ км/ч)

Шелушение и отставание поверхностной обработки характеризуется меньшей глубиной, чем выбоина и яма, и определяются исходя из максимальной фракции верхнего слоя (2–3 см). Кроме того, этот вид дефектов не является точечным, а распространяется на значительные площади. Однако принимать во внимание их большие длины нецелесообразно, поскольку эти виды дефектов связаны не только с динамическим ударом, но и с отрывом каменного материала от основной массы бетона, что влияет на безопасность движения автомобиля.

На основании рассмотренных факторов определены критические значения основных дефектов цементобетонных покрытий (табл. 3.7).

Таблица 3.7.

Качественная характеристика дефектов

Факторы	Составляющие фактора	Трещины продольные, поперечные	Выбоины, ямы, разрывы кромки	Шелушение отставание пов. обр.	Просадка основания
1	2	3	4	5	6
Изменение	Φ_{4-1}	4–8	0,06–1	1–10	4–8
Геометрич.	Φ_{4-2}	0,001–0,01	0,06–1	0,2–8	0,5–1,0
Размеров Φ_4	Φ_{4-3}	0,3	0,05	0,03	0,0011–0,0035

1	2	3	4	5	6
Площадь дефекта	min	0,004 (4×0,001)	0,0036 (0,06×0,06)	0,2 (1×0,2)	2 (4×0,5)
	max	0,08(8×0,01)	1,0 (1×1)	80(10 × 8)	8 (8 × 1.0)
	крит.	0,012 (4×0,003)	0,04 (0,2×0,2)	1,0 (1×1)	4,0 (4×1,0)
Объем дефекта	min	0,0012 (4×0,001×0,3)	0,00018 (0,06×0,06 ×0,03)	0,006 (1×0,2×0,03)	0,0022 (4×0,5× 0,0011)
	max	0,024 (8×0,01×0,3)	0,05 (1×1×0,05)	2,4 (10×8×0,03)	0.028 (8×1,0× 0,0035)
Объем дефекта	крит.	0,0036 (4×0,003×0,3)	0,002 (0,2×0,2×0,05)	0,03 (1×1×0,03)	0,014 (4×1,0×0,0035)

3.6. Характеристика системы, отражающей дорогу после ремонта

Систему D_{30} , отражающую автомобильную дорогу с цементобетонным покрытием после ремонта, можно рассматривать с учетом качества выполненных ремонтных работ, которое будет характеризоваться следующими показателями:

- 1) отсутствием дефектов;
- 2) устранением причин возникновения дефектов;
- 3) использованием современных материалов;
- 4) использованием прогрессивных технологий.

Рассмотрим последовательно применение материалов и технологий при ремонте цементобетонных покрытий. И один и второй фактор могут характеризовать соответствующие показатели при восстановлении как прочности основания конструкции, так и цементобетона как дорожной плиты.

При использовании метода инъектирования для восстановления основания повышение его прочности будет характеризоваться прочностным показателем $R_{осн} = \max$ (рис. 3.2).

Восстановление целостности цементобетонной плиты будет связано с применением либо праймера, располагаемого между структурой старого цементобетона и новым материалом, либо нового цементобетона, заполняю-

шего место отсутствующего старого. В этом случае система будет характеризоваться выражением:

$$R_{\text{пр}}^{\text{ал}} \Rightarrow R_{\text{пр}} \Rightarrow R_{\text{max}} \quad (3.5)$$

которое можно прочитать следующим образом. Адгезионная прочность праймера должна стремиться к прочности внутри самого материала, прочность которого, в свою очередь, должна приближаться к прочности цементобетона, характеризующего плиту без дефектов. Это позволит исключить отсутствие прочности в сечении дефекта, что будет характеризоваться:

$$R_{\text{ц}} \neq 0, R_{\text{кр}}^{\text{сц}} \neq 0, R_{\text{м}}^{\text{сц}} \neq 0, R_{\text{кр}} \neq 0.$$

Согласно схеме, приведенной на рис. 3.4 система D_{30} характеризуется следующими подсистемами:

- 1) усилением основания — D_{30-1} ;
- 2) заделкой трещин — D_{30-2} ;
- 3) заделкой трещин, ям и кромки — D_{30-3} ;
- 4) восстановлением покрытия после шелушения — D_{30-4} ;
- 5) восстановлением поверхностной обработки — D_{30-5} .

Поскольку система D_{30} является заключительной в изучаемой схеме, то считаем целесообразным увязать все три системы через параметры: наличие дефекта; причина возникновения дефекта; ликвидация дефектов путем применения современных материалов и технологий. Рассмотрим три состояния дорожной конструкции (D_{10} , D_{20} , D_{30}) с учетом обозначенных параметров.

Проанализируем результаты заполнения таблицы (табл. 3.8). В системе D_{10} дефекта нет, в системе D_{20} он появился. Устранить дефект возможно сочетанием работ по закреплению основания и заделке трещин ($D_{30-1} + D_{30-2}$) или по закреплению основания и заделке выбоины ($D_{30-1} + D_{30-3}$). Восстановление бетона при шелушении и поверхностной обработки при ее отставании также приведет к ликвидации дефекта.

Причина возникновения дефекта может находиться в слабом основании, когда его прочность ниже максимально возможной величины и равна или больше нуля ($0 \leq R_{\text{осн}} < \text{max}$). Это может быть вызвано изменением гидрогеологических условий, превышением допустимой нагрузки. В этом случае необходимо решать подсистему D_{30-1} , т. е. усиливать основание инъекционным способом. Следует отметить, что если причина кроется в потере прочности основания, то она обязательно вызовет возникновение трещин, выбо-

ин и ям. И тогда придется выполнять дополнительно работы, связанные с подсистемами D_{30-2} и D_{30-3} . Следующий ряд причин может относиться к самому бетону, где дефект мог возникнуть из-за одной из трех видов коррозии, нарушения режима приготовления, технологии укладки или режима твердения. В этом случае усиливать основания нет необходимости, и ремонтные работы касаются только подсистем D_{30-2} – D_{30-5} .

Третьей причиной возникновения дефектов может быть разрушающая нагрузка, которая приведет к разрушению бетона при наличии следующих факторов: усталости материала, нарушении режима твердения, превышении фактической нагрузки над расчетной. В этом случае усиление основания становится обязательным и первостепенным фактором. Поскольку такая нагрузка ведет к просадке основания, возникновению трещин и выбоин, то необходимо выполнить работы, обозначенные подсистемами D_{30-1} – D_{30-3} .

Третьей составляющей является ликвидация дефекта путем воздействия эффективного материала, способного упрочнить разрушаемую конструкцию. На основании ранее представленных выкладок, материал может быть представлен либо новым прочным бетоном, либо материалом, отличным от бетона, но ввиду своих прочностных качеств упрочняющий конструкцию в целом. В этом случае для обеспечения высокого сцепления между старым бетоном и новым материалом возможно применение праймера, который должен обладать следующими обязательными качествами:

1) иметь высокое сцепление как со старым бетоном, так и с новым материалом ($R_{пр}^{сч}$);

2) по своей прочности не уступать прочности нового материала, ($R_{пр} = R_{max}$).

Таким образом, системы D_{10} и D_{20} не имеют того материала, который будет применяться при восстановлении конструкции, и, следовательно, воздействие нового материала на усиление конструкции может быть при усилении основания путем закрепления грунтов или дорожно-строительных материалов инъекционными растворами, а также при заделке выбоин и восстановлении бетона при шелушении.

Праймер, характеризующийся высокими сцеплением и адгезией, наибольшее применение найдет при заделке трещин и восстановлении поверхностной обработки

Четвертой составляющей является ликвидация дефекта по современным технологиям и способам. Причем эти технологии разработаны только для подсистем D_{30-1} – D_{30-5} . Решение вышеназванных подсистем может быть

выполнено с учетом следующих основных операций: инъектирования, герметизации, распиловки трещин, замены разрушенного бетона новым.

Таблица 3.8.

Параметры характеризующие систему D_{30}

Составляющие	Качества составляющих	D_{10}	D_{20}	Подсистемы D_{30}				
				D_{30-1}	D_{30-2}	D_{30-3}	D_{30-4}	D_{30-5}
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Устранение причины возникновения дефекта	$R_{осн}$	$R_{осн} \rightarrow \max$	$0 \leq R_{осн} < \max$	$R_{осн} \rightarrow \max$				
	$R_{твх}$	$R_{твх}$	$R_{твх} = 0$		$D_{30-2} + D_{30-3}$ $D_{30-2} + D_{30-4}$ D_{30-5}	} причина устранена		
	$R_{твх}$	нет разрушения	разрушение	ликвидировано разрушение для $R_{твх}$				
Воздействию ющий материал при ремонте	$R_{твх}$	(нового материала нет)		$D_{30-1} \Rightarrow R_{твх}$	D_{30-3} D_{30-4}		$\Rightarrow R_{твх}$	
	$R_{тп}$			$R_{тп} \Rightarrow \max$		$R_{тп}^{сн} \Rightarrow \max$		
	$R_{тп}^{сн}$			$R_{тп}^{сн} \Rightarrow \max$				
Воздействию ющая технология при ремонте	Инъектирование	(в новом и разрушенном бетоне и конструкции новой технологии нет)		D_{30-1} D_{30-2} D_{30-3}	} применение прогресс. технологий			
	герметизация			технология				
	распиловка			D_{30-2} D_{30-3}	} прогресс. технol.			
	арматура			D_{30-2} D_{30-3}	} прогресс. технol.			
	фрезерование			V_{30-4} V_{30-5}	} прогресс. технol.			

Инъектирование грунтов и дорожно-строительного материала, находящегося в основании цементобетонного покрытия, позволит укрепить конструкцию путем усиления основания. При этом необходимо провести заделку трещин и выбоин, чтобы предотвратить попадание воды с покрытия к основанию. Кроме того, герметизацию трещин и заделку выбоин также можно производить способом инъектирования.

Технология герметизации может быть связана в основном с ремонтом трещин.

Распиловка должна применяться при глубокой заделке трещин и трибоактивации [62, 63] поверхности старого бетона при заделке выбоин. В этих же случаях может применяться закладка арматуры, которая позволит значительно упрочнить место дефекта.

Фрезерование верхнего слоя возможно главным образом при ликвидации старого слоя бетона, подвергшегося шелушению, и при ликвидации остатков разрушенной поверхностной обработки перед устройством новой.

На основании проведенного анализа можно сделать выводы, что наиболее трудоемкие процессы характеризуют операции по заделке трещин и выбоин, а также что основной подсистемой из всех составляющих систему D_{30} является подсистема, характеризующая усиление основания D_{30-1} , поскольку невыполнение этой подсистемы не позволит ликвидировать причины возникновения дефекта, зависящие от потери прочности основания и повышения транспортной нагрузки.

Выводы по главе 3

Республика Беларусь обладает разветвленной сетью автомобильных дорог. Основные транспортные магистрали имеют цементобетонное покрытие. В последнее время под действием погодных-климатических и эксплуатационных факторов на этих покрытиях начинают возникать дефекты, ухудшающие транспортно-эксплуатационные показатели автомобильных дорог.

Объект изучения — автомобильная дорога — рассмотрен в трех состояниях, от дороги, лишенной всяческих дефектов (D_{10}), к дороге, имеющей дефекты (D_{20}) и, наконец, к отремонтированной дороге (D_{30}).

Переход от системы D_{10} к D_{20} возможен при возникновении причинных факторов внутреннего и внешнего характера во время строительства и эксплуатации дороги. Дефекты в цементобетонном покрытии возникают при наличии таких определяющих факторов, как концентрация напряжений, воздействие динамических нагрузок, возникновение различных видов коррозии и деформации, как основания так и самого земляного полотна автомобильной дороги. На основании анализа, выполненного с учетом схемы образования кристаллической структуры бетона, можно заключить, что условия, способствующие развитию дефектов возникают как в процессе твердения цементного геля, так и при дальнейшем упрочнении кристаллической структуры. Прогрессированию процессов способствует открытость поверхности покрытия, наличие большого количества пор, перепад влажности и температуры между верхней и нижней плоскостями плит, водно-тепловой режим земляного полотна.

Обозначив прочность составляющих компонентов бетона, а также выразив контактные зоны заполнителей с цементным камнем через сцепление, описали возможные виды дефектов.

Система оценки дефекта основывается на разработке структурной модели, представляющей собой оценку каждого компонента, взятого в определенном объеме и характеризующего плотностью. Выполнено это на основании принципа континуумизации теории непрерывных сред.

Функционально-структурную модель можно составить на основании прочностных показателей, характеризующих единицу объема. От этой модели можно перейти к функционально-структурной модели конструктивного элемента дорожной одежды.

Рассматривая качественную оценку дефекта, влияющего на колебательные движения транспорта, приходим к выводу, что все дефекты могут быть описаны математическими функциями. Графики зависимости силы радиального удара от высоты препятствия и радиуса колеса показывают, что снижение ударных нагрузок за счет увеличения радиуса колеса целесообразно только в определенных пределах.

Одна из причин возникновения дефектов может заключаться в нарушении устойчивости основания, что повлечет за собой возникновение дефектов в виде трещин на покрытии. Следовательно, никакие косметические ремонты не позволят устранить причину возникновения дефекта, и только после усиления основания способом инъектирования ремонтные работы по ликвидации дефектов на покрытии дадут желаемый результат.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НАГНЕТАНИЯ

4.1. Обоснование параметров, характеризующих технологию инъецирования

Инъецирование грунтов характеризуется такими технологическими параметрами, как давление и время. Эти два параметра будут характеризоваться расходом и скоростью распространения раствора. Между первыми и вторыми показателями существует взаимосвязь (рис. 2.3).

Режим инъецирования при постоянном давлении ($P = \text{const}$) вызывает уменьшение со временем как расхода, так и скорости распространения раствора. Это наиболее часто применяемый и простой режим. Раствор, распространяясь в поровом пространстве грунта, полностью его заполнит. За счет вязкости раствора уменьшается эффективный размер пор, и фильтрация затормаживается. В слоях грунтового массива, расположенных вблизи инъектора, создается повышенное давление.

Второй режим инъецирования при постоянном расходе ($Q = \text{const}$) возможен только при постоянном увеличении давления нагнетания, при этом скорость фильтрации будет все равно уменьшаться. Таким образом, постоянный расход при замедленной скорости приведет к изменению порового пространства, что вызовет необходимость увеличения давления.

В Ростовском ПромстройНИИпроекте были проведены исследования [64] режимов нагнетания при постоянной скорости распространения. Учитывая, что скорость можно выразить через радиус распространения в единицу времени, а расход — через произведение скорости и площади, необходимо отметить, что для данного режима радиус и площадь увеличиваются пропорционально времени нагнетания. Это возможно, если инъекционный раствор не встречает на своем пути сопротивления ни со стороны воды, заполняющей поры, ни со стороны вязкого раствора. В этом случае система пред-

ставляет собой бесконечно пористую структуру, в которой раствор, не встречая сопротивления, равномерно движется по поровым каналам.

В естественных природных условиях наибольшее распространение и применение имеют первые две схемы (при $P = \text{const}$ и $Q = \text{const}$), причем предпочтение как наиболее простой в эксплуатации может быть отдано первой. Кроме того, при инъецировании верхних слоев земляного полотна по второй схеме повышение давления приводит к разрывам грунтовой толщи и выходу раствора на поверхность, что является отрицательным фактором. На основании этих доводов для инъецирования растворов на небольшие глубины может быть рекомендована первая схема.

При глубинном инъецировании грунтов применяются следующие величины давлений нагнетания: при глубине 2–4 м — 0,3–0,5 МПа; при глубине 4–10 м — 0,5–1,0 МПа.

Расход раствора является производной характеристикой от давления и времени нагнетания, а также зависит от фильтрационных свойств грунта и плотности раствора. В свою очередь, параметры инъецирования (радиус и глубина распространения раствора) зависят от всех вышеперечисленных факторов. Следовательно, можно записать:

$$R, h = f(P, Q, t, K_{\phi}, V_w, \eta) \quad (4.1)$$

где V_w — влажность грунта; η — вязкость раствора.

Учитывая большое количество переменных факторов, сгруппируем показатели для облегчения установления зависимостей:

- 1) $Q = f(P)$ при $K_{\phi} = \text{const}$ и $t = \text{const}$;
- 2) $Q = f(t)$ при $K_{\phi} = \text{const}$ и $P = \text{const}$;
- 3) $P = f(K_{\phi})$ при $Q = \text{const}$;
- 4) $P = f(V_w)$ при $K_{\phi} = \text{const}$;
- 5) $P = f(\eta)$ при $K_{\phi} = \text{const}$;
- 6) $h = f(P)$ при $K_{\phi} = \text{const}$ и $t = \text{const}$;
- 7) $R = f(P)$ при $K_{\phi} = \text{const}$ и $t = \text{const}$.

Рассмотрим зависимость каждого из перечисленных параметров от характеристик грунта, раствора и других соответствующих факторов.

Исследования технологических параметров проводились на установке, представляющей собой емкость, в которую помещался раствор и создавалось давление, контролируемое манометрами. С емкостью по принципу сообщающихся сосудов была соединена стеклянная трубка. По этой трубке

определялся расход раствора. При открывании вентилей раствор по трубопроводу через инжектор нагнетался в грунт, помещенный в куб с прозрачными стенками.

Исследования проводились на инжекторах двух типов отнесенных, в зависимости от отношения длины перфорированной части инжектора к его диаметру, к радиальному и сферическому источникам.

Для исследования были выбраны грунты с K_{ϕ} от 3,0 до 10,0 м/сутки, поскольку предварительные результаты свидетельствовали об эффективности инжектирования при ограниченном времени нагнетания именно в этих грунтах.

Результаты исследований по применимости инжекторов различной конструкции показали, что для грунтов с $K_{\phi} > 5,5$ м/сутки эффективнее применение радиального источника, а с $K_{\phi} < 5,5$ м/сутки — сферического.

Расход. Количество рабочего раствора Q , необходимого для закрепления способом инжектирования, зависит от пористости грунта:

$$Q = V n \alpha, \quad (4.3)$$

где $V = \pi r^2 l$ — объем закрепленного грунта, условно принятый за объем цилиндра m^3 ; n — пористость грунта, доли единицы; α — коэффициент заполнения пор грунта раствором, принимаемый равным 0,7–0,9 в зависимости от степени влажности грунта.

Этот же показатель может быть представлен на основе удельного расхода раствора на 1 пог. м участка дороги:

$$Q = \alpha K l s [(H + 0,2) - H_{од}] (1,45 V_w - V_{wf}) \quad (4.4)$$

где K — коэффициент, учитывающий расход раствора в основании дорожной одежды: для гравийно-песчаных оснований $K=1,8-2,2$; l — длина участка, равная 1 пог. м; H — глубина погружения инжектора, м; s — ширина закрепленного участка, м; $H_{од}$ — толщина дорожной одежды, м; V_w — оптимальная влажность грунта, в долях единицы; V_{wf} — фактическая влажность грунта, в долях единицы.

Рассматривая расход жидкости через скорость фильтрации на площадь поперечного сечения, можно утверждать, что расход жидкости зависит от параметров грунта и воды, содержащейся в порах, а также от создаваемого давления.

Для обоснования оптимального значения времени нагнетания при поверхностном инжектировании проанализированы результаты эксперименталь-

ных исследований расхода раствора в зависимости от продолжительности нагнетания и построены графики (рис. 4.1.). Вместе с тем проведены расчеты по определению степени заполнения пор грунта раствором на основании экспериментальных данных. Расчеты проводились по схеме:

- 1) определение области распространения раствора;
- 2) определение веса грунта;
- 3) определение веса вяжущего вещества (расчет производился на карбамидную смолу "Крепитель М-3");
- 4) определение объема вяжущего вещества;
- 5) определение объема пор грунта;
- 6) определение степени заполнения пор грунта раствором.

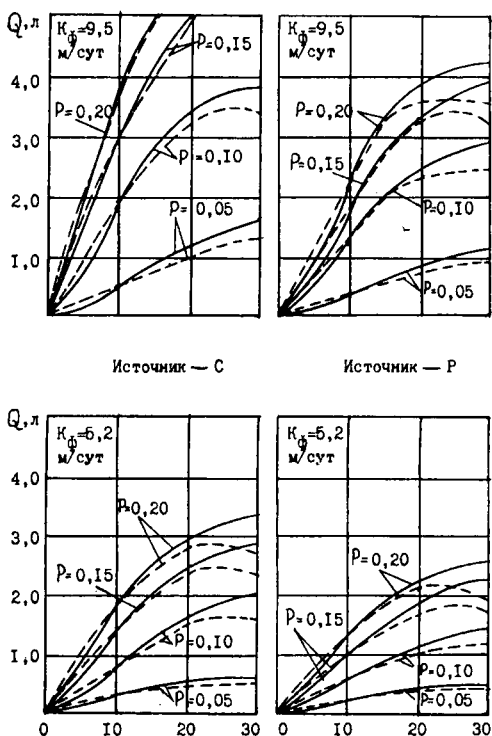


Рис. 4.1. График зависимости расхода раствора от времени нагнетания.
Условные обозначения: — расчетные данные; - - - экспериментальные данные.

Анализ графиков позволил установить следующие зависимости.

1. При времени нагнетания равном 5 с экспериментальный расход вещества всегда больше расчетного. Это объясняется тем, что раствор, выходя из отверстия инжектора, встречает на своем пути пористую среду. Для установления ламинарного режима течения необходимо создать определенное давление, на что расходуется дополнительное количество вязущего вещества. Это подтверждает возникновение разности давлений внутри инжектора и на внешней его стороне, что вызывает возникновение потерь, которые в расчетах учитываются через коэффициент гидравлических потерь.

2. При времени нагнетания 10–15 с результаты опытных и экспериментальных данных идентичны.

3. При времени нагнетания 20–30 с результаты опытных данных всегда меньше расчетных. Для объяснения этого факта необходимо обратиться к графику зависимости параметров нагнетания от времени (рис. 2.3). Каждая из приведенных зависимостей представляет основной фрагмент, характеризующий длительное нагнетание раствора. По этим зависимостям видно, что кривые исходят не из начала координат, хотя при нулевом времени параметры тоже равны нулю. Рассматривая первую, наиболее распространенную схему нагнетания при постоянном давлении, можно утверждать, что расход и скорость распространения раствора должны понижаться при длительном времени нагнетания. Соединив общепринятые параметры с полученными результатами, получаем график, изображенный на рис. 4.2.



Рис. 4.2. График зависимости расхода раствора от времени нагнетания.

При глубинном инъецировании невозможно установить зависимость между исходными условиями и установившимся режимом. А при поверхностном инъецировании удалось установить, что при времени нагнетания равном 20 с намечается снижение расхода раствора за счет того, что поры грун-

та, расположенного вблизи инжектора, перенасыщаются раствором, нарушается ламинарный режим течения и расход раствора уменьшается.

При времени нагнетания равном 30 с расход снижается по отношению к расходу при 20 с, что свидетельствует о наличии перегиба кривой в интервале равном 20–30 с.

На основании приведенных данных выбираем время нагнетания при поверхностном инъецировании равное 10–15 с. Кроме технических выводов необходимо руководствоваться условиями производительности процесса инъецирования, которые требуют наименьшего расхода времени. Исходя из этих соображений можно остановиться на 10 с нагнетания раствора.

Давление. Д. В. Волоцкой [6] рекомендует принимать давление нагнетания раствора в грунт таким образом, чтобы на поверхности покрытия не возникло неровностей и трещин. Для этого допустимое давление устанавливается из условия равновесия системы “масса дорожной одежды — давление в порах грунта” по выражению

$$P_n \leq P_p, \quad (4.5)$$

где P_n — давление нагнетаемого раствора, МПа; P_p — противодействие от массы вышележащих слоев дорожной одежды, МПа,

$$P_p = \sum \rho_i z_i + A, \quad (4.6)$$

где ρ_i — плотность конструктивных слоев дорожной одежды, г/см³; z_i — толщина тех же слоев, см; A — коэффициент, учитывающий монолитность слоев дорожной одежды, принимаемый равным 0,2–0,4.

Зависимость давления нагнетания от вида грунта $P = f(K_\phi)$. Основная характеристика грунта, отражающая эффективность инъецирования, это его фильтрационные свойства.

При глубинном инъецировании растворов в хорошо проницаемые грунты давление составляет 0,3–1,0 МПа, а в непроницаемые (недренирующие) породы — свыше 1,0–1,5 МПа, причем при высоком давлении происходит разрыв сплошности грунта [6]. Давление для поверхностного инъецирования в 5–8 раз ниже, чем для глубинного. График зависимости давления нагнетания от коэффициента фильтрации при поверхностном инъецировании (рис. 4.3) показывает, что с увеличением фильтрационных свойств грунта давление снижается. Увеличение объема раствора для нагнетания в один и тот же грунт требует большего давления, что сказывается на степени заполнения пор грунта раствором.

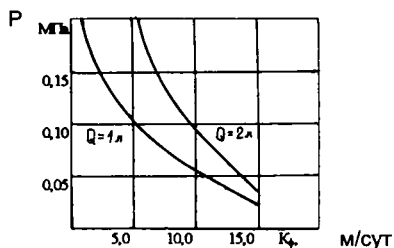


Рис. 4.3. Зависимость давления нагнетания от фильтрационных свойств грунта при времени нагнетания $t=10$ с.

Зависимость давления нагнетания от влажности и плотности грунта $P = f(V_w, \rho_d)$. Влажность грунта является важной характеристикой физического состояния породы. От нее зависит возможность придания грунту максимальной плотности. Кроме того, наличие воды в порах грунта сужает фильтрационные каналы и в определенной степени разбавляет раствор, уменьшает его концентрацию. Оптимальная влажность выбранных грунтов составляла 8,0–9,5%, что соответствовало среднестатистическим показателям для песков. Для характеристики физического состояния породы была определена степень влажности:

$$S_r = \frac{V_w}{V_{w\max}}, \quad (4.7)$$

где V_w — влажность грунта; $V_{w\max}$ — полное водонасыщение.

Выбранные грунты имели $S_r = 0,40-0,43$, что относит их к категории маловлажных. Зависимость давления нагнетания от влажности грунта представлена на рис. 4.4.

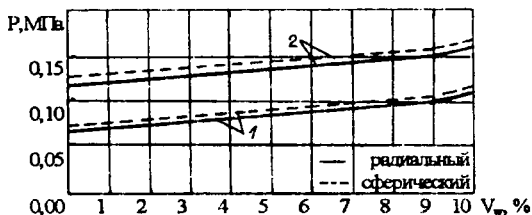


Рис. 4.4. График зависимости изменения давления от влажности грунта при K_f равном: 1 — 9,5; 2 — 3,5 м/сут.

Рассмотрим процесс инъектирования в зависимости от содержания воды в грунте. Вес грунта G можно выразить через объем V_g и его плотность ρ , т. е.

$$G = V_g \rho \quad (4.8)$$

Согласно оптимальным значениям влажности, приведенным выше, для получения максимальной плотности грунта необходимое количество воды составит

$$G_{w \text{ опт}} = 0,09 G \quad (4.9)$$

Следует учесть, что это количество воды заполняет только 40–43% от объема пор, т. е. примерно такое же пространство в порах остается свободным для заполнения раствором.

Дальнейшие рассуждения приведем на примере карбамидной смолы “Крепитель М”, представляющей собой продукт, содержащий сухих веществ около 50 %. Для закрепления грунта рекомендуется применять 5 % смолы от веса грунта по сухому остатку, т.е.

$$G_{c.o.} = 0,05 G \quad (4.10)$$

Поскольку сухой остаток разбавляется водой в соотношении 1 : 1, то в смоле содержится такое же количество жидкой фазы:

$$G_w = G_{c.o.} = 0,05 G \quad (4.11)$$

Общий вес смолы:

$$G_c = G_w + G_{c.o.} = 0,1G \quad (4.12)$$

Для закрепления грунтов рекомендуется применять растворы различной концентрации и максимального разбавления (1:1):

$$0,1G + 0,1G = 0,2G \quad (4.13)$$

В этом весе раствора содержится сухого остатка в количестве, определяемом из выражения 4.10., а жидкой фазы —

$$G_w = 1,5 G \quad (4.14)$$

Следует учитывать, что для отверждения смолы применяется кислый отвердитель в количестве 5 % от массы смолы нормальной концентрации, т.е.

$$G_{от} = 0,05(0,1G) = 0,005G \quad (4.15)$$

Тогда общее количество воды в грунте с учетом оптимальной влажности составит:

$$V_w = 0,09G + 0,05G + 0,005G = 0,145G \quad (4.16)$$

Следовательно, чтобы получить концентрацию раствора при разбавлении смолы водой в соотношении 1:1, необходимо добавить воды в количестве, равном весу отвердителя:

$$V_w = 0,15G - 0,145G = 0,005G \quad (4.17)$$

Общее количество воды равное 0,15 G будет соответствовать степени влажности $S_r = 0,71$, и грунт будет относиться к влажным ($0,5 < S_r \leq 0,8$, согласно СТБ 943-93) [65].

Как было сказано выше, оптимальная влажность грунта является обязательным фактором для получения максимальной плотности. Поскольку фильтрационные характеристики определялись у грунта, имеющего максимальную плотность, то экспериментальные исследования по изменению технологических параметров нагнетания показали, что для получения одних и тех же областей пропитки для грунтов с плотностью ниже максимальной, а следовательно, с большим коэффициентом фильтрации, необходимо создавать меньшее давление, поскольку прежнее приведет к выбросу раствора.

Зависимость давления нагнетания от плотности раствора $P=f(\eta)$.

Нагнетание растворов различной плотности приводит к изменению давления нагнетания. Плотность в экспериментальных работах колебалась от 1,1 до 1,2 г/см³ (рис. 4.5).

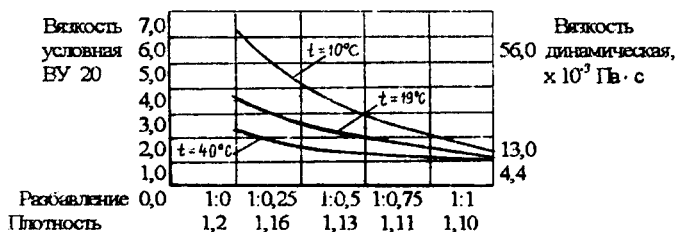


Рис. 4.5. Изменение вязкости раствора в зависимости от его разбавления.

Зависимость изменения давления от рабочей концентрации раствора представлено на графике, изображенном на рис. 4.6. Анализ графика показывает, что для нагнетания раствора одной и той же плотности в грунты с большими фильтрационными свойствами необходимо применять меньшее давление.

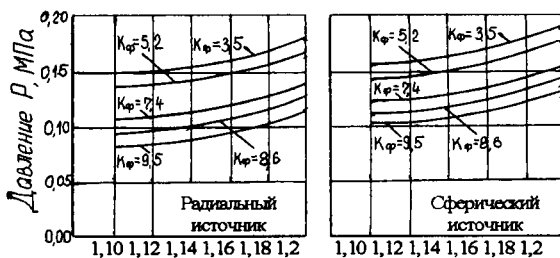


Рис. 4.6. График зависимости давления нагнетания от плотности раствора.

Учитывая результаты предыдущих исследований, касающихся ламинарного режима течения жидкости, рекомендуем применять для закрепления грунтов следующие концентрации:

- для сухих грунтов — растворы плотностью 1,1 — 1,2 г/см³;
- для грунтов, имеющих влажность 5–6% — растворы плотностью 1,13–1,23 г/см³;
- для имеющих оптимальную влажность (8–9%) — растворы плотностью 1,2–1,16 г/см³;
- для имеющих повышенную влажность (до 15%) — раствор плотностью 1,2 г/см³ и в количестве на 1–3% больше, чем для закрепления грунтов с оптимальной влажностью.

Для закрепления грунтов с $K_f \geq 7,0$ м/сут. наиболее рационально применять раствор плотностью 1,16–1,2 г/см³. Для грунта с $K_f \leq 5,5$ м/сут — раствор плотностью 1,10–1,13 г/см³. Интервал, характеризующий фильтрационные свойства грунта в пределе от 5,5 м/сут до 7,0 м/сут, применим для раствора плотностью 1,13–1,16 г/см³.

Зависимость давления от времени нагнетания раствора $P = f(t)$.
 При глубинном нагнетании раствора продолжительность нагнетания ограничивается только временем гелеобразования раствора от момента введения в него отвердителя до перехода из жидкого состояния в желеобразное и может быть определена из выражения:

$$t = t_g K_{\text{зап}}, \quad (4.18)$$

где t_g — время гелеобразования раствора; $K_{\text{зап}}$ — коэффициент запаса равный 0,8.

Время гелеобразования, для растворов, применяемых при инъектировании, можно принять по табл. 4.1.

Таблица 4.1.

Время гелеобразования растворов

Рецептура	Компоненты смеси	Плотность раствора	Объемное соотношение	Время гелеобразов.
1	2	3	4	5
1	«Крепитель М» Щавелевая кислота	1,15 1,021–1,023	1 6–8	10–60 мин
2	«Крепитель М» Соляная кислота	1,07–1,08 1,013	1 : 1 3–6	30 мин–3 ч
3	Силикат натрия Ортофосфорная кислота	1,19 1,025	1 3,4–6	1–10 ч
4	Силикат натрия Кремнефтористоводородная кислота	1,25–1,3	5–6	при $t=+20^{\circ}\text{C}$ 30–40 мин при $t=+10^{\circ}\text{C}$ 1 ч–1,25 ч
5	Силикат натрия Алюминат натрия	1,15 1,05	5–4 1	1–3 ч

Таким образом, гелеобразование смоляных и силикатных рецептур находится в пределах от 30 мин до 10 ч.

При поверхностном инъектировании одним из главных параметров является время нагнетания, поскольку от него зависит качество инъектирования и производительность технологического процесса. Естественно, чем больше время нагнетания, тем больше область пропитки. Однако наряду с увеличением радиуса распространения раствора увеличивается и глубина пропитки, возникает объем перенасыщенный вяжущим материалом, что затруднит уплотнение и повысит расход материала. На основании экспериментальных данных построен график зависимости создаваемого давления от времени пропитки (рис. 4.7). На основании графика можно сделать вывод, что большее давление необходимо применять при малом времени нагнетания.

Зависимость давления от глубины нагнетания $P = f(h)$. В результате экспериментальных исследований определены минимальные толщины зем-

ляного полотна, при которых давление раствора, выходящего из иньектора, было выше, чем давление массы грунта, с учетом сил сопротивления сдвигу. Расчетные и экспериментальные данные ($K_{\phi} = 9,5$ м/сут.) позволили построить график зависимости давления от глубины нагнетания (рис. 4.8).

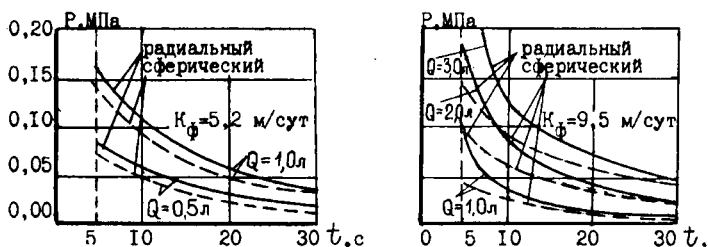


Рис. 4.7. График зависимости давления нагнетания от времени.

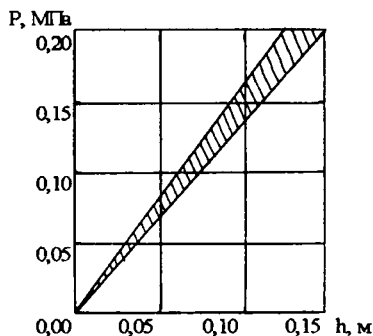


Рис. 4.8. График зависимости давления от глубины нагнетания.

Заштрихованная часть графика включает нестабильные результаты, при которых возможен выброс раствора. Данная зависимость легла в основу разработки конструкции иньектора. В предварительных опытах по нагнетанию раствора в поверхностные слои земляного полотна длина иньектора колебалась в пределах 0,21–0,15 м. После получения данных, характеризующих режимы нагнетания, длина была принята равной 150 мм. После нахождения длины иньектора проведены лабораторные исследования по определению его перфорации.

Анализ результатов нагнетания через шесть различных иньекторов позволил выбрать два, которые в зависимости от отношения длины перфорированной части к диаметру могут быть отнесены к сферическому и радиально-

му источникам. В дальнейшем эти инжекторы обозначены символами “С” и “Р” соответственно. С этими инжекторами было проведено нагнетание растворов в грунты, выбранные для исследований.

Экспериментальные результаты позволили заключить, что резкой границы применимости инжекторов выбранной конструкции установить не удалось, однако наиболее вероятной границей является грунт с $K_{\phi} = 5,5$ м/сут., в связи с чем рекомендовано применять инжектор с равномерно расположенными отверстиями (тип Р) на грунтах с $K_{\phi} > 5,5$ м/сут., а инжектор с отверстиями, сосредоточенными на конце (тип С), и они должны быть на грунтах с $K_{\phi} < 5,5$ м/сут. Иными словами, чем больше коэффициент фильтрации, тем меньше должен быть диаметр отверстий и они должны быть равномерно расположены по всему телу инжектора. И чем меньше коэффициент фильтрации, тем больше должны быть диаметры отверстий, сосредоточенных на конце инжектора.

Радиус и глубина пропитки. При изучении нагнетания вязких растворов в пористую систему, представляющую собой грунты различного гранулометрического состава, область распространения раствора можно рассматривать как объемы различной конфигурации (рис. 4.9). При глубинном вертикальном инжектировании область распространения раствора представляет собой геометрическую фигуру, состоящую из цилиндра, полусферы и полуэллипсоида, т. е.

$$\begin{aligned} V_{\sigma} &= V_1 + V_2 + V_3 = \frac{2\pi}{3} R^3 + \pi R^2 h_2 + \left(\pi R^2 h_4 + \frac{2\pi}{3} R^3 \right) = \\ &= \pi R^2 (1,3R + h_2 + h_4); \\ h_{\sigma} &= h_1 + h_2 + h_3 = R + h_2 + h_4 + R = 2R + h_2 + h_4, \end{aligned} \quad (4.19)$$

где V_1 — объем полусферы; V_2 — объем цилиндра; V_3 — объем полуэллипсоида.

Особенность данной фигуры заключается в том, что нижняя часть объема представляет собой полусферу, сдвинутую вертикально вниз на расстояние h_4 от конца перфорированного участка инжектора.

Аналогичным образом рассмотрим области распространения раствора для остальных случаев:

$$\begin{aligned} V_n &= V_2 + V_3 = \pi R^2 h_2 + \frac{2\pi}{3} R^3 = \pi R^2 \left(h_2 + \frac{2}{3} R \right); \\ h_n &= h_2 + h_3 = h_2 + R; \end{aligned} \quad (4.20)$$

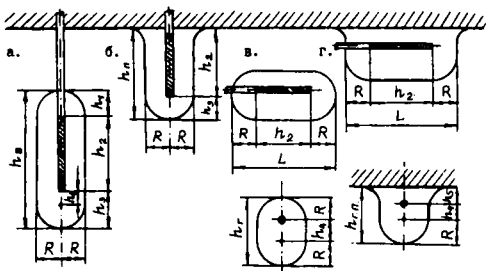


Рис. 4.9. Области распространения раствора в грунтах:

а) при глубинном вертикальном инъецировании; б) при поверхностном вертикальном инъецировании; в) при глубинном горизонтальном инъецировании; г) при поверхностном горизонтальном инъецировании.

$$V_{\Gamma} = V_1 + V_2 + V_3 = \left(\frac{2\pi}{3} R^3 + \frac{\pi R^2}{2} h_4 \right) + \left(\frac{\pi R^2 h_2}{2} + h_4 h_2 2R + \frac{\pi R^2 h_2}{2} \right) + \left(\frac{2\pi}{3} R^3 + \frac{\pi R^2}{2} h_4 \right) = \pi R^2 (h_4 + h_2) + 2R \left(\frac{2\pi}{3} R^2 + h_2 h_4 \right); \quad (4.21)$$

$$h_r = 2R + h_4; \quad L = 2R + h_2;$$

$$V_{\Gamma\Pi} = V_1 + V_2 + V_3 = \left(\frac{\pi R^2 (h_4 + h_5)}{2} + \frac{\pi}{3} R^3 \right) + \left(2R h_2 h_5 + 2R h_2 h_4 + \frac{\pi R^2 h_2}{2} \right) + \left(\frac{\pi R^2 (h_4 + h_5)}{2} + \frac{\pi}{3} R^3 \right) = \pi R^2 \left[(h_4 + h_5) + \frac{2R}{3} + \frac{h_2}{2} \right] + 2R h_2 (h_5 + h_4); \quad (4.22)$$

$$h_{\Gamma\Pi} = h_5 + h_4 + R;$$

$$L = 2R + h_2,$$

где h_1 — высота верхней зоны $h_1 = R$; h_2 — длина перфорированной части инъектора; h_3 — высота нижней зоны, для первого случая $h_3 = h_4 + R$; h_4 — расстояние между инъектором и центром полусферической зоны; h_5 — рас-

стояние между центром инжектора и верхней непроницаемой плоскостью; h_n — глубина при поверхностном вертикальном инжектировании; h_2 — глубина при глубинном горизонтальном инжектировании; h_{zn} — глубина при поверхностном горизонтальном инжектировании; R — радиус распространения раствора.

Области распространения, изображенные на схемах б и з (рис. 4.9), имеют наплывы на границе пористой системы с непроницаемой плоскостью, Это объясняется избытком раствора в этой области, поскольку непроницаемая плоскость не позволяет образовать полусферическую зону. Это подтверждается результатами экспериментов.

Для областей, изображенных на схемах а, в, з, характерно образование удлиненной нижней зоны на величину h_4 , которая зависит главным образом от продолжительности нагнетания раствора. Объясняется это тем, что раствор обладает определенным весом.

Анализируя глубины проникания раствора для каждого из рассмотренных случаев, можно заключить, что при глубинном инжектировании вертикальное расположение инжектора позволяет получить наибольшую глубину распространения раствора для грунтов с одинаковыми фильтрационными свойствами.

Для поверхностного инжектирования наибольшая глубина проникания раствора характерна для второй схемы (рис. 4.9, б), поскольку $h_2 > h_4 + h_3$.

На основании опытных данных построены графики зависимости глубины распространения раствора от создаваемого давления (рис. 4.10). Анализ графиков показывает, что с увеличением давления и времени нагнетания увеличивается глубина проникания раствора, причем для сферического инжектора эта глубина имеет большее значение, чем для радиального.

Основным параметром, определяющим эффективность инжектирования, является радиус распространения раствора, величина которого зависит не только от технологических параметров, но и от характеристики грунта и вязкости раствора.

В зависимости от проницаемости раствора ориентировочное значение радиуса распространения раствора [б] при глубинном инжектировании можно определить по табл. 4.2.

Ориентировочные значения радиуса распространения раствора

Коэффициент фильтрации грунта, м/сут.	Радиус закрепления грунта, м	Коэффициент фильтрации грунта м/сут.	Радиус закрепления грунта, м
0,1-0,3	0,2-0,3	5-10	0,65-0,85
0,3-1	0,3-0,5	10-20	0,8-0,95
1-5	0,5-0,65	20-50	0,9-1,0

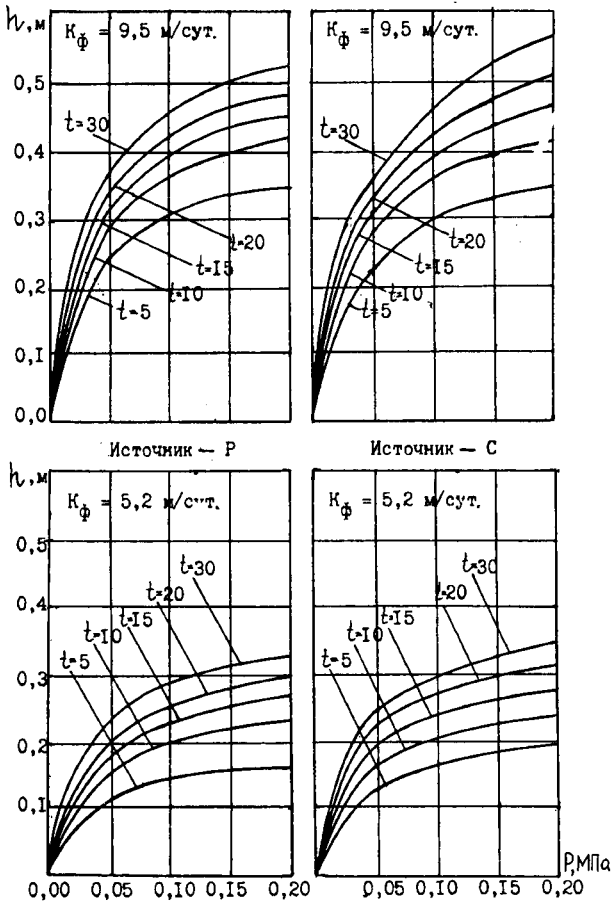


Рис. 4.10. График зависимости глубины распространения раствора от давления.

При нагнетании вязких растворов в верхние слои земляного полотна получены экспериментальные данные, на основании которых построены графики зависимости радиуса распространения раствора от создаваемого давления (рис. 4.11).

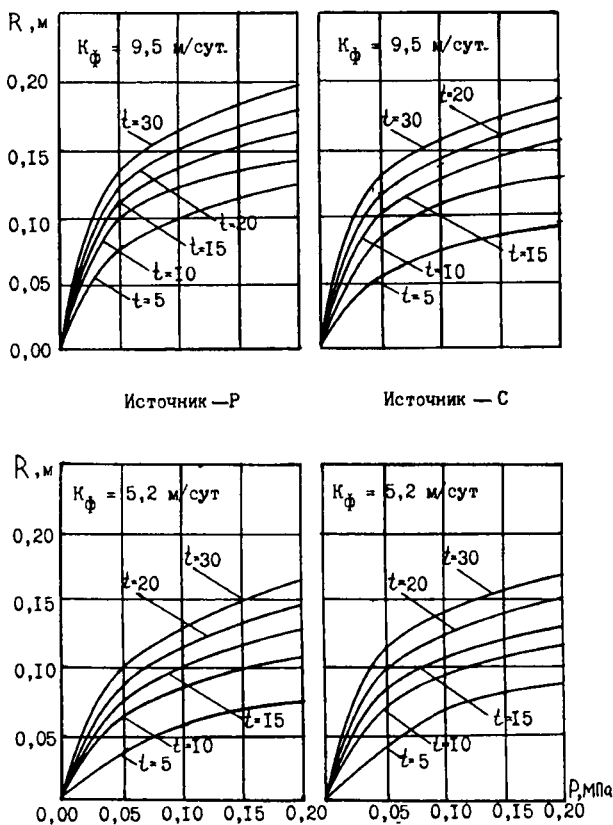


Рис. 4.11. График зависимости радиуса распространения от давления.

На основании экспериментальных данных и расчета средних значений из числа опытов, выполненных в соответствии с требованиями статистической обработки, устанавливалась корреляционная связь между технологическими параметрами. В алгоритме программы заложен критерий Фишера, ко-

горый позволяет оценить адекватность модели. Зависимость может описываться сравниваемыми уравнениями при условии

$$F_p > F_{\tau} (q, f_1, f_2), \quad (4.23)$$

где F_p — критерий Фишера расчетный; F_{τ} — критерий табличный, получаемый с учетом уровня значимости q и количества экспериментальных данных f_1, f_2 ;

Выбор функциональных зависимостей из 16 просчитанных моделей производился методом наименьших квадратов [66]. Для определенного грунта и промежутка времени был проведен полный анализ уравнений множественной регрессии. В результате были установлены зависимости, характеризующие изменение давления от расхода и параметров распространения раствора в грунте, которые в общем виде запишутся:

$$X_m = a_0 + a_1 X_1 + \dots + a_{m-1} X_{m-1}; \quad (4.24)$$

$$X_m = a_0 + a_1 X_1 + \dots + a_{m-1} X_{m-1} + a_m X_1^2 + \dots + a_{2m-2} X_{m-1}^2 + \\ + a_{2m-1} X_1^3 + \dots + a_{3m-3} X_{m-1}^3; \quad (4.25)$$

$$X_m = a_0 + a_1 X_1 + \dots + a_{m-1} X_{m-1} + a_m X_1 X_2 + a_{m+1} X_1 X_3 + \dots \\ + a_{2m-3} X_1 X_{m-1} + a_{2m-2} X_2 X_3 + \dots + a_{3m-6} X_2 X_{m-1} + \dots \\ + a_{(m-1) + [(m-1)(m-2)]/2} X_{m-2} X_{m-1} \quad (4.26)$$

Уравнение (4.24) описывает кривую, которая характеризует прямолинейную регрессию, уравнение (4.25) — кубическую и (4.26) — составленную из произведений и неизвестных в первой степени. После подстановки переменных эти выражения запишутся в виде:

$$P = a_0 + a_1 Q + a_2 R + a_3 h; \quad (4.27)$$

$$P = a_0 + a_1 Q + a_2 R + a_3 h + a_4 Q^2 + a_5 R^2 + a_6 h^2 + a_7 Q^3 + a_8 R^3 + a_9 h^3; \quad (4.28)$$

$$P = a_0 + a_1 Q + a_2 R + a_3 h + a_4 Q R + a_5 Q h + a_6 R h; \quad (4.29)$$

Значения коэффициентов α для определенного вида грунта просчитаны и сведены в таблицу [30]. Таким образом, для каждого из экспериментальных случаев рассчитаны коэффициенты.

На основании проведенных исследований можно заключить, что для глубинного инъецирования при вертикальной заходке применяются инъециторы длиной 1,2–1,4 м и перфорированной частью 0,5–0,6 м. Вообще глубина нагнетания в земляное полотно автомобильной дороги составляет от 2 до 8 м. Предельные величины давления нагнетания в песчаные грунты составляют:

- при глубине от поверхности равной 2–4 м — 0,3–0,5 МПа;
- при глубине 4–10 м — 0,5–1,5 МПа.

В просадочных грунтах давление нагнетания не должно превышать 0,5 МПа.

При инъециции тампонажных растворов (глиноцементных и бентонитосиликатных) на глубину 5–30 м давление нагнетания составляет 0,2–0,5 МПа.

Для поверхностного инъецирования технологические параметры нагнетания и результаты распространения раствора приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3.

Значения технологических параметров

№ п.п.	Наименование	Ед. изм.	Численные значения	
			поверхностное инъецир.	глубинное инъецир.
1	2	3	4	5
1	Давление нагнетания	МПа	0,03–0,15	0,3–2,5
2	Время нагнетания	с	10–15	1800–3600
3	Расход раствора (от массы грунта)	%	10	15
4	Предельная величина давления при глубине нагнетания в м – 0,30 – 2–4 – 4–10	МПа	0,16 – –	– 0,3–0,5 0,5–1,5
5	Коэффициент фильтрации грунта	м/сут	3–10	0,1–50
6	Применяемые инъециторы при коэффициенте фильтрации: – сферический (тип С) – радиальный (тип Р)	м/сут	$K_f < 5,5$ $K_f > 5,5$	$K_f > 50$ на всех грунтах
7	Длина инъецитора	м	0,15	1,2–10
8	Длина перфорированной части	м	0,008–0,125	0,5–1,4

1	2	3	4	5
9	Диаметр инъектора	м	0,02	$\geq 0,052$
10	Глубина нагнетания	м	0,15–0,30	1,2–10
11	Размеры области пропитки – радиус – глубина	м	0,115–0,15 0,30–0,40	0,2–1,0 1,8 м х кол- во заходок
12	Характеристика грунтов	г/см ³ %	ρ_d^{\max} $V_w^{\text{опт}}$	ρ_d^{\max} $V_w \geq V_w^{\text{опт}}$
13	Плотность применяемых растворов	г/см ³	1,1–1,2	1,1–1,2

Анализ представленной таблицы указывает, что нагнетание растворов в поверхностные слои земляного полотна имеет ряд особенностей по категории грунта, конструкции инъектора, параметрам нагнетания, которые необходимо учитывать как при расчетах, так и при проведении производственных работ. Условно можно принять, что при нагнетании растворов на глубину до 0,5 м инъектирование будет поверхностным, а при глубине свыше 0,5 м — глубинным. При нагнетании раствора непосредственно под дорожную цементобетонную плиту необходимо руководствоваться принципами поверхностного инъектирования.

4.2. Исследование прочности закрепленного грунта

При исследовании единичной глыбы было определено изменение прочности закрепленного массива (рис. 4.12) [67]. Испытание образцов, выпиленных из крайних областей единичной глыбы показало, что их прочность (2,35 МПа) составляет по отношению к образцам, выпиленным из центра (2,5 МПа), 94%.

Анализ содержания раствора карбамидной смолы, представляющей собой продукт, содержащий сухих веществ около 50 %, разбавленной водой в соотношении 1 : 0,5, позволяет сделать вывод, что при нагнетании в грунт раствора плотностью 1,13 г/см³ содержание раствора составляет для центральных образцов 5%, для образцов среднего ряда — 4,5% и крайнего — 4,3%. При исследовании образцов, выпиленных аналогичным образом из массива, имеющего размеры 1,0 х 1,0 х 0,3, составленного несколькими еди-

ничными глыбами, связанными между собой, наблюдалась следующая картина (рис. 4.13).

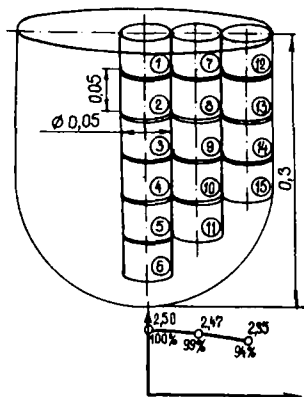


Рис. 4.12. Изменение прочности закрепленного массива по мере удаления от центра.

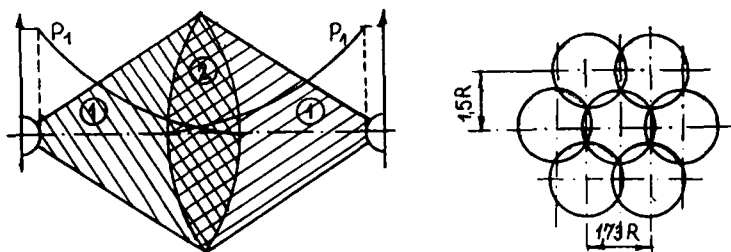


Рис. 4.13. Схема влияния соседних инъекторов на распространение раствора.

Зависимость прочности образцов от процентного содержания карбамидной смолы “Крепитель М” выражена на графике, изображенном на рис. 4.14.

Анализ этих графиков показывает, что образцы, изготовленные из песчаного грунта, соответствуют второму классу прочности при 15%-ном содержании смолы плотностью $1,13 \text{ г/см}^3$, что в пересчете на сухой остаток составляет 5%. Предел прочности при сжатии водонасыщенных образцов составляет $2,0 \text{ МПа}$, а предел прочности на растяжение при изгибе — $0,6 \text{ МПа}$.

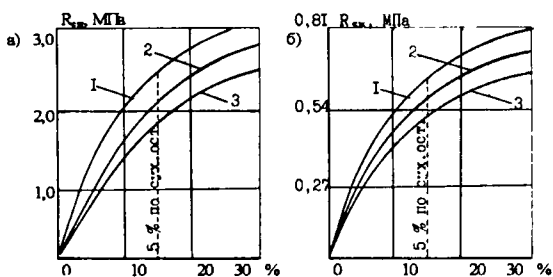


Рис. 4.14. График зависимости предела прочности при сжатии (а) и предела прочности на растяжение при изгибе (б) от процентного содержания смолы, разбавленной в соотношении 1 : 0,5
 1) — при воздушно-сухом хранении; 2) — при воздушно-влажном; 3) — в водонасыщенном состоянии.

Выводы по главе 4

Основными технологическими параметрами инъектирования являются давление, время и расход. В задачи экспериментальной части входило определение зависимостей технологических параметров от фильтрационных свойств грунта, вязкости раствора. Выбор оптимальных параметров способствует получению наибольшей области пропитки для данного грунта.

Принимая во внимание тот факт, что закрепление грунта способом инъектирования при ремонте автомобильных дорог с цементобетонным покрытием будет осуществляться в верхних слоях основания, на котором лежит бетонная плита, необходимо учитывать особенности поверхностного инъектирования и обеспечивать фильтрацию раствора без выхода его на поверхность.

Обоснование оптимального значения времени нагнетания осуществлялось на основании результатов экспериментальных исследований и расчетных данных по определению степени заполнения пор грунта раствором. При поверхностном инъектировании наиболее оптимальная зависимость между расходом раствора и временем нагнетания находится при времени равном 10–15 с. При глубинном инъектировании время нагнетания ограничивается временем гелеобразования раствора.

Давление нагнетания для поверхностного инъектирования составляет 0,05–0,15 МПа, а для глубинного 0,3–2,5 МПа.

Оптимальное значение влажности грунта, обеспечивающей максимальную плотность, позволяет разбавлять синтетические смолы водой в соотношении до 1 : 1 с учетом введения отвердителя. Кроме того, наличие воды в грунте отражается на давлении нагнетания.

Увеличение вязкости раствора ведет к увеличению давления нагнетания. Разработаны рекомендации по применению растворов определенных концентраций для грунтов имеющих различную влажность и коэффициент фильтрации.

Результаты экспериментальных исследований позволили установить конфигурации о размеры областей пропитки, полученные при поверхностном и глубинном инъектировании. На основании этого были рассчитаны объемы пропитки, по которым установлен необходимы расход раствора. Кроме того, экспериментальные параметры нагнетания были соединены с размерами, характеризующими области пропитки, установив распространение раствора в радиальном и вертикальном направлениях. Это позволило определить радиусы закрепления в зависимости от фильтрационных свойств грунта. Для назначения основного параметра нагнетания — давления, на основании статистических данных установлена корреляционная связь между технологическими параметрами. В основу алгоритма программы заложен критерий Фишера.

Исследования по определению равномерной прочности внутри закрепленного грунтового массива показали, что прочность в центре массива и в крайней его точке отличаются на 6% у единичной глыбы. При установке инъекторов в шахматном порядке с условием перекрытия сопрягаемых зон пропитки прочность закрепленного массива равномерна. Испытания образцов грунта, закрепленного карбамидной смолой “Крепитель М-3”, разбавленной водой в соотношении 1: 0,5, свидетельствует, что полученные результаты соответствуют II классу прочности согласно СН 25-74.

5. КОНСТРУКЦИЯ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ С ЖЕСТКИМ ПОКРЫТИЕМ И ОСНОВАНИЕМ, УСИЛЕННЫМ СПОСОБОМ ИНЪЕКТИРОВАНИЯ

5.1. Обоснование расчетной весовой нагрузки

В соответствии с Постановлением Совета Министерства Республики Беларусь № 1737 от 5 ноября 1999г. утверждены допустимые параметры тяжелых и крупногабаритных транспортных средств, проезжающих по автомобильным дорогам общего пользования. Это вызвано тем, что в последнее время сложилась практика превышения допустимых весовых параметров транспортных средств (рис. 5.1), проезжающих по автомобильным дорогам Республики Беларусь [68].

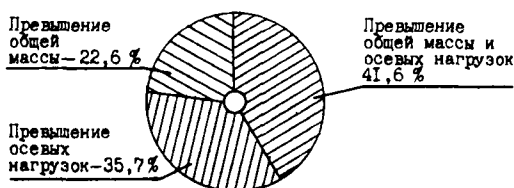


Рис. 5.1. Циклограмма распределения видов превышения весовых параметров.

Из циклограммы видно, что все превышения допустимых весовых параметров включают либо превышение общей массы, либо осевых нагрузок. Но самый большой процент включает превышение обоих параметров.

Динамику движения тяжелых транспортных средств по автомобильным дорогам республики можно проанализировать на основании диаграмм, представленных на рис. 5.2.

Диаграммы показывают, что наибольшее превышение по общей массе приходится на транспортные средства грузоподъемностью 36–43 т, а превышение нагрузки на одиночную ось приходится на транспорт, имеющий та-

кую нагрузку в размере 10–11 т. Причем одиночной считается такая ось транспортного средства, которая расположена на расстоянии более 2,5 метра от ближайшей другой оси этого транспортного средства.

Приведенные цифры указывают на возросшую нагрузку на дорожные конструкции, что способствует возникновению и дальнейшему развитию различных видов дефектов покрытия и деформаций земляного полотна. Исходя из вышеизложенного, выбираем осевую нагрузку равную 15 т, которую будем использовать в дальнейших расчетах.

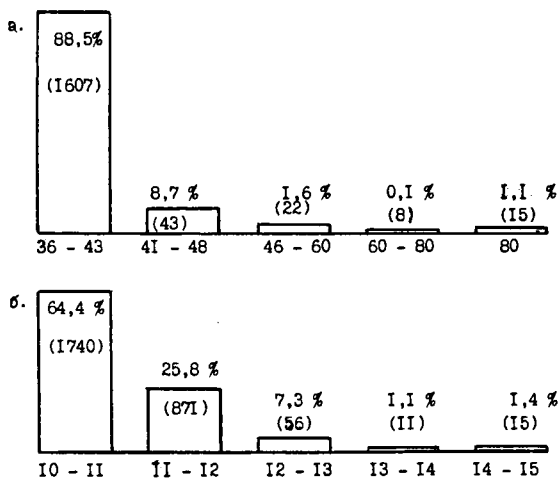


Рис. 5.2. Диаграмма разделения транспортного потока по грузоподъемности: а) превышение по общей массе; б) превышение осевой нагрузки на одиночную ось.

5.2. Выбор схемы расчета цементобетонного покрытия с усиленным основанием в местах дефекта

При конструировании бетонных покрытий на автомобильных дорогах руководствуются следующими основными положениями расчета жестких дорожных одежд [69, 70].

Покрытия из неармированного цементобетона устраивают однослойными, либо двухслойными с верхним слоем не менее 0,06 м. Двухслойные покрытия применяют, как правило, при строительстве комплектом машин.

Общую толщину покрытия назначают 0,18–0,24 м и более в зависимости от категории автомобильной дороги, состава и интенсивности движения автомобилей и вида материала основания.

Для предотвращения образования случайных трещин в покрытии устраивают продольные и поперечные швы, причем среди поперечных швов различают швы расширения, сжатия, коробления и рабочие.

Продольный шов устраивают при ширине покрытия более 4,5 м, чтобы предотвратить появление извилистых продольных трещин.

Швы расширения повышают продольную устойчивость бетонного покрытия при максимальном нагреве летом. Их всегда устраивают при примыкании к мостам. Расстояние между швами назначают от 16 до 110 м. Меньшие расстояния характерны для континентального климата, для малых толщин покрытия и более низких температур воздуха. При строительстве покрытий допускается не устраивать швы расширения, если толщина покрытия составляет 0,24 м и более, а температура воздуха во время бетонирования выше 5° С в условиях умеренного климата.

Швы сжатия устраивают между швами расширения с целью предупреждения образования случайных поперечных трещин при совместном действии температуры, усадки бетона и нагрузок от движущихся автомобилей. Расстояние между швами сжатия (длину плиты) назначают для умеренного климата от 4,5 до 7,0 м в зависимости от толщины покрытия.

Большая длина плиты соответствует надежности покрытия около 50%, меньшая — около 90 %. Под надежностью понимают число плит без трещин в процентах от всех плит на последний год службы покрытия.

Швы коробления размещают через один шов сжатия при длине плит менее 7 м. Их устраивают с целью повышения продольной устойчивости покрытия, уменьшения раскрытия швов и перекосов плит при температурных деформациях.

Современная жесткая дорожная одежда состоит из покрытия, выравнивающего слоя, основания и дополнительного слоя основания (рис. 5.3).

Выравнивающий слой предназначен для обеспечения наилучших условий взаимодействия покрытия с основанием. Для этого используют битумопесчаную смесь толщиной 0,03–0,05 м на дорогах I и II категорий. Необработанный песок слоем 0,05 м используют для выравнивающего слоя на дорогах III–IV категорий. На дорогах II и III категорий допускается применение битумопесчаной смеси толщиной 0,05 м на основаниях из щебня и гра-

вия. Выравнивающий слой может не устраиваться на основаниях из низко-марочного бетона или грунта, укрепленного цементом, при условии, если ровность основания соответствует требованиям строительных норм.

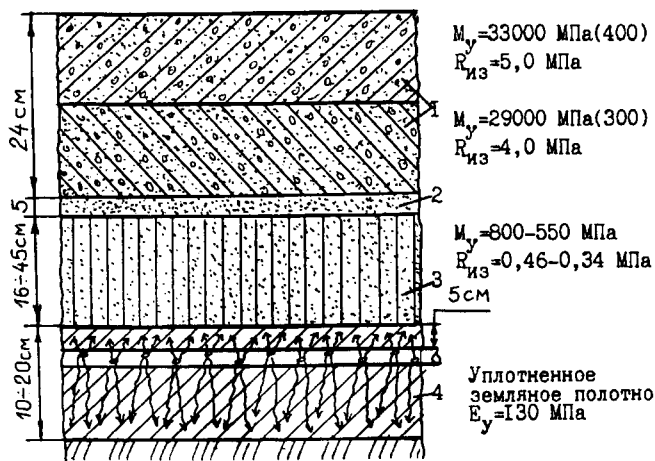


Рис. 5.3. Конструкция усиленной жесткой дорожной одежды: 1 — двухслойное цементбетонное покрытие; 2 — выравнивающий слой; 3 — основание; 4 — дополнительное основание.

Основания под цементбетонное покрытие устраивают для уменьшения давления на подстилающий грунт от движущихся автомобилей. На дорогах I и III категорий для основания применяют каменные материалы или грунты, укрепленные цементом и другими неорганическими вяжущими. Основания из щебня, шлака и грунтов, укрепленных органическими вяжущими, устраивают на дорогах II и III категорий. Песок и гравийно-песчаные смеси применяют на дорогах III и IV категорий, а также на дорогах II категории при толщине цементбетонного покрытия равной 0,22 м.

Для обеспечения прохода комплекта машин со скользящими формами основания, укрепленные вяжущим, имеют ширину 9,6 или 9,8 м. Толщину основания назначают по расчету, но не менее 0,14 м — из песчаных и супесчаных грунтов, укрепленных цементом, и из тощего бетона и не менее 0,15 м — из щебня шлака или гравия. При строительстве покрытий комплектом

машин со скользящими формами толщину основания из укрепленных цементом грунтов рекомендуется принимать не менее 0,16 м, а в остальных случаях — не менее 0,18 м. Минимальную толщину основания из песка с учетом требований морозостойчивости конструкции назначают 0,10–0,35 м в зависимости от вида грунта земляного полотна.

Дополнительный слой основания, наряду с передачей нагрузок на земляное полотно выполняет функции морозозащитного слоя. Устраивается из песка или другого зернистого материала на 1–2 м шире основания или на всю ширину земляного полотна.

Анализ прогибов и напряжений в упругих плитах, лежащих на упругом винклеровском основании, позволяет установить следующее.

1. При проезде двухосных автомобилей по цементобетонным покрытиям с эксплуатационными скоростями нужно принимать последовательное воздействие осей за единый ударный процесс. На покрытиях с малой жесткостью воздействие осей следует рассматривать как независимое.

2. Прогибы дорожных одежд уменьшаются с ростом скорости движения автомобилей, но при достижении 50 км/ч они несколько увеличиваются за счет динамического эффекта автомобиля.

3. Динамические напряжения при изгибе от однократного приложения нагрузки в 4000 кг достигают на ровных покрытиях от 1,0 до 3,6 МПа, на неровных — 1,3–5,0 МПа, развиваясь в очень короткое время.

4. Предельные динамические прогибы покрытий должны составлять 0,1–0,15 мм для нагрузки 4000 кг на колесо и скорости 70 км/ч.

Н. П. Пузыревский [71] предложил грунтовые основания рассматривать как упругое полупространство. Эта модель стала основной, хотя и довольно сложной. Ее упрощение привело к созданию еще трех моделей оснований М. М. Филоненко-Бородича [72], П. Л. Пастернака [73] и однослойной модели В.З. Власова [74]. Эти модели занимают как бы промежуточное место между коэффициентом постели и моделью упругого полупространства.

Впервые учет инерции основания произвели в своих работах А. П. Филиппов [75], О. Л. Шехтер, В. П. Виксне, Б. Г. Коренев [76, 77], а позднее Бляхман Р.И./78] получил решение для моментов и перерезывающих сил в бесконечной пластине, лежащей на упругом инерционном основании и нагруженной движущейся, равномерно распределенной вдоль прямой линии вертикальной нагрузкой.

5.3. Расчет упругих прогибов усиленных конструкций

Произведем расчет упругих прогибов дорожных конструкций, подтверждающих усиление разрушающихся объектов областями грунта, закрепленного способом инъектирования. Для этого выберем три сравнительных варианта (рис. 5.4).

На рис. 5.4, а показана дорожная цементобетонная плита на упругом однородном основании. На рис. 5.4, б показана плита, лежащая на том же упругом основании, но по краям опирающаяся на области укрепленного грунта, прочность которого в 5–6 раз больше, чем грунта основания. На рис. 5.4, в изображена схема, где плита опирается полностью на основание из укрепленного грунта, прочность которого в 5–6 раз больше прочности грунта земляного полотна. Ввиду того, что трещины, возникшие в дорожных плитах, имеют свойство копирования и в основании, мы как бы получаем плиту на плите, где верхней является дорожная цементобетонная плита, а нижней — укрепленный грунт, по габаритам равный верхней плите. Эти две плиты по краям опираются на области укрепленного грунта с прочностью, равной прочности нижней плиты и расположенные симметрично краю плит.

Конструкции усиления цементобетонных покрытий выбраны исходя из условия ограничения зон пластических деформаций. Математические выражения для определения допустимой нагрузки на грунт выведены такими учеными, как Н. П. Пузыревским, Н. М. Герсевановым, Л. Х. Юргенсоном, О. К. Фрелихом. Результаты исследований этих ученых показывают, что если нагрузка приложена к поверхности грунта, то даже при малых давлениях по краям загруженной полосы возникают зоны пластических деформаций, достигающие поверхности грунта [79, 80]. По мере увеличения нагрузки эти зоны возрастают, приближаются к оси симметрии и, наконец, при некотором значении внешней нагрузки, сливаются. В этот момент под подошвой нагруженной полосы возникает замкнутое ядро, в пределах которого сохраняется упругое напряженное состояние (рис. 5.5).

При нагрузке, приложенной к поверхности земляного полотна (рис. 5.5, а) по ее краям возникают зоны пластических деформаций [81]. Если отнести подобные выводы к дорожным плитам, то можно заключить, что в местах соединения дорожных плит, т.е. по швам возникают зоны пластических деформаций, которые способствуют возникновению просадки плиты при наезде колеса автомобиля. Для устранения этого явления предлагается усиливать

места возникновения швов и трещин областями закрепленного грунта, которые не допустят возникновения пластических деформаций в земляном полотне.

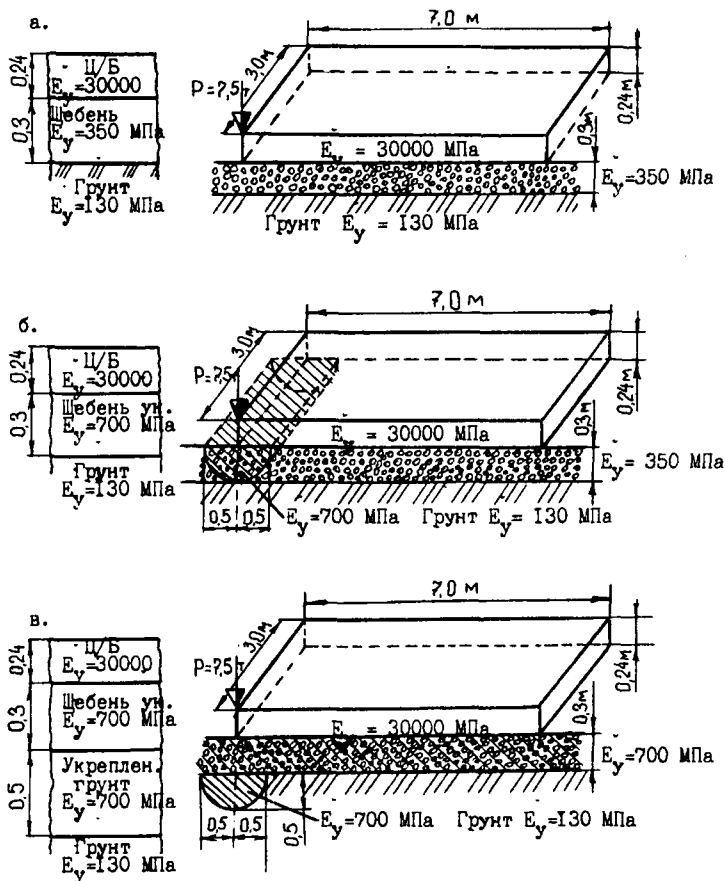


Рис. 5.4. Расчетные схемы.

Исходные данные для расчета:

- размер прямоугольной плиты постоянного сечения — $7 \times 3 \times 0,24$ м;
- плита нагружена одной вертикальной силой $P = 7,5$ т и собственным весом;
- плотность материала плиты — $2,4$ и $2,8$ т/м³;

–модуль упругости материала плиты — $M_y = 30000$ МПа;

– коэффициент Пуассона — 0,23 и 0,3.

Основание состоит из двух слоев:

– верхний слой — основание толщиной 0,3 м с модулем упругости $E_y = 130$ МПа;

– толщина нижнего слоя определялась как разность глубины деформируемой области основания и толщины верхнего слоя. В проведенных расчетах глубина деформируемой толщины принималась равной 2 м.

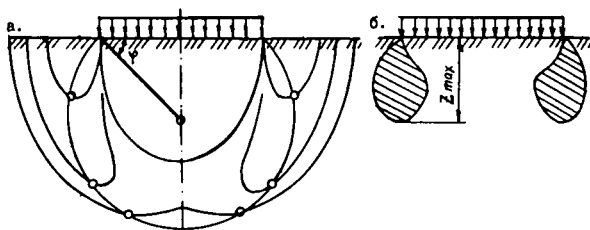


Рис. 5.5. Граничные линии (а) и зоны пластических деформаций (б) для нагруженной полосы.

Во втором варианте выполнен расчет плиты на двухслойном основании с учетом местного укрепления. При этом модуль упругости укрепленного слоя увеличился до $E_y = 700$ МПа.

В третьем варианте плита рассчитывалась на укрепленном слое с модулем упругости $E_y = 700$ МПа и дополнительным слоем укрепленного грунта с таким же модулем упругости.

Расчет производился при наиболее невыгодном расположении временной колесной нагрузки — когда колесо находилось на углу плиты. Нагрузка, согласно раздела 4.2, составляла $P = 7,5$ т. Расчет конструкции на упругом основании проводился с учетом теоретических выкладок М. И. Горбунова-Посадова [82], И. А. Симвулиди, К. Терцаги [96].

Для расчета плиты на упругом основании использован метод конечных элементов. Конечно-элементная модель плиты сложена из 84-х конечных элементов квадратной формы (0,5×0,5). Такие элементы квалифицируются в программе “Lira” как элементы типа 11. Толщина всех конечных элементов принималась одинаковой и равной 0,24 м. Предполагалось, что плита однородная, и поэтому модули упругости всех конечных элементов, складывающих саму плиту, задавались одинаковыми $E_y = 30000$ МПа. Нумерация эле-

ментов была проставлена по направлению рядов вдоль большей стороны плиты. Прямоугольные конечные элементы соединялись друг с другом и с конечными элементами других типов шарнирно (рис. 5.6).

Моделирование неоднородного в плане основания осуществлялось конечными элементами в форме вертикальных прямолинейных стержней, квалифицируемых в программе "Lira" как элементы типа 4. Длина этих стержней принималась равной 0,01 м, модули упругости — равными $M_y = 1$ МПа. Площадь поперечного сечения устанавливалась по условию равенства осадки основания и деформации конечного элемента типа 4. Нумерация элементов типа 4 осуществлялась в такой же последовательности как и конечных элементов типа 11, начиная с номера 106. Нижним концом элементы типа 4 защемлены в абсолютно жесткой опоре, а верхним шарнирно прикреплены к узлам соединения конечных элементов типа 11. Принятая модель плиты на упругом основании содержит 105 конечных элементов.

Конечно-элементная модель содержит 210 узлов и прикреплена к опоре 630 связями и имеет 630 степеней свободы. Каждый узел модели, независимо от того, какого типа конечные элементы он соединяет, имеет шесть степеней свободы. В соответствии с программой "Lira" использована правая система координатных осей. Оси X и Y расположены в плоскости плиты, а ось Z — перпендикулярно к ним. Каждой степени свободы присвоен соответствующий порядковый номер. Линейные перемещения по направлению оси X — 1, оси Y — 2, оси Z — 3, условные перемещения относительно оси X — 4, оси Y — 5, оси Z — 6.

Вес плиты при выбранных плотностях составляет 14,112 т и 12,096 т, следовательно, вес любого не крайнего конечного элемента составлял 0,168 т и 0,144 т. К узлам, расположенным на краю плиты, прикладывалась сила, равная половине веса одного конечного элемента — 0,084 и 0,072 т. Узлы в углах плиты загружались силами, равными одной четверти веса одного конечного элемента — 0,042 т и 0,036 т.

Основание моделируется конечными элементами типа 4, представляющими собой прямолинейные вертикальные стержни. Жесткость конечного элемента устанавливалась по условию равенства осадки основания и деформации конечного элемента по упрощенной формуле:

$$E_s = \frac{E_1 \ell_1 + E_2 \ell_2 + E_3 \ell_3}{\ell_1 + \ell_2 + \ell_3} + F_0, \quad (5.1)$$

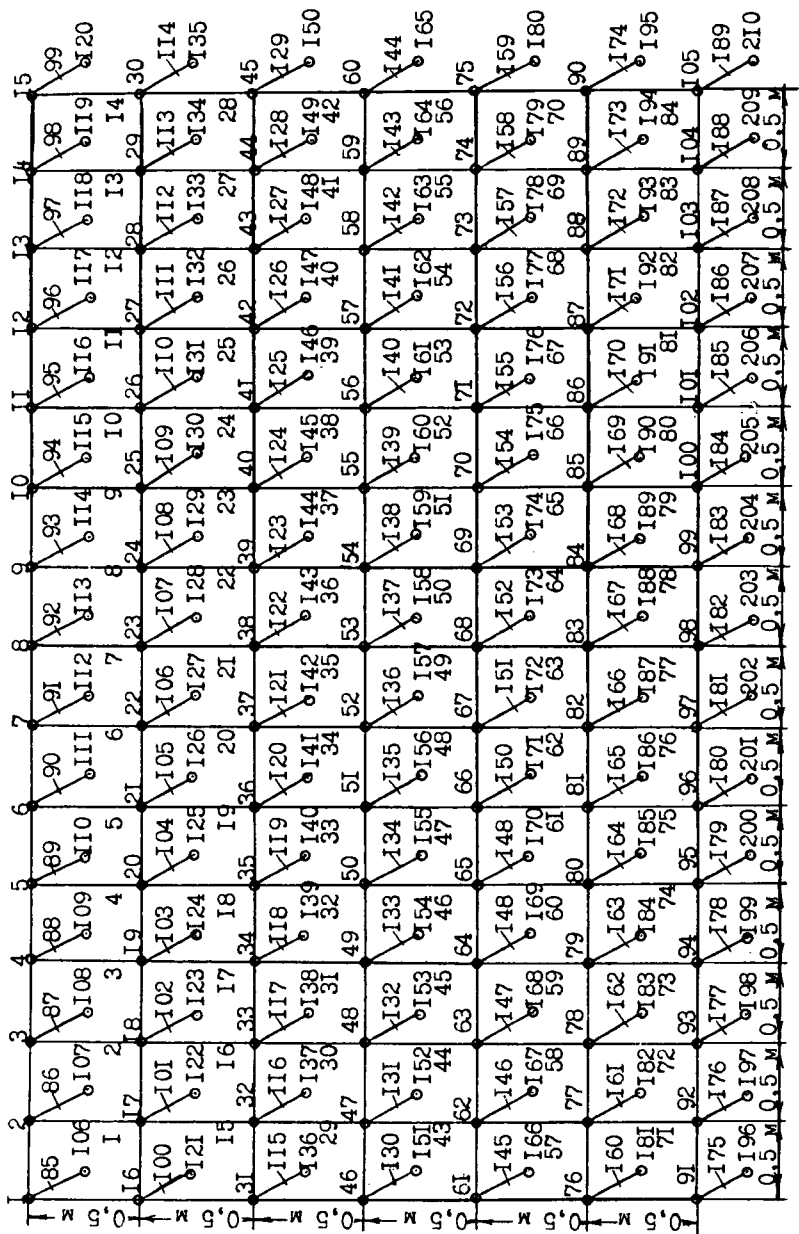


Рис. 5.6. Конечно-элементная модель плиты на углуком неоднородном основании плане

где E_s — жесткость конечного элемента типа 4; F_0 — расчетная площадь, соответствующая узлу; для узлов в средней части плиты — площадь конечного элемента типа 11; для узлов, расположенных на краю плиты, — половина площади конечного элемента типа 11; для узлов на углах плиты — четверть площади конечного элемента типа 11; E_1, E_2 и E_3 — модули упругости слоев основания, счет слоев начинается с верхнего слоя; l_1, l_2, l_3 — толщина слоев основания.

Для расчета прямоугольной плиты использована проектирующая система несущих конструкций стойтельных объектов “Lira”, разработанная НИИАСС (версия 1). Рассмотренные варианты представлены в табл. 5.1.

Таблица 5.1.

Варианты расчета

№ п/п	Расчетные схемы	Параметры расчета	
		$r = 2,8 \text{ т/м}^3$	$r = 2,4 \text{ т/м}^3$
1	2	3	4
1	Без укрепления (рис.5.4.а)	PS1	PS4
2	С укрепленным щебнем (рис.5.4.б)	PS2	PS5
3	С укрепленным грунтом (рис.5.4.в)	PS3	PS6

Кроме цифровых результатов представлены эпюры осадок. На рис. 5.7 изображена эпюра просадки плиты для второго варианта с воздействием нагрузки на угол плиты. На рис. 5.8 изображена эпюра просадки плиты для того же второго варианта при нагружении в центральной части крайнего сечения.

Результаты расчета прямоугольной плиты на различных основаниях подтвердили наличие максимальных осадок под углом плиты, к которому приложена сосредоточенная нагрузка. Значения осадок представлены в табл. 5.2.

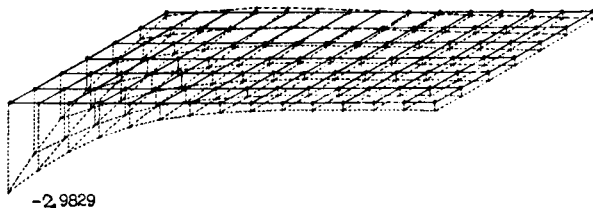


Рис. 5.7. Эпюра осадок при воздействии нагрузки на угол плиты.

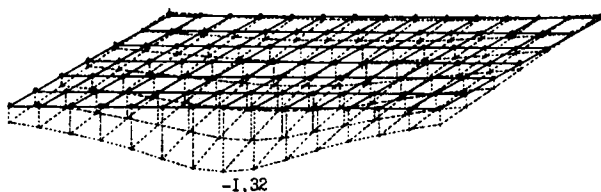


Рис. 5.8. Эюра осадок при воздействии нагрузки на середину крайнего сечения.

Таблица 5.2.

Максимальные осадки плиты при различных вариантах устройства основания

№ п.п.	Вариант устройства основания	Параметры расчета		
		$\rho = 2,8 \text{ т/м}^3 ; \nu = 0,3$		$\rho = 2,8 \text{ т/м}^3$ $\nu = 0,23$
		Приложение нагрузки		
		точка № 1	точка № 8	Точка № 1
1	2	3	4	5
1	Грунтово-щебеночная Подсыпка на естественном грунтовом основании	$\frac{3,2028}{100}$	$\frac{1,3601}{42,5^*/100^{**}}$	$\frac{3,1477}{98,3/100}$
2	Грунтово-щебеночная подсыпка с местным укреплением на естественном грунтовом основании	$\frac{3,0331}{94,7}$	$\frac{1,3279}{41,5/97,6}$	$\frac{2,9829}{93,1/94,7}$
3	Грунтово-щебеночная Подсыпка укрепленная под всей плитой и лежащая на грунтовом основании с местным укреплением	$\frac{2,2775}{71,1}$	$\frac{1,1165}{34,8/82,1}$	$\frac{2,2454}{70,1/71,3}$

* — значение, выраженное в % по отношению к максимальной величине в точке № 1;

** — значение, выраженное в % по отношению к максимальной величине при данном приложении нагрузки.

Анализируя результаты осадки для плиты, отличающиеся друг от друга по плотности и коэффициенту Пуассона, можно отметить, что плита с меньшим удельным весом имеет и меньшую осадку. Этот факт объясняется следующим. При замене одной плиты на другую основание и прикладываемую

нагрузку мы не меняем, поэтому сопротивление основания остается прежним. Уменьшение плотности цементобетона отразилось на общем весе плиты, т.е. на основание плита без нагрузки стала давить с меньшей силой. Поэтому осадка по абсолютному значению стала меньшей, чем от плиты с большей плотностью цементобетона.

Кроме того, расчетные данные показали, что в некоторых узлах отрицательные результаты осадки сменяются на положительные, что свидетельствует о приподнятии этих узлов над плоскостью основания.

Таким образом, на основании проведенных расчетов можно заключить, что усиление дорожного основания путем создания областей местного укрепления под местами возникновения трещин или под поперечными швами уменьшает вертикальные осадки плиты на 5–30%.

5.4. Варианты усиления дорожных конструкций

Цементобетон является нетехнологическим материалом, поскольку он не может быть утилизирован, усовершенствован и вновь уложен на прежнее место дорожной конструкции. Технически произвести утилизацию, бесспорно, можно, однако, процесс этот является настолько энергоемким, что считается экономически нецелесообразным. Кроме того, отсутствует необходимая техника, и вопрос этот является слабо изученным.

Поскольку одной из задач исследований является разработка системы комплексного упрочнения земляного полотна, обочин на основе глубинного и поверхностного инъецирования, то рассмотрим возможные варианты усиления основания дорожных одежд.

Результаты исследований распространяются на усиление покрытия, обочины и откосов насыпей.

Усиление цементобетонного покрытия с использованием инъекционного способа возможно в двух вариантах. Первый вариант включает в себя результаты производственного опыта по борьбе с пучинами в Беларуси, Казахстане, США (штат Оклахома), заключающиеся в бурении вертикальных скважин и нагнетании через них инъекционных растворов и суспензий (рис. 5.9, 1). Все известные примеры выполнены либо на насыпях железнодорожных путей, либо на асфальтобетонных покрытиях. Применение вертикального инъецирования для цементобетонных покрытий связано с частичным разруше-

нием покрытия в виде выдалбливания лунки, через которую осуществлялось бурение скважины в земляном полотне. Недостатком данного варианта является большое количество трудоемких работ, связанных с разрушением покрытия, и то, что даже последующая заделка мест разрушений ведет к появлению неровностей и очагов возникновения дефектов, поскольку при устройстве лунок в близлежащих к ней слоях возникает сетка трещин от ударов и вибрации.

Второй вариант усиления основания дорожных одежд (рис. 5.9, 2) предложен учеными БНТУ и заключается в бурении горизонтальной скважины на ширину цементобетонного покрытия, введении через скважину иньектора и нагнетании раствора по технологии, предусматривающей извлечение иньектора методом “на себя”. Для удобства работы и экономии времени при буровых и рабочих циклах со стороны одного из откосов с помощью легкого колесного экскаватора необходимо устраивать горизонтальные площадки и обустривать их боковым крепежом. Работы по данному варианту связаны с целым рядом преимуществ по сравнению с первым вариантом. Первое и основное преимущество — это сохранение целостности цементобетонного покрытия. Кроме того, сокращается ряд трудоемких работ, связанных с бурением нескольких скважин, устройством лунок в покрытиях, отпадает необходимость в оборудовании по разрушению покрытия.

Обочины на автомобильных дорогах, как правило, устраиваются либо грунтовые, т.е. из ПГС, либо укрепленные вяжущими материалами методом смешения на месте или методом смешения в смесительных установках с доставкой и распределением смеси на участке строительства.

Как известно, песчано-гравийные смеси недолговечны и требуют постоянного возобновления, профилирования и ухода. Поэтому на дорогах высоких технических категорий обочины устраивают из укрепленных грунтов либо укладывают тонкий слой асфальтобетона. Укрепленные обочины устраивают, как правило, методом смешения (рис. 5.9, 3) с помощью дорожных фрез. Недостатки данного метода: большое количество технологических операций для качественного перемешивания грунта с вяжущим материалом и создание предварительной плотности, которая впоследствии разрушается фрезой; возникновение дефектов на границе покрытия и обочины из-за невозможности качественного выполнения работ.

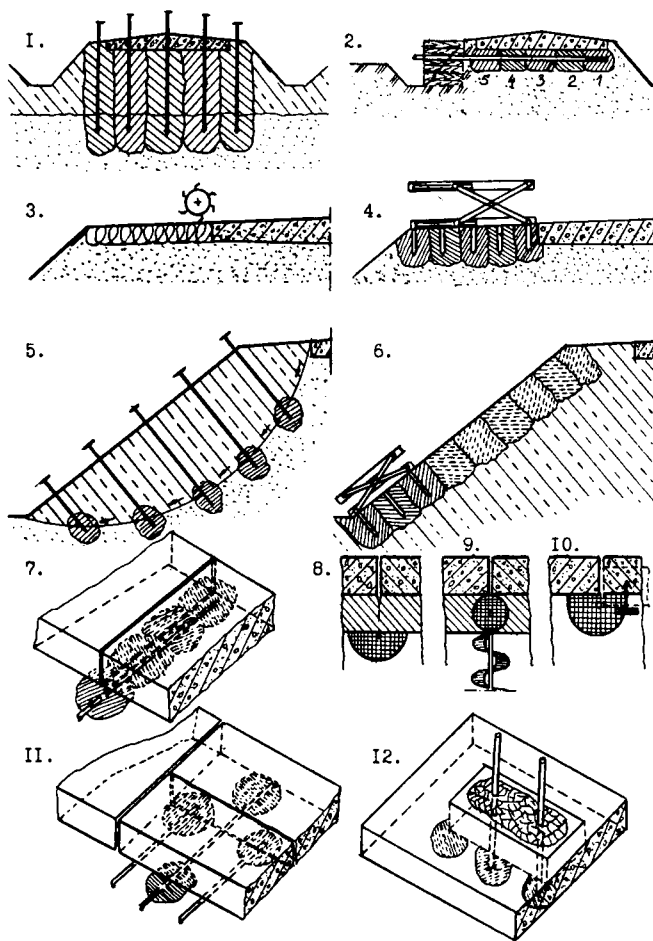


Рис. 5.9. Применение инъектирования грунтов для усиления дорожных конструкций: 1 — вертикальное инъектирование с разрушением покрытия; 2 — горизонтальное инъектирование под покрытием; 3 — укрепление обочины методом смешения; 4 — поверхностное инъектирование на обочине; 5 — устройство свай-шпон наклонным инъектированием; 6 — усиление поверхности откоса поверхностным инъектированием; 7 — усиление шва инъектированием методом "на себя"; 8 — усиление основания дорожной одежды; 9 — усиление шва с заменой части укрепленного грунта; 10 — усиление шва с восстановлением ровности; 11 — усиление продольной трещины горизонтальным инъектированием; 12 — восстановление проломов с усилением основания.

Наиболее целесообразным является способ устройства обочин путем инъектирования вяжущих материалов в грунты (рис. 5.9, 4). Для его реализации разработаны как сам способ (а.с. 755943) [13], так и установки и машины для его осуществления (а.с. 535391, а.с. 613006, а.с. 631591, а.с. 747929, а.с. 897943, а.с. 1183608, а.с. 1270214, а.с. 887722) [86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93].

Предлагаемый способ инъектирования вяжущих растворов обладает целым рядом преимуществ по сравнению со способом смешения: сокращение технологических операций, что повлияет на производительность строительного потока; получение материала с более высокими прочностными свойствами из-за лучшего распределения раствора в порах грунта при его пропитке.

Инъектирование вяжущих при укреплении откосов применяется главным образом для устранения оползней и повышения устойчивости грунта. Устройство так называемых свай-шпон, осуществляется при глубинном инъектировании и обеспечивает устойчивость откоса по линии возможного сдвига, которая определяется расчетным путем (рис. 5.9, 5) [109].

Этот способ может быть дополнен закреплением поверхности откоса, предотвращающим его размывание от поверхностных вод. Для этого разработан способ укрепления откосов (а.с. 1361233) [94] (рис. 5.9, 6) и машина для его осуществления (а.с. 1170043)/95].

Как было сказано ранее, в цементобетонном покрытии устраивают продольные и поперечные швы, зарезая свежееуложенный бетон на глубину $0,25h$, где h — толщина плиты. В дальнейшем, под действием внешней нагрузки, температурных факторов шов в виде трещины развивается на всю толщину покрытия. Поскольку наружные трещины углубляются благодаря расклинивающему эффекту, называемому “эффектом Ребиндера”, то происходит копирование трещин и в нижележащих слоях дорожной одежды. Со временем происходит смещение плит в вертикальной плоскости, причем образуется так называемый порог, когда вторая плита по ходу движения автомобиля имеет осадку большую, чем первая. Борьба с образованием порогов включает в себя нагнетание раствора через горизонтальный инъектор, заглубленный в грунт по сечению шва (рис.5.9, 7). Причем ремонт, в зависимости от конечной цели, может осуществляться по одной из трех схем.

Схема 8 (рис.5.9) выполняется, когда трещина не распространилась на всю толщину дорожной одежды. Тогда для усиления нижних слоев, выполненных из укрепленных грунтов, по оси распространения трещины на расстоянии $0,05-0,10$ м от нижней кромки слоя укрепленного грунта внедряется

инъектор параллельно плоскости покрытия. Объем грунта, поры которого заполнены инъекционным раствором, увеличивает площадь контакта концевых участков двух соседних плит, и после затвердевания раствора мы получаем схему плиты, лежащей на упругом основании и по краям опирающейся на твердые области.

Схема 9 (рис. 5.9) выполняется, когда трещина распространилась на всю толщину дорожной одежды и в работу по осадке включилось основание дорожного покрытия. В этом случае наиболее эффективным будет высверливание с помощью широкого шнека области вокруг образовавшейся трещины. Далее работы могут вестись по двум направлениям:

- 1) приготовление смеси грунта с вяжущим материалом и с помощью того же шнека забивка смеси в образовавшуюся скважину;
- 2) заполнение скважины грунтом, вдавливание инъектора и пропитка грунта инъекционным раствором.

Схемы 8 и 9 могут быть совмещены в единую конструкцию, что позволит максимально укрепить сечение шва. Схема 10 (рис. 5.9) помимо работ, изложенных в схемах 8 и 9, предусматривает поднятие конца плиты до уровня первой плиты с последующим закреплением основания. Одними из самых крупных дефектов цементобетонного покрытия являются трещины, возникающие в продольном или поперечном направлениях. Ремонт поперечных трещин может осуществляться по схеме, изображенной на рис. 5.9, 7.

При возникновении продольной трещины прежде всего необходимо выяснить причину образования трещины, т.е. происходит ли осадка по сечению трещины или по краям плиты. В зависимости от этого ремонта работы могут включать инъектирование грунтов для создания закрепленных областей по оси продольной трещины либо по краям плиты (рис. 5.9, 11).

Ремонт провалов, вспучиваний, сетки трещин, выбоин и других местных дефектов, связанных с разрушением материала плиты, должен проводиться с полным удалением разрушенного бетона. Если образование дефекта дополняется возникновением деформаций в земляном полотне, то после удаления разрушенного бетона сверху заглубляются инъекторы и производится нагнетание раствора в верхние слои подстилающего основания. После этого образовавшийся пролом заполняется свежеприготовленным цементобетоном (рис. 5.9, 12).

Таким образом, инъектирование грунтов является весьма эффективным способом ремонта цементобетонных покрытий.

Выводы по главе 5

Для проведения расчетов по определению величин упругих прогибов бетонной плиты, лежащей на упругом основании, проведено обоснование расчетной нагрузки в соответствии с изменившимся в последнее время составом транспортного потока. Анализ диаграммы разделения транспортного потока по грузоподъемности позволил выбрать нагрузку на колесо равную 7,5 т.

Для расчета выбраны три конструктивные схемы, моделирующие:

- 1) плиту на упругом основании;
- 2) плиту на упругом основании, опирающуюся по концам на области грунта, закрепленного способом инъектирования;
- 3) плиту на упругом основании, которая, в свою очередь, опирается на области закрепленного грунта, устроенные по концам плиты.

Для расчета использован метод конечных элементов и проектирующая система несущих конструкций строительных объектов "Lira", разработанная НИИАСС. Конечно-элементная модель содержит 210 узлов, прикреплена к опоре 630 связями и имеет столько же степеней свободы. Жесткость конечного элемента устанавливалась по условию равенства осадки основания и деформации конечного элемента.

Анализируя результаты осадки плит, отличающихся друг от друга плотностью и коэффициентом Пуассона, можно заключить, что усиление основания по концам плиты или в месте нахождения трещины снижает упругие деформации.

На основании представленных доказательств по эффективности применения способа инъектирования при ремонте дорожных конструкций были разработаны методы усиления основания, обочин, откосов, повышения устойчивости грунтовых массивов и создание зон усиления основания под швами и трещинами бетонных покрытий. Эти методы разработаны как для поверхностных, так и для глубинных способов нагнетания вязких растворов через вертикально или горизонтально расположенные инъекторы. Горизонтальное заглубление инъектора и нагнетание через него закрепляющего раствора позволяет создать область укрепленного грунта непосредственно под дефектом (трещиной, выбоиной) без разрушения дорожного покрытия.

6. РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ ИЗУЧЕНИЯ ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ ДЕФЕКТОВ

Для отражения качества выполненных ремонтных работ по устранению дефектов на цементобетонных покрытиях с помощью новых материалов и прогрессивных технологий необходимо устранить причину, вызывающую возникновение дефекта. Но чтобы ее устранить, необходимо с достоверной точностью ее определить.

Следовательно, необходимо разработать концепцию, выполнение которой позволит получить необходимые сведения для анализа существующей ситуации. Такая концепция включает в себя три вида основных работ: визуальные, инструментальные наблюдения и лабораторные испытания (рис. 6.1).

Визуальные наблюдения включают в себя работы по обследованию участка дороги, подверженного разрушению. Необходимо оценить ситуацию участка, характер и качество покрытия, собрать статистический материал по количественному составу дефектов. Данные визуальных наблюдений служат определяющим фактором для выполнения второй стадии, включающей в себя инструментальные наблюдения, проводимые на участках, подверженных разрушению, и лабораторные испытания, проводимые в камеральной обстановке на отобранных образцах. Таким образом, визуальные наблюдения не выявляют причину разрушения, а служат критерием необходимости проведения второй стадии работ, являющейся основной.

Известна система показателей по группе коэффициентов: прочности, ровности, скользкости, износа, интенсивности и т.д. Также известны: комплексный показатель оценки безопасности движения по итоговому коэффициенту аварийности (МАДИ) [96], методика оценки эргономических и эстетических качеств дороги (ХАДИ) [97], оценка технического состояния местных дорог по коэффициенту соответствия (КАДИ) [98], метод оценки технико-эксплуатационного состояния автомобильных дорог по коэффициенту обеспеченности расчетной скорости (ГипродорНИИ — МАДИ) [99].

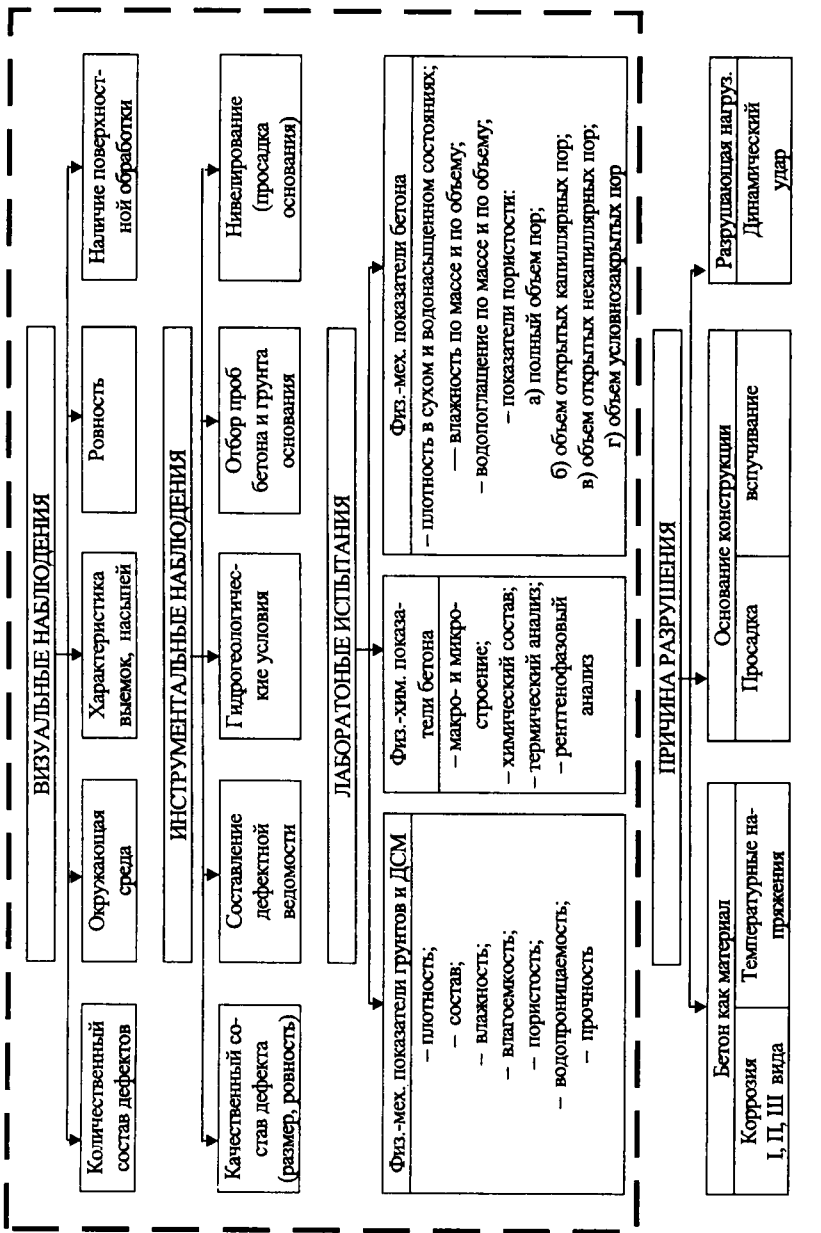


Рис. 6.1. Схема выполнения работ по определению причины разрушения дорожной конструкции

В Белорусском дорожном научно-исследовательском институте разработано “Руководство по комплексной оценке технико-эксплуатационного состояния автомобильных дорог и назначению ремонтных работ”. Комплексная оценка производится путем сопоставления фактических значений основных показателей технико-эксплуатационного состояния автомобильных дорог (ТЭС АД) с их эталонными значениями с помощью коэффициентов соответствия. Если коэффициент соответствия меньше единицы, то автомобильная дорога не удовлетворяет требованиям движения [100,101].

Для оценки показателей технико-эксплуатационного состояния дороги приняты коэффициенты соответствия:

- геометрических параметров элементов плана и профиля дороги;
- прочности дорожной одежды;
- ровности и скользкости покрытия;
- удобства движения по дороге и безопасности движения.

Исходными данными являются: категория дороги; тип покрытия, интенсивность и состав движения, ширина проезжей части, ширина обочин, поперечный уклон проезжей части, радиусы кривых в продольном профиле, продольный уклон, расстояние видимости, прочность дорожной одежды, ровность покрытия, скользкость покрытия, данные о дорожно-транспортных происшествиях.

Комплексная оценка осуществляется в такой последовательности: сбор и анализ исходной информации; проведение дополнительных обследований для контроля имеющихся показателей; составление графика диагностики дороги; составление покิโลметрового графика технико-эксплуатационного состояния и ремонтпригодности автомобильной дороги; установление участков дороги с показателями, коэффициенты соответствия которых меньше единицы; назначение ремонтных мероприятий.

Следует учесть, что при выполнении первой стадии работ, — сборе количественного состава дефектов могут быть проведены и инструментальные наблюдения, касающиеся измерения этих дефектов [102], т.е. получения качественной оценки. И все это вместе может быть отражено в составлении дефектной ведомости.

Если показатель комплексной оценки технико-эксплуатационного состояния автомобильной дороги свидетельствует о необходимости проведения ремонтных работ, то проводятся оставшиеся инструментальные наблюдения, включающие обследование гидрогеологических условий (соответствие

реальных грунтов в теле насыпи и основания проектным, изменение уровня грунтовых вод, заиливание и т.д.), отбор проб бетона, нивелирование покрытия для определения просадки основания, отбор проб грунта основания.

С отобранными пробами в лабораторных условиях проводятся испытания по определению физико-механических показателей грунта и бетона и физико-химических показателей бетона. Последний цикл исследований включает изучение макро- и микроструктуры, определение химического состава и выполнение термического и рентгенофазового анализов.

6.1. Определение физико-химических показателей бетона

6.1.1. Химический анализ

Химический анализ проводится с целью выявления содержания ионов HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , OH^- , Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^+ , Na^+ , H^+ . В результате обработки данных полученных методами титрования, аргентометрическим, весовым, а также с использованием плазменного фотометра ФПМ-1, можно установить процентное содержание каждой группы ионов, которые при сравнении эталонного и разрушенного бетонов позволяют установить пониженное или повышенное содержание компонента.

Химический анализ проводился по методике анализа водной вытяжки бетонов АХ-34, утвержденной в Институте строительных материалов (г. Минск).

Концентрацию водородных ионов (рН) определяют на рН-милливольтметре рН-340. Метод определения основан на использовании электродной системы: электродвижущая сила зависит от активности ионов водорода.

Карбонатную щелочность определяют титрованием соляной кислотой в присутствии индикатора метилового оранжевого.

Содержание ионов кальция определяют прямым комплексо-метрическим титрованием раствора трилона в присутствии индикатора флуорексона.

Содержание ионов магния вычисляют после определения содержания суммы ионов кальция и магния титрованием раствором трилона в присутствии индикатора кислотного хрома темно-синего.

Содержание ионов хлора определяют аргентометрическим методом, основанным на осаждении хлор-иона в нейтральной или слабощелочной среде азотнокислым серебром в присутствии хромокислого калия в качестве индикатора.

Содержание сульфат-ионов определяют весовым методом, основаным на осаждении в кислой среде сульфат-ионов хлористым барием и определении его массы после прокаливания.

Содержание ионов натрия и калия определяют на плазменном фотометре ФПМ-1 с использованием эталонных растворов.

Исследование процессов разрушения цементобетона проводилось на образцах, взятых с мест разрушения (табл. 6.1). Причем образцы брались попарно — с места разрушения и покрытия, находящегося в хорошем состоянии. Это делалось для проведения сравнительного анализа качественного состояния образцов.

Таблица 6.1.

Характеристика покрытия в местах отбора проб

№ образца	Наименование дороги	Состояние покрытия
1	Брест—Минск—	без разрушений
2	граница РФ	сильное разрушение
3	Минск—	без разрушений
4	Микашевичи	шелушение
5	Минск—	без разрушений
6	Гродно	выбоины
7	Калининград—Балтийск	без разрушений

Пробы бетона, взятого на седьмом участке, характерны для материала, изготовленного более шестидесяти лет назад и находящегося в удовлетворительном состоянии. На отобранных образцах проведены комплексные физико-химические исследования, включающие химический, рентгенофазовый, термометрический анализы, оптическую и электронную микроскопию [103].

Анализ водных вытяжек показал, что в образце № 2 содержание ионов Ca^{+2} составляет 0,13% , что значительно ниже, чем у других исследованных образцов, а содержание ионов SO_4^{-2} составляет 0,23% , что указывает на сильную сульфатную агрессию. Это объясняется выщелачиванием бетона под действием сульфатов. Действие растворимых сульфатов на портландцемент выражается в образовании сульфоалюмината кальция и гипса с заметным расширением бетона за счет рекристаллизации сульфоалюмината. Как правило, бетон под действием сульфатов кальция или натрия становится мягким и пористым, увеличивается его чувствительность к дальнейшему выщелачиванию.

Сравнивая водные вытяжки образцов № 3 и № 4, следует отметить, что образец № 4, взятый с покрытия, имеющего такой дефект как шелушение, имеет некоторое увеличение в водной вытяжке ионов Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , что может быть связано с накоплением в самом бетоне хлора из солей, используемых в качестве противогололедных материалов.

При сравнении аналогичного показателя в образцах № 5 и № 6 заметно увеличение в последнем количества ионов хлора и натрия. Сама по себе хлоридная агрессия первоначально не приведет к снижению прочности бетона и разрыхлению его структуры, а даже наоборот. Однако со временем, и особенно при наличии иных агрессивных воздействий происходит снижение прочности бетона вследствие возрастания растворимости ряда составляющих цементного камня, которые в результате фильтрации ослабляют бетон.

Водная вытяжка образца № 7 отличается от всех исследованных более низким содержанием в растворе ионов K^+ , Na^+ .

6.1.2. Термогравиметрический анализ

Определение гидратных новообразований в бетоне, их превращений и изменений во времени под действием эксплуатационных и климатических факторов необходимо производить на дериватографе термогравиметрическим методом. При этом изучаются физические и химические процессы, происходящие при нагревании до 1000°C порошковой пробы бетона и сопровождающиеся изменением энтальпии системы (эндотермические и экзотермические эффекты). Дериватограммы включают в себя данные по четырем кривым: DTG — потери массы при термическом процессе; DTG — скорость потери массы; DTA — изменение энтальпии и T — изменение температуры.

Результаты термогравиметрического анализа, записанного на фотобумаге в виде кривых DTG и DTA, указывают на эндотермические эффекты, протекающие при определенных температурах:

- при $T = 100 - 150^\circ\text{C}$ — удаление межслоевой и капиллярной влаги из геля;
- $T = 190^\circ\text{C}$ — дегидратация этрингита;
- $T = 220^\circ\text{C}$ — обезвоживание гидросульфалюминатов;
- $T = 500 - 520^\circ\text{C}$ — дегидратация портландита;
- $T = 600 - 700^\circ\text{C}$ — образование метастабильной формы кальцита-ватерита в процессе разрушения гидросиликата кальция;
- $T = 700 - 800^\circ\text{C}$ — разложение ватерита;
- $T = 850 - 870^\circ\text{C}$ — декарбонизация кальцита.

Принцип действия дериватографа заключается в регистрации светового сигнала освещенной оптической щели, возникающего при нагревании испытуемого вещества, помещенного в платиновый тигель. Температура нагревания печи равномерно увеличивается во времени. Оптическая щель, укрепленная на коромысле весов, записывает на светочувствительной бумаге ее отклонение при изменении массы испытываемого образца в увеличенном системой линз масштабе в виде термогравиметрической кривой.

С помощью катушки с высоким числом витков, подвешенной к коромыслу весов и движущейся в гомогенном поле перманентного магнита, измеряется скорость изменения массы. Так как силовое поле магнита индуцирует в движущейся катушке ток, напряжение которого пропорционально отклонению коромысла весов, то световой сигнал подключенного к зажимам катушки гальванометра описывает на фотобумаге кривую деривативной термогравиметрии (DTG).

Изменение температуры испытываемого вещества относительно инертного вещества (Al_2O_3) характеризует процессы, проходящие в веществе с эндотермическим (поглощением тепла) или экзотермическим (выделением тепла) эффектами. При измерении температуры, регистрируемой дифференциальной термопарой, возникает э.д.с., величина которой зависит от характера превращения, количества испытываемого вещества и других факторов. Она фиксируется в виде кривой (DTA). К зажимам термопары, помещенной внутрь тигля с пробой, подключен гальванометр, световой сигнал которого записывает температурную кривую (T). Пример полученной дериватограммы приведен на рис. 6.2.

Анализ дериватограмм образцов № 1 и № 2. На кривой DTG образца № 2, кроме характерной для цементного камня первой серии эндотермических эффектов в интервале от 100 до 300° С, связанных обычно с удалением межслоевой и капиллярной влаги из геля (эндоэффект при 140° С) и обезвоживанием гидросульфаталюминатов кальция (эндоэффект при 220° С), а также эндотермического эффекта декарбонизации кальцита при 870° С появилась небольшая эндотермическая остановка в интервале температур от 700 до 800° С, связанная с разложением ватерита. Кроме того, на интегральной кривой изменения скорости потерь массы отмечается эффект при 790° С, свидетельствующий о наличии новой фазы в цементном камне. Нетипичным для обычных бетонов на портландцементе является также отсутствие эндотермического эффекта дегидратации портландита при температуре 500–520° С.

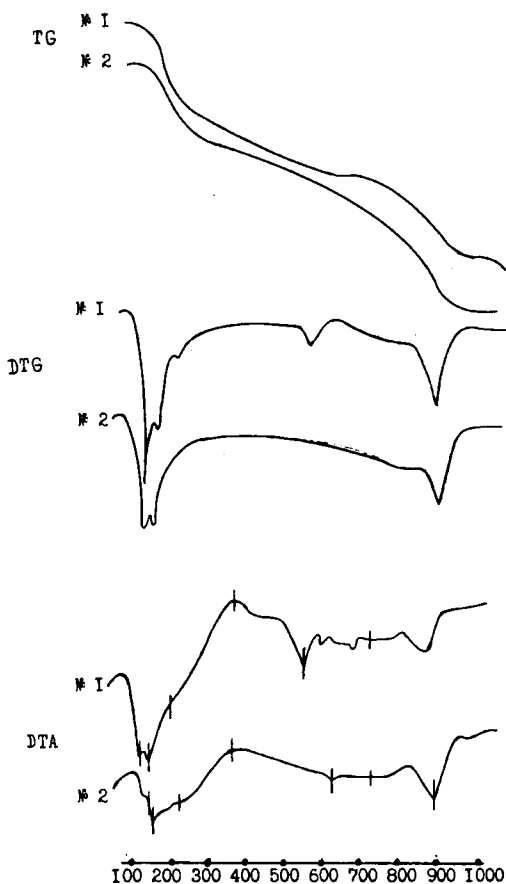


Рис. 6.2. Дериватограммы образцов № 1 и № 2.

Анализ дериватограмм образцов № 3 и № 4. Для образца № 3 на кривой DTG присутствует эндотермический эффект удаления капиллярной воды с максимумом при температуре 140°C и дегидратации этtringита с максимумом при температуре 190°C . Содержание портландита (эндозффект дегидратации при 520°C) в бетоне равно 5,2 %, а кальцита (эндозффект дегидратации при 850°C) — 10,4 %.

Для образца № 4 характерно подтверждение всех перечисленных для образца № 3 эндозффектов, однако их абсолютные характеристики несколько ниже.

Анализ дериватограмм образцов № 5 и № 6. Сравнивая дериватограммы обоих образцов можно заключить, что у образца № 6 кроме характерного для цементного камня большого эндотермического эффекта в области температур 100–300° С, связанного с удалением влаги капиллярной, межслоевой и адсорбированной, и эффектов при температурах 500 и 825° С, соответствующего дегидратации портландита и декарбонизации кальцита, появляются эндотермические остановки в области 600–700° С. Это свидетельствует об образовании в процессе разрушения гидросиликата кальция метастабильной формы кальцита-ватерита. Появление небольших эндотермических эффектов при температуре 380 и 855° С можно объяснить дегидратацией и последующим разложением гидрокарбохлоралюмината кальция.

Анализ дериватограммы образца № 7. При рассмотрении формы эндотермических эффектов на дифференциально-термической кривой нагрева и интегральной кривой изменения скорости потерь массы в области температур от 100 до 250° С видно, что в рассматриваемом бетоне отсутствуют четкие ступени удаления воды из геля. Это может быть объяснено сжиманием геля, уменьшением межслоевых пор и общей пористости. Удаление воды из материала проходит в широком интервале температур — от 120 до 700° С. Образование гидрокарбоалюмината кальция идет прежде всего на контактах карбонатного заполнителя с цементным камнем. Эндотермическому эффекту дегидратации гидрокарбоалюмината на кривой потерь массы соответствует незначительное увеличение массы. Следующий четкий симметричный эндоэффект дегидратации портландита при 515° С указывает на хорошую закристаллизованность. Количество портландита, по данным термогравиметрического анализа, составляет 2,6%.

6.1.3. Рентгенофазовый анализ

Определение качественного фазового состава необходимо производить рентгенофазовым анализом, основанном на том, что порошковая рентгенограмма полиминерального образца представляет собой сумму рентгенограмм отдельных фаз. По рентгенограммам определяют интенсивность дифракционных максимумов и значение угла дифракции, по которым с помощью таблиц находят межплоскостное расстояние для соответствующего антикатада. По отношению межплоскостного расстояния к порядку отражения определяют фазовый состав исследуемого вещества.

Петрографические исследования по изучению макроструктуры свежих сколов бетонных образцов, макропористость, визуальные характеристики за-

полнителей и цементного вяжущего, а также микроструктуры образцов в проходящем свете на прозрачных шлифах с помощью микроскопов МБС-1, МКУ-1 должны дополняться электронномикроскопическими исследованиями.

Для изучения качественного фазового состава исследуемых образцов бетона применялся рентгенофазовый анализ. В результате расшифровки рентгенограмм определялась интенсивность дифракционных максимумов и значение угла дифракции. По значениям этих показателей по справочным таблицам определялись межплоскостные расстояния в кристаллических решетках для соответствующего антикатада. Поскольку бетон является полиминеральным веществом, имеющим много степеней отражения, можно определить отношение межплоскостного расстояния к порядку отражения. По этому отношению может быть выбран номер карточки межплоскостных расстояний и какому веществу он принадлежит.

Анализ рентгенограмм образцов № 1 и № 2 (рис. 6.3). Цементный камень образца № 1 характеризуется небольшим количеством гидросульфоалюмината (этtringита), ватерита и кальцита. Помимо перечисленных фаз фиксируется наличие портландита ($d/n = 4,9; 2,62 \text{ \AA}$).

Цементный камень образца № 2 состоит из кварца ($d/n = 4,24; 3,34; 1,81 \text{ \AA}$), кальцита ($d/n = 3,86; 3,03; 2,49 \text{ \AA}$), этtringита ($d/n = 9,8; 5,6 \text{ \AA}$) и ватерита ($d/n = 3,53; 3,03; 2,73 \text{ \AA}$). Результаты рентгенофазового анализа подтверждают данные термического анализа.

Анализ рентгенограмм образцов № 3 и № 4. В вяжущем образца № 3 установлено присутствие таких кристаллических новообразований, как кальцит, этtringит, портландит.

Фазовый состав образца № 4 незначительно отличается от состава образца № 3. Помимо вышеперечисленных кристаллических образований в вяжущем имеется небольшое количество гидрокарбоалюминатов ($d/n = 8,04; 3,88 \text{ \AA}$). Содержание портландита равно 5,2%, так же, как и в образце № 6, а кальцита — 8,5%.

Анализ рентгенограмм образцов № 5, № 6 и № 7. Фазовый состав образца № 5 отличается отсутствием хлоридов, Остальные фазы (гидросиликатный гель, этtringит, кальцит, ватерит и портландит) присутствуют в образце. Содержание портландита в пробе составляет 5,2%, кальцита — 5,8%, ватерита — 3%.

Результаты рентгенофазового анализа образцов № 6 и № 7 подтверждают выводы термогравиметрического анализа.

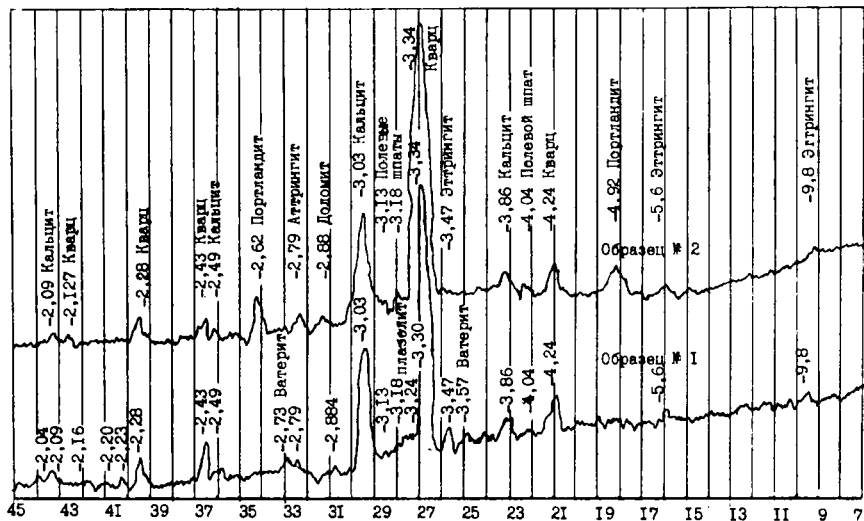


Рис. 6.3. Рентгенограммы образцов № 1 и № 2.

6.1.4. Электронно-микроскопический анализ

Электронно-микроскопические исследования производились на просвечивающем микроскопе ЭМВ-10БР с растровой приставкой с увеличением 10000^x. Для исследований в электронном микроскопе бетонов применялся косвенный метод угольных реплик.

Вместо источника света в электронном микроскопе расположена вольфрамовая нить, испускающая электроны, которые ускоряются высокой разностью потенциалов и направляются через прибор на флюоресцентный экран. При прохождении пучка электронов через кристаллическое вещество, имеющее периодически повторяющуюся в трех измерениях структуру, в микроскопе возникает серия параллельных дифференциальных дучей. Эти дифрагированные пучки электронов, проходя через объективную линзу, фокусируются и, проходя через промежуточные линзы, переносят изображение объекта на флюоресцентный экран.

Образец № 1 характеризуется плотной структурой. Участки игольчатых гидросиликатов по площади небольшие и располагаются по границам порового пространства. Чешуйки гидросиликатов, сросшиеся между собой, свидетельствуют о процессе собирательной рекристаллизации. В образце еще

сохраняются незначительные по площади участки исходных клинкерных минералов (рис.6.4, а).

а



б

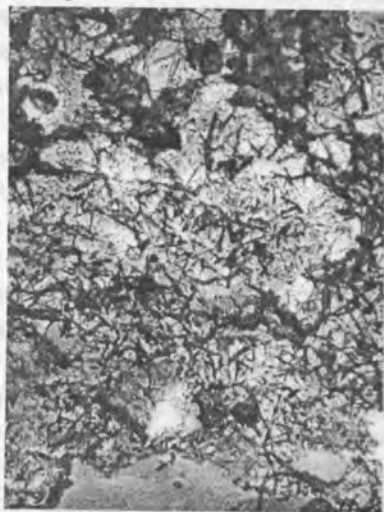


Рис. 6.4. Микроструктура образцов: а) образца № 1, х 6000; б) образца № 2 х 4000

Электронно-микроскопические исследования структуры *образца № 2* свидетельствуют о рыхлой структуре, развитой системе микротрещин, большом количестве микропор, в которых наблюдается образование игольчатых кристаллов гидросиликата кальция, расположенных хаотично с малым количеством контактов (рис. 6.4, б).

Основу микроструктуры вяжущего *образца № 3* составляют гидросиликаты кальция, имеющие чешуйчатое строение, которые срастаются между собой и приурочены к порам. В поле зрения попадают блоки портландита, образованные параллельно ориентированными относительно друг друга призматическими кристаллами.

Микроструктура *образца № 4* подобна микроструктуре предыдущего образца, однако имеет отличительные признаки, заключающиеся в наличие единичных призматических хорошо оформленных кристаллов.

Структура бетона *образца № 5* плотная. Поры на границе заполнитель — вяжущее проросли игольчатыми гидросиликатами кальция, образованными друзами из нескольких кристаллов. В поле зрения попадают блоки сросшихся кристаллов портландита, где уже теряются границы между отдельными кристаллами.

Микроструктура бетона *образца № 6* отличается от всех исследованных образцов. Образовавшиеся в результате гидратации клинкерных минералов гидросиликаты находятся в стадии растворения, образуя пористую структуру с малой площадью контактов между отдельными кристаллами.

При электронно-микроскопическом исследовании бетона *образца № 7* установлено, что его микроструктура очень плотная и однородная. Поры практически полностью перекрыты иглами гидросиликатов кальция. Сросшиеся чешуйчатые образования гидросиликатов образуют блоки с высокой степенью монолитизации. Образовавшиеся в результате карбонизации портландита кристаллы CaCO_3 имеют огранку близкую к совершенной, образуя блоки, по своему строению сходные с монокристаллом.

6.1.5. Петрографический анализ

Петрографические исследования по изучению макроструктуры свежих сколов бетонных образцов, макропористости, визуальных характеристик заполнителей и цементного вяжущего, а также микроструктуры образцов в проходящем свете на прозрачных шлифах с помощью микроскопов МБС-1, МКУ-1 должны дополняться электронно-микроскопическими исследованиями.

Петрографические исследования проводились с помощью бинокулярного микроскопа при увеличении $8\times - 56\times$, на котором определялась макроструктура свежих сколов бетонных образцов, макропористость, визуальные характеристики заполнителей и цементного вяжущего.

Для исследования микроструктуры образцов в проходящем свете на прозрачных шлифах использовался микроскоп МКУ-1 с увеличением 80–320 \times .

Фотографирование производилось в проходящем свете со скрещенными николями. В результате определялись структурные особенности каждого образца — форма микровключений, размеры трещин и пор, размер зерен, их взаимное расположение.

При макроскопических исследованиях *образцов № 1 и № 2* установлено, что крупный заполнитель представлен остроугольными обломками гранита, иногда базальта, а мелкий — окатанными зернами песка, в основном кварца, реже гранита и полевого шпата. Вяжущее имеет серый цвет с плотной структурой (образец № 1) (рис. 6.5, а) и рыхлой (образец № 2) (рис. 6.5, а). Макропоры распределены равномерно и имеют основные размеры в интервале от 0,1 до 1,25 мм. В проходящем свете вяжущее образца № 1 неоднородное, поскольку участки почти изотропного вещества чередуются с участками кристаллического строения. Контакт заполнителя с вяжущим веществом плотный, контактных изменений нет. Однако в единичных случаях зерна кварца размером около 0,55 мм имеют размытые контуры, что свидетельствует о хорошем сцеплении мелкого заполнителя с вяжущим.

Крупный заполнитель *образцов № 3 и № 4* представлен остроугольными обломками диабазы, мелкий заполнитель окатанными зернами кварца, реже гранита, полевых шпатов, песчаников. Вяжущее вещество серого цвета, бетон имеет плотную структуру, макропоры распределены равномерно. Основные размеры пор — от 0,1 до 1,25 мм. В шлифах видно, что вяжущее имеет неоднородный состав, контакт заполнителя с вяжущим во всех случаях плотный. Вокруг отдельных зерен кварцевого заполнителя размером около 0,3 мм наблюдаются каемки из кристаллического вещества шириной от 5 до 18 мкм.

Крупный заполнитель *образцов № 5 и № 6* представлен остроугольными обломками диабазы с единичными включениями гранита, мелкий — представлен окатанными зернами песка, в основном кварца, реже песчаника, гранита, полевых шпатов. Вяжущее вещество серого цвета, в нем наблюдаются единичные поры с преимущественными размерами 0,1–1,25 мм. Отличительной особенностью бетона образца № 5 является плотная структура. Поры на

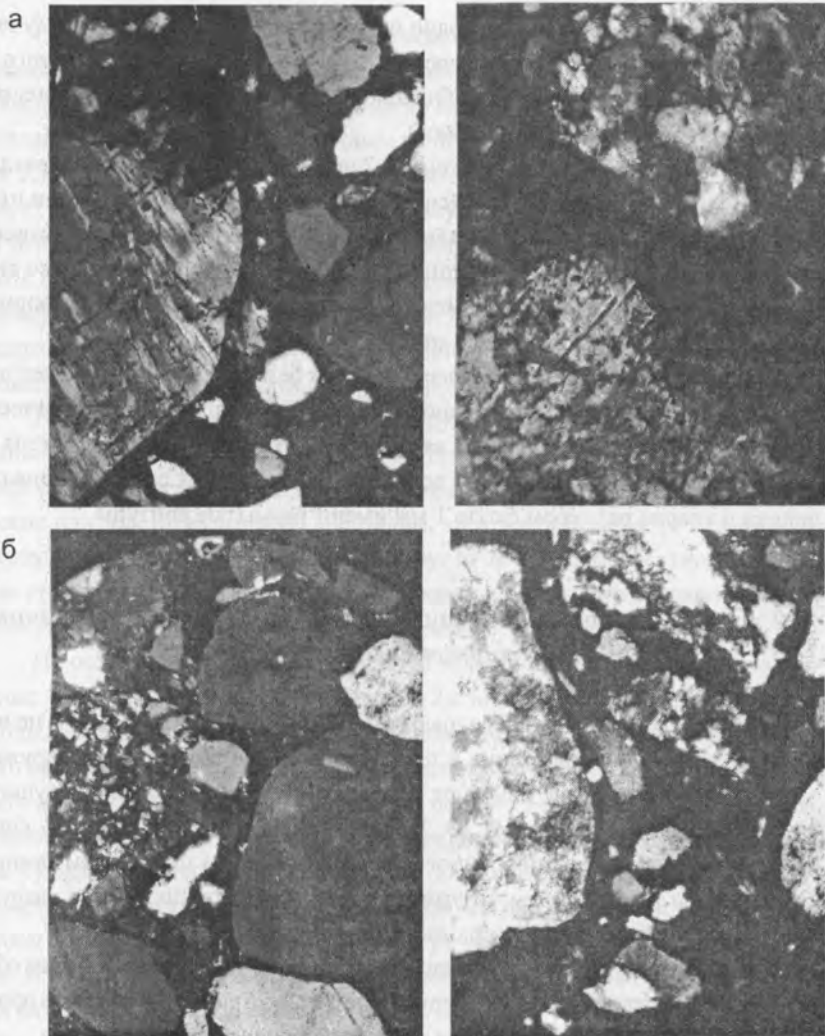


Рис. 6.5. Микроструктура образцов: а) образца № 1, x 110; б) образца № 2, x 110.

границе заполнитель — вяжущее проросли игольчатыми гидросиликатами кальция. Основные гидросиликаты образованы друзами из нескольких кристаллов. При исследовании шлифов образца № 6 в проходящем свете вяжущее окрашено в зеленовато-черный цвет. В поляризованном свете обнару-

живается, что вяжущее неоднородно по минералогическому составу (участки кристаллического строения чередуются с участками почти аморфного вещества). Вокруг зерен кварца наблюдаются каемки мелкокристаллического строения (ширина каемки 5–15 мкм).

Крупный заполнитель *образца № 7* представлен окатанными в различной степени зернами гранита, песчаника, кварцита, полевого шпата и плотного известняка, мелкий — окатанными зернами песка, преимущественно кварца, реже гранита, полевого шпата, песчаника. Вяжущее вещество светло-серого цвета, плотное, хотя имеются единичные поры различной формы с преимущественными размерами от 0,05 до 1,0 мм.

В проходящем свете вяжущее вещество бетона, в отличие от всех описанных выше образцов, однородное и имеет более крупнокристаллическое строение. Контакт заполнителя с вяжущим плотный, вокруг заполнителя наблюдаются каемки шириной от 3 до 20 мкм. В единичных случаях зерна песчаника и кварца размером около 1 мм имеют размытые контуры.

6.2. Анализ полученных результатов и обоснование причины разрушения цементбетона

Макроскопические исследования бетонов образцов № 1 и № 2 не выявили существенного различия в применяемых заполнителях. Обнаружены зерна базальта, которые снижают прочность бетона, поскольку результаты исследований, полученные Т. Ю. Любимовой в СоюздорНИИ [103], свидетельствуют о наименьшей прочности сцепления между цементным камнем и базальтовым заполнителем. Поэтому в смесях содержащих базальт разрушение может проходить по поверхности заполнителя.

По внешнему виду вяжущее вещество образца № 2 отличается от бетона образца № 1 более светло-серым цветом, что может говорить о наличии в вяжущем продуктах коррозии бетона, образовавшихся в результате деструктивных процессов.

Петрографические исследования существенных различий в микроструктуре не выявили, кроме участков, имеющих размытые контуры кварца у образца № 1. Такое образование тонкокристаллического гидроксида кальция уплотняет контакт и повышает прочность сцепления вяжущего с заполнителем.

Электронно-микроскопические исследования позволили установить у образца № 1 более плотную структуру без развитой системы микротрещин.

Результаты химического анализа водных вытяжек бетонов показали, что водная вытяжка из бетона образца № 2 является раствором с повышенным в четыре раза содержанием сульфат-ионов по сравнению с аналогичным показателем образца № 1 и с пониженным в 3,8 раза содержанием ионов кальция и в 3,2 раза — содержанием ионов калия. Значение $\text{pH} = 10,65$ свидетельствует об изменении структуры, поскольку гидросиликаты цементного камня устойчивы при $\text{pH} \geq 11,7$, а любая перекристаллизация фаз бетона приводит к снижению прочности. Низкое содержание ионов кальция и то, что не обнаружено содержание гидроксил-иона, свидетельствует об очень низком содержании портландита $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Повышенное содержание сульфат-ионов позволяет предположить сульфатную коррозию бетона образца № 2.

На дериватограмме бетона № 2 обнаружен эндотермический эффект, связанный с разложением ватерита μCaCO_3 . Наличие в составе цементного камня такой разновидности кальцита, как ватерит, представляющего собой призматические или толстотаблитчатые кристаллы, которые, в отличие от кальцита, не образуют сростков, а растут независимо друг от друга, не способствует упрочнению структуры. Отсутствие в цементном камне портландита свидетельствует о полном выщелачивании и о наличии глубокой коррозии первого вида.

На основании приведенных фактов можно сделать следующее заключение. Разрушение бетона в образце № 2 в виде глубокого шелушения, переходящего в выбоины, может быть обусловлено применением в составе крупного заполнителя зерен базальта, сульфатной коррозией, т.е. коррозией третьего вида, и сопутствующей коррозией первого вида, связанной с выщелачиванием гидроксида кальция. Можно предположить избыточное поступление сульфатов с песком, используемым для приготовления бетона, либо с песком, используемым вместе с хлоридом натрия в качестве противогололедного материала. В составе песка могут находиться минералы, содержащие серу (пирит, гипс, ангидрит), которые под действием гидроксида кальция разлагаются и вызывают сульфатную коррозию бетона. Одной из причин избыточного содержания сульфат-ионов может быть капиллярный подсос гипсосодержащих вод из-за отсутствия хорошо дренирующего подстилающего слоя. Поднимаясь по капиллярам к поверхности бетонного покрытия и затем испаряясь, эти воды откладывают гипс в поверхностном слое бетона. По мере накопления гипса бетон будет разрушаться в результате сульфатной коррозии. Растворенные в воде сульфаты повышают ионную силу раствора, в результате чего увеличивается выщелачивание гидроксида кальция.

В бетона образцов № 3 и № 4 по крупному и мелкому заполнителям, вяжущему веществу, макропористости существенных отличий не обнаружено. При изучении микроструктуры выявлены каемки из кристаллического вещества вокруг отдельных зерен кварца. Водные вытяжки несколько различаются. Можно отметить возросшее содержание в вытяжке бетона № 4 следующих ионов: в 1,2 раза — иона калия, в 2,3 раза — иона натрия, в 1,6 раза — иона HCO_3^- , в 6,5 раз — иона хлора. Все это связано с накоплением в бетоне ионов натрия и хлора из солей, используемых в качестве противогололедного материала. Несколько снизилось содержание ионов кальция и гидроксида, что свидетельствует о начавшихся процессах выщелачивания, которые вызвали поверхностную коррозию бетона в виде шелушения.

По данным термогравиметрического анализа, содержание портландита в обоих образцах одинаково, а кальцита в образце № 4 в 2 раза меньше.

На рентгенограмме бетона образца № 4 появляются дифракционные максимумы, характерные для гидрокарбоалюмината и моносulьфоалюмината кальция, ватериту. Появление этих новообразований свидетельствует о начавшемся процессе перекристаллизации основных гидросиликатов кальция. Так, вместо игольчатых кристаллов этtringита образуются гексагональные пластинки моносulьфоалюмината кальция. Известно, что любая перекристаллизация вызывает внутренние локальные напряжения микроструктуры, что снижает прочность цементного камня. Накопление ионов калия, натрия и хлора способствует увеличению растворимости гидроксида кальция и выщелачиванию цементного камня. Хотя на рентгенограмме образца № 4 не обнаруживается гидрохлоралюмината кальция, что говорит об отсутствии хлоридной коррозии, однако увеличенное содержание в 6,5 раза хлор-иона и дальнейшее его накопление за счет применения противогололедных солей может привести к развитию коррозии третьего вида.

Разрушение бетона в образце № 4 в виде шелушения может быть обусловлено применением песка с большими примесями доломита, который относится к наименее прочным и стойким материалам и не допускается для применения в дорожном бетоне, а так же возникшей коррозией первого вида в результате выщелачивания гидроксида кальция, и если не принять меры по защите поверхности бетона, коррозия приведет к изменению в микроструктуре бетона, затронет более глубокие слои, вплоть до разрушения.

По макроструктуре и минералогическому составу крупного и мелкого заполнителя, характеру пористости цементного камня различий в образцах

№ 5 и № 6 не обнаружено. При электронно-микроскопических исследованиях выявлено резкое отличие структуры образца № 6 от № 5, проявившееся в растворимости гидросиликатов кальция.

Результаты химического анализа водных вытяжек бетонов образцов № 5 и № 6 показали, что содержание ионов хлора в бетоне образца № 6 выше в 2,5 раза, а ионов натрия — в 6,5 раз, чем содержание этих ионов в образце № 5. Это свидетельствует об их накоплении из-за применения на дороге противогололедного материала. Содержание ионов кальция и гидроксил иона в бетонах обоих образцов примерно одинаковое, однако, по сравнению с другими образцами (№ 1, № 3, № 7) — ниже. Следовательно, можно предположить начавшийся процесс выщелачивания гидроксида кальция. Основную разрушительную роль в данном случае играет коррозия бетона третьего вида, связанная с кристаллизацией соли в капиллярнопористом теле бетона. При кристаллизации возникает давление на стенки пор, вызывающее значительные растягивающие напряжения, вплоть до разрушающих.

Термогравиметрическим анализом бетона образца № 6 выявлены небольшие эффекты, характерные для дегидратации гидрогранатов и гидрохлоралюмината кальция. Данные рентгенофазового анализа подтвердили появление этих новоборазований, а также снижение количества портландита в 1,5 раза.

Разрушение бетона в образце № 6 в виде интенсивного шелушения, переходящего в глубокие выбоины, может происходить по следующим причинам. Во-первых, из-за накопления ионов хлора и натрия при применении противогололедного материала, который повышает растворимость портландита и приводит к коррозии первого вида. Во-вторых, накопление ионов хлора приводит к образованию как растворимых, так и нерастворимых комплексных солей кальция. Сама по себе хлоридная агрессия первоначально не приводит к снижению прочности бетона и разрыхлению его структуры. Однако со временем и при наличии сопутствующих факторов (замораживание — оттаивание) происходит снижение прочности уже и за счет коррозии третьего вида. Результаты химического анализа показали, что выщелачивание гидроксида кальция присутствует в начальной стадии и на хорошем участке (образец № 5). Если не принять меры по защите поверхности бетона, то разрушаться начнут и участки цементобетонного покрытия, находящиеся в хорошем состоянии.

Бетон образца № 7 отличается от ранее рассматривавшихся образцов с хороших участков покрытий (№ 1, № 3, № 5). Крупный заполнитель бетона

образцов № 1, № 3 и № 5 представлен главным образом щебнем из гранита, диабазы, иногда базальта, а в бетоне образца № 7 крупный заполнитель — это гравий из гранита, кварцита, полевых шпатов, плотного известняка.

Структура цементного камня образца № 7 по характеру и размерам пор отличается наличием основных пор размером от 0,05 до 1 мм, т.е. значительно меньших, чем у образцов № 1, № 3, № 5 (0,1–1,25 мм). Это можно объяснить тем, что в бетоне применялся дробленный кварцевый песок, с которым в течение длительного времени взаимодействовал цементный камень, в результате чего происходило перекрытие пор иглами гидросиликатов кальция с отложением на их стенках кальцита и портландита.

Электронно-микроскопическими исследованиями выявлена плотная монолитная структура с завершившимися процессами рекристаллизации, с формами кристаллов, близкими к совершенным.

Водная вытяжка бетона образца № 7 отличается низким содержанием щелочных ионов калия и натрия.

Данные, полученные при термогравиметрическом анализе, подтвердили хорошую закристаллизованность структуры и отсутствие новообразований, понижающих прочность бетона. Обнаружен четкий эндозэффект, характерный для дегидратации гидрокарбоалюмината кальция. Содержание портландита составляет всего 2,6%, зато кальцита — 14,2%, что свидетельствует о произошедшей карбонизации гидроксида кальция с образованием кальцита.

На основании приведенного материала можно заключить, что для установления причины возникновения дефектов на дорожном цементобетонном покрытии необходимо проделать комплекс исследований, включающих визуальные и лабораторные. Основным разделом лабораторных испытаний является определение физико-химических показателей бетона. На основании химического, термогравиметрического, рентгенофазового, петрографического, электронно-микроскопического анализов можно сделать вывод о процессах, протекающих в бетоне и ведущих к различным видам коррозии. Если результаты вышеперечисленных анализов свидетельствуют о том, что коррозия в бетоне отсутствует и бетон находится в нормальном эксплуатационном состоянии, то причину возникновения дефекта необходимо искать в температурных напряжениях, состоянии основания цементобетонного покрытия или в нагрузках, действующих со стороны колеса автомобиля, т.е. механических разрушениях. Если в результате проведенных работ делается вывод о деформациях, произошедших в основании дорожной одежды, то необходи-

мо выполнить работы по его усилению способом инъектирования без разрушения верхней части бетонного покрытия.

Для выполнения инъекционных работ должны быть собраны исходные данные о грунте и обосновано применение того или иного вяжущего материала. С учетом этих данных выбирают режим нагнетания с конкретными технологическими параметрами (давлением, временем, расходом) и рассчитывают ожидаемые размеры пропитки грунтов (радиус, глубину). На основании полученных размеров, а также прочностных результатов укрепленного грунта составляют расчетную схему усиления дорожной одежды и методом конечных элементов определяют упругие прогибы усиленной конструкции, подтверждающие целесообразность и эффективность применения способа инъектирования. После этого проводят работы по закреплению грунтов или дорожно-строительных материалов предложенным способом, одновременно с инъекционными работами выполняют ремонт покрытия — гидроизоляцию трещин и заделку выбоин.

Составлена блок-схема по обоснованию применения инъектирования при ремонте цементобетонных покрытий (табл. 6.2.).

Выводы по главе 6

Возникновение любого дефекта на автомобильной дороге, в том числе и разрушение цементобетонного покрытия, имеет свою причину. Чтобы выбрать эффективный способ ремонта необходимо установить эту причину. И если она заключается в потере прочности основания, то никакими гидроизоляционными или латочными методами этот дефект не устранить. В связи с этим предлагается проведение целого комплекса работ, включающих визуальные, инструментальные, лабораторные исследования, на основании которых причина возникновения дефекта может быть установлена с высокой степенью вероятности. Поскольку причины касаются трех основных составляющих: бетона как материала, основания конструкции с учетом всего земляного полотна и нагрузки от движущегося транспорта, — то и комплекс работ объединяет исследования по определению физико-механических показателей грунта, физико-химических и физико-механических показателей бетона и анализу грузопотока по магистралям.

Наиболее трудоемким процессом является определение физико-химических показателей бетона, объединяющее проведение химического, термогравиметрического и рентгенофлуоресцентного анализа.

метрического, рентгенофазового, электронно-микроскопического анализов. Расшифровка дериватограмм, рентгенограмм, фотоснимков, сравнение их с

Таблица 6.2.

Блок-схема обоснования применения способа инъектирования

Характер показателей	Параметры	Зависимости
Исходные данные	<p>Грунт основания, характеризуемый:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ плотностью — ρ; ■ влажностью — W; ■ гранулометрическим составом — A; ■ фильтрационными свойствами — K_{ϕ} <p>Раствор характеризуемый:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ видом вяжущего материала — BB; ■ видом отвердителя — BO; ■ вязкостью — μ; ■ временем гелеобразования — t_r 	<pre> graph TD A["ρ, W, A, Kφ ρ = f(A, W) Kφ = f(A, W, ρ)"] --> B("BB, BO, μ, tr BB = f(Kφ) BO = f(BB) μ = f(Kφ) tr = f(BO)") B --> C{"тип C C, R = f(Kφ) тип R"} C --> D["P = f(Kφ, ρ, W) t = f(P) Q = f(P, t)"] D --> E("R, h = f(K, P, t, ρ) V = f(R, h)") E --> F{"Rсж = f(ρ, W, A, BB)"} F --> G["ly = f(V, Rсж) My = f(ly)"] </br></pre>
Конструкционные параметры	Сферический инъектор — C Плоско-радиальный инъектор — R	
Технологические параметры	Давление — P ; Время нагнетания — t ; Расход раствора — Q .	
Расчетные показатели	Радиус распространения раствора — R ; Глубина проникания раствора — h ; Объем закрепленного массива — V	
Физико-механические показатели	Предел прочности при сжатии — $R_{сж}$	
Моделирование конструкции и расчет упругого прогиба	Упругая деформация — l_y ; модуль упругости — M_y	

содержанием ионов, полученных в результате химического анализа, позволяют сделать вывод о протекающих процессах коррозии в цементобетоне.

Деформация основания земляного полотна требует проведения укрепительных работ, для этого составлена блок-схема по обоснованию применения способа инъектирования.

7. ОБОРУДОВАНИЕ И РЕЦЕПТУРЫ, РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ДЛЯ СПОСОБА ИНЪЕКТИРОВАНИЯ

7.1. Оборудование для укрепления грунтов инъектированием

Для закрепления грунта способом инъектирования под цементобетонным покрытием предусматривается горизонтальное заглубление инъектора, что позволяет усиливать дорожную конструкцию без разрушения бетонного покрытия. Способ может осуществляться с помощью двух комплектов: первый применяется при предварительном бурении горизонтальной скважины с последующим погружением в нее инъектора, второй комплект оборудования применяется для вдавливания инъекторов. Выбор комплектов зависит от материала или грунта, который должен быть укреплен. Если основание сложено из песчаных или гравийных фракций грунта, то можно применять оборудование для вдавливания инъектора, если из каменного материала (щебень, ранее укрепленный грунт) — можно применять оборудование для предварительного бурения скважины. Схемы инъекционного оборудования представлены на рис. 7.1.

Установка для горизонтального бурения (рис. 7.1, а) представляет собой станину 1, направляющие 2, и механизм вращения бура 3. Кроме вращательного движения этот механизм может совершать возвратно-поступательные движения по направляющим с помощью механизма заглубления бура (канатно-блочного, электрического, гидроцилиндрического — на схеме он не указан). Для удержания бура в горизонтальном положении используется скользящая подставка 4. После проделывания отверстия на длину бура к нему подсоединяется глухое звено, и бурение продолжается. Недостатком данного комплекта является периодическое вытаскивание бура с очисткой его от грунта, уборкой грунта с места проведения работ.

После проделывания отверстия в нее погружается инъектор. При вертикальном бурении и последующем погружении инъектора пространство между скважиной и инъектором заполняется песком, при горизонтальном

бурении эту операцию выполнить невозможно. Поэтому необходимо, чтобы диаметр иньектора был немного больше, чем диаметр бура.

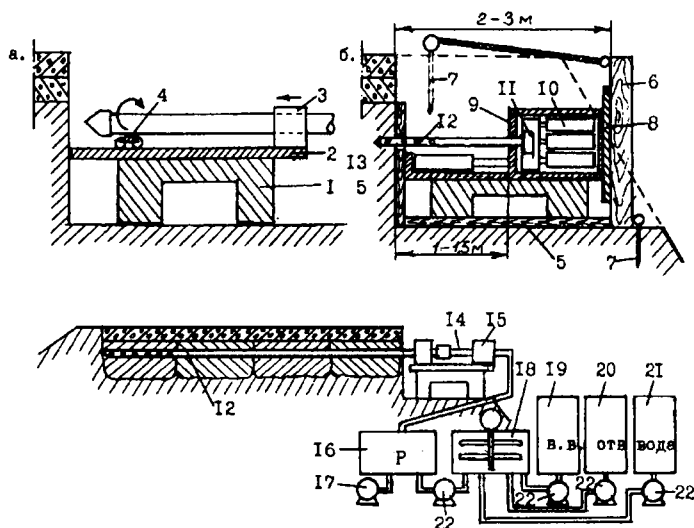


Рис. 7.1. Схема инъекционного оборудования для горизонтального иньектирования: а) приспособление для горизонтального бурения; б) приспособление для горизонтального вдавливания иньектора; в) схема инъекционной установки в сборе.

На рис. 7.1, б изображен комплект вдавливания иньектора. Для этого устраивается горизонтальная площадка, на которую укладываются деревянные щиты 5. Такими же щитами укрепляют вертикальные стенки. На расстоянии 2–3 м от рабочей поверхности устанавливается упорный щит 6 размером 1,5 x 1,5 м, изготовленный из деревянных брусков 0,12 x 0,12 x 1,5 или 0,15 x 0,15 x 1,5 м. Этот упорный щит крепится сверху и снизу к анкерам 7, забитым на глубину 1–1,5 м. На щите закрепляется металлическая упорная плита 8 толщиной 2–3 см. С плитой соединяется рама 9 задавливающего механизма. Внутри рамы закреплены гидроцилиндры 10 (например, марки ЭО-2621), соединенные с подвижной кареткой 11. К этой каретке крепится перфорированное звено иньектора 12. После заглупления этого звена к нему подсоединяется следующее глухое звено, и вдавливание продолжается. Иньекторы

изготавливают из цельнотянутых толстостенных труб диаметром 32–42 мм. При помощи такого механизма можно задавливать иньектор на глубину до 20 м. Для извлечения иньектора предусмотрен гидроцилиндр 13.

На рис. 7.1, в помещена схема иньекционной установки. После заглубления иньектора 12 к нему подсоединяют трубопровод 14, соединяющий иньектор через расходомер 15 с емкостью 16 для создания рабочего давления. Давление создает насос 17. Емкость 16 соединена со смесительной емкостью 18, которая, в свою очередь соединена с емкостями для вяжущего вещества 19, отвердителя 20 и воды 21. Перекачка составляющих иньекционного раствора осуществляется с помощью насосов 22 (например, типа ПС-46).

Комплект вдавливания иньектора имеет ряд преимуществ по сравнению с комплектом предварительного бурения. Во-первых, сокращается время на погружение иньектора. Во-вторых, обеспечивается хороший контакт наружной плоскости перфорированного звена иньектора с грунтом, что обеспечит равномерное распространение раствора в пористой среде. В-третьих, рабочее место содержится в чистоте. В-четвертых, работы по иньектированию грунтов производятся без остановки движения транспорта по проезжей части автомобильной дороги.

7.1.1. Оборудование для глубинного иньектирования

Для производства работ по глубинному закреплению грунтов применяются иньекторы, имеющие перфорированное звено с открытыми отверстиями или закрытые манжетами. Диаметр иньекторов 32–42 мм. Длина глухих звеньев 1–1,5 м, перфорированных участков 0,5–1 м, секций манжетного иньектора 2–3 м. Диаметр отверстий перфорированного звена 5–10 мм.

Шнековый станок, применяемый для бурения скважин, имеет марку БСН-241.

Погружение иньектора осуществляется с помощью пневматических молотков-бетоноломов, дизель-молота ДБ-45 и отбойных молотков типа КЦМ-4, ОМ-506, ОМСП-6, ОМ-5 весом от 40 до 9 кг. Эти механизмы создают рабочее давление 0,4–0,55 МПа при расходе воздуха 1–1,6 м³/мин. Кроме вышперечисленных механизмов может использоваться высокочастотный электроперфоратор С-408Б мощностью 1,7 кВт, частотой вращения вала 1200 об/мин и частотой ударов бойка 1050 уд./мин. Вес перфоратора — 31,5 кг.

Извлечение иньектора из грунта может осуществляться с помощью гидравлических домкратов грузоподъемностью 5–10 т, автопогрузчика типа

Т- 4003, оборудованного захватами, талей грузоподъемностью 5–10 т, шарнирного станка конструкции А. Г. Медведева [104] грузоподъемностью 10 т.

Насосы для нагнетания растворов в грунт могут быть: одноплунжерные ПС-4Б, двухплунжерные НГМ-1М, шестиплунжерные НС-3. Они обеспечивают расход раствора 1–10 м³/мин при давлении до 1,5 МПа. Кроме перечисленных, могут использоваться насосы серии НД производительностью от 400 до 2500 л/ч и давлением 16–10 МПа и агрегаты серии ДА производительностью 0,5–40 л/мин.

В случае приготовления рабочих растворов из кислот в металлических емкостях их внутренняя поверхность должна иметь противокоррозионное покрытие из кислотоупорных лаков (№ 411, каменноугольного), перхлорвиниловых эмалей (ХСЗ-1, ХСЗ-3, ХСЗ-6).

7.2. Конструкция дорожной инъекционной машины

В принципе работы машины заложен способ инъектирования поверхностных слоев грунтового полотна (основания дорожной одежды, обочин, откосов) путем нагнетания вяжущих веществ через иглы-инъекторы в грунт.

Конструкция машины [89] (рис. 7.2.) состоит из следующих основных узлов: рамы 1; задней подвески 2; передней подвески 3; зубчатого колеса 4, закрепленного на оси задней подвески; спаренных промежуточных зубчатых колес — 5 и 6; зубчатого колеса 7, закрепленного на оси механизма перемещения тележки; механизма перемещения тележки и рабочего органа 8; тележки 9; рабочего органа 10; механизма, удерживающего рабочий орган в горизонтальном положении 11; шатуна 12; насоса 13; емкости 14.

Механизм перемещения тележки и рабочего органа 8 состоит из пары зубчатых колес, соединенных цепью. С одним из звеньев цепи соединен шатун 12 и ползун 9, перемещаемы в пазу тележки. В предлагаемой конструкции машины применяются два механизма перемещения и две тележки для того, чтобы удерживать плиту (рабочий орган) по краям, что исключает ее перекосы и обеспечит равномерное поднятие и опускание плиты.

Тележка 9 состоит из колес, которые перемещаются по раме 1, и двух боковых пластин, фиксирующих эти колеса. Пластина, обращенная внутрь машины, имеет вырез, представляющий собой отрезки циклоиды, симметрично расположенные относительно вертикальной оси. На рис. 7.3 изобра-

жена траектория движения рабочего органа с учетом перемещения его совместно с тележкой, имеющей вырез. Симметричные отрезки $1/4$ циклоиды обозначены АБ и АГ.

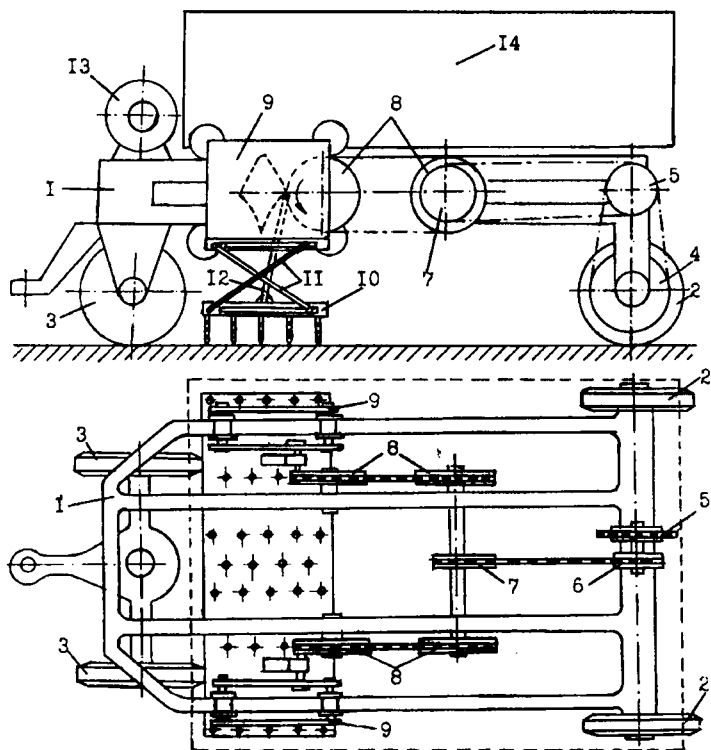


Рис. 7.2. Конструктивная схема дорожной машины.

Оставшаяся верхняя часть кривой имеет замкнутый контур, проходящий через точку Г, лежащую от точки А на расстоянии равном диаметру круга. Причем в точках Б и Г необходимо устраивать сопряжения для избежания в этих местах удара. Чтобы зацепление между цепью, шатуном и тележкой перемещалось в последней в одном направлении, в точках А и Б установлены отсекатели.

Машина работает следующим образом. В начале работы включается муфта сцепления, передающая вращательное движение от колес к зубчатому

колесу 4. Движение с помощью цепей через колеса 5 и 6 передается колесу 7, которое, вращая посадочную ось, приводит в движение механизм 8. Этот механизм начинает перемещать тележку 9, а заодно с ней и шатун 12, который воздействуя на рабочий орган 10, опускает или поднимает его. В момент максимального заглубления включается насос 13. Раствор из емкости 14 начинает нагнетаться в грунт через иньекторы в плите.

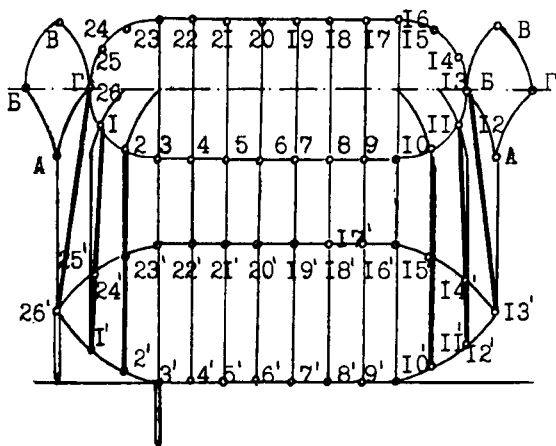


Рис. 7.3. Траектория перемещения рабочего органа.

Система питания иньекторов представлена на рис. 7.4. Она содержит: емкость для вяжущего 1, насос 2, клапан давления 3, емкость 4, насосы 5, плиту с иньекторами 6, заглушки на каждый иньектор 7, датчики включения насосов 8, систему электрического питания 9, трубопроводы 10.

Система работает следующим образом. При включении клапан давления фиксирует незаполненные емкости 4 и включает насос 2, который нагнетает вяжущее вещество из емкости 1 в емкость меньшего объема 4. Когда емкость заполняется, возрастает давление и клапан 3 отключит насос 2. В момент соприкосновения плиты с поверхностью грунта, датчик 8 включает насосы 5, которые начинают нагнетать вяжущее вещество из емкостей 4 через иньекторы в грунт. При понижении давления в емкостях 4 включается насос 2, который начинает перекачивать раствор из емкости 1 в емкость 4. Когда плита приподнимается над грунтом, отключаются насосы — 5 и цикл повторяется.

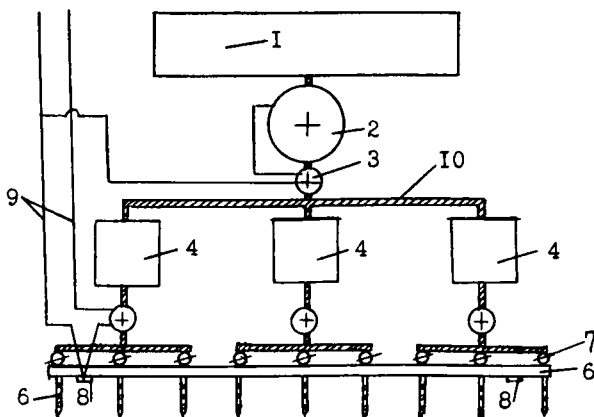


Рис. 7.4. Система питания инжекторов.

7.2.1. Конструктивные особенности дорожной инжекционной машины

Работоспособность и производительность дорожной инжекционной машины зависит от выполнения и соблюдения следующих конструктивных особенностей.

1. Обеспечение передаточного отношения от ведущих колес к зубчатым колесам механизма перемещения рабочей тележки. Диаметр ходового колеса должен быть во столько раз больше диаметра звездочки муфты сцепления, во сколько раз звездочка промежуточного вала должна быть меньше звездочки механизма перемещения, т. е. должно выполняться равенство:

$$\frac{R_4}{R_5} = \frac{R_8}{R_7} \quad (7.1)$$

где R_4 — радиус колеса 4 ходовой тележки (рис. 7.2); R_5 — радиус зубчатого колеса 5; R_7 — радиус зубчатого колеса 7; R_8 — радиус зубчатого колеса 8.

2. Обеспечение сплошности массива укрепленного грунта. Это будет достигнуто при равенстве расстояний между инжекторами в ряду:

$$\ell = \frac{n-1}{n} L, \quad (7.2)$$

где ℓ — длина инжекционной плиты; n — количество инжекторов в ряду; L — длина цепи.

3. Длину цепи механизма перемещения тележки определяем из выражения:

$$L = 2 \pi R_k + 2 S, \quad (7.3)$$

где R_k — радиус зубчатого колеса механизма перемещения тележки; S — прямолинейный участок траектории цепи.

Из этого выражения можно определить прямолинейный участок в зависимости от длины плиты

$$S = \frac{L}{2} - \pi R_k \quad (7.4)$$

Подставив в выражение (7.4) значение выражения (7.2), получим зависимость, характеризующую связь между прямолинейным участком и длиной плиты, а также количеством инжекторов в ряду:

$$S = \frac{\ell n}{2(n-1)} - \pi R_k \quad (7.5)$$

Расстояние между инжекторами — A определяем из выражения:

$$A = \frac{1}{n} L \quad (7.6)$$

Сплошность массива дополнительно обеспечивается расстоянием между инжекторами на плите, зависящим от радиуса пропитки. Расстояние между инжекторами в ряду равно $1,75 R$, а между рядами — $1,5 R$.

На основании этих выражений можно определить длину цепи механизма перемещения тележки в зависимости от радиуса распространения раствора и количества инжекторов в ряду

$$L = 1,75 R n \quad (7.7)$$

4. Вырез на тележке представляет собой симметричную фигуру, по высоте равную двум радиусам зубчатого колеса механизма перемещения тележки. Нижняя часть этой фигуры представляет собой отрезок $1/4$ циклоиды. Эти отрезки могут быть описаны уравнением, характеризующим саму циклоиду, с принятием ограничений:

$$X = R_k \arccos \left(1 - \frac{y}{R_k} \right) - \sqrt{2R_k y - y^2}, \quad (7.8)$$

где R_k — радиус зубчатого колеса механизма перемещения тележки; X и y — координаты точки перемещения.

Граничные условия принимаются $[X] \leq R_k$, $[y] \leq R_k$.

На основании разработанной конструкции и с использованием ее особенностей в металле выполнена дорожная инъекционная машина (рис. 7.5).

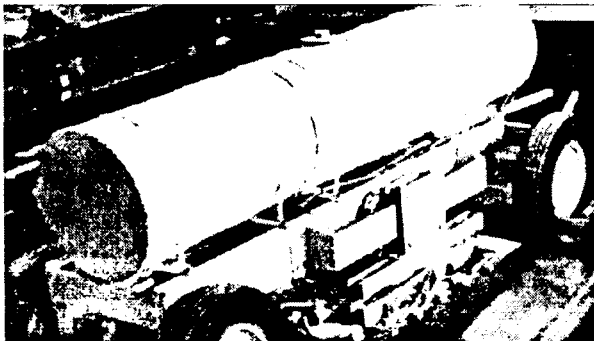


Рис. 7.5. Опытный образец дорожной инъекционной машины.

Технические характеристики машины:

- 1) габаритные размеры в м.: длина — 3,0; ширина — 1,1; высота — 1,2;
- 2) размеры пилы в м.: ширина — 1,2; длина — 1,22;
- 3) количество инъекторов — 40 шт;
- 4) масса в неснаряженном состоянии — 700 кг.

7.3. Машина для укрепления грунта на откосах

Машина относится к устройствам для укрепления грунта на откосах инъектированием закрепляющих растворов [94].

Сущность данной машины заключается в том, что к боковой части самоходной базы с емкостью и насосом присоединена стрела в виде пантографа, на конце которой размещена тележка с рабочим органом в виде плиты с закрепленными на ней инъекторами.

На рис. 7.6 изображен общий вид машины с установкой рабочего органа на откосе. Машина состоит из следующих основных элементов: самоходной базы 1, емкости 2, стрелы 3, насоса 4, трубопровода 5, тележки 6, снабженной рабочими 7 и вспомогательными 8 колесами, плиты 9, механизма опускания и поднятия плиты 10, инъекторов 11.

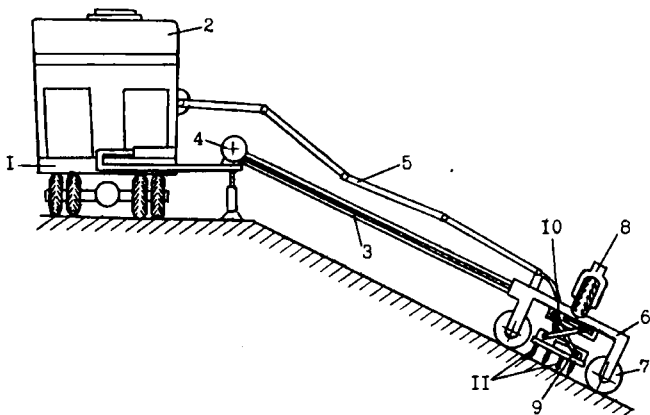


Рис. 7.6. Машина для укрепления грунта на откосах.

Работа машины осуществляется следующим образом. Машину останавливают на вершине откоса и с помощью аутригеров закрепляют в устойчивом положении. С помощью канатно-блочной системы тележку скатывают по склонам на дорожное полотно, соединяют ее со стрелой и трубопроводом и переводят в рабочее положение на откос земляного полотна. Во время перевода из транспортного положения в рабочее состояние тележка перемещается с помощью вспомогательных колес. В рабочем положении вспомогательные колеса вывешиваются, и тележка опирается на рабочие колеса. В дальнейшем тележка перемещается вверх и вниз по откосу. При этом плита с ињекторами периодически опускается на грунт, и вяжущий раствор из емкости через трубопроводы и ињекторы поступает в грунт, закрепляя верхний слой откоса.

Эффективность машины для укрепления грунта на откосах заключается в возможности использования ее одновременно для уплотнения и ињекционного закрепления грунта, проведения работ на откосах разной высоты и крутизны, а также оперативного перевода из транспортного положения в рабочее, что обеспечивает повышение производительности труда.

7.3.1. Способ укрепления откоса земляного полотна

Способ укрепления откоса [93] заключается в укладке на поверхность откоса синтетического нетканого материала и его закрепление с помощью массива грунта, укрепленного способом ињектирования (рис.7.7).

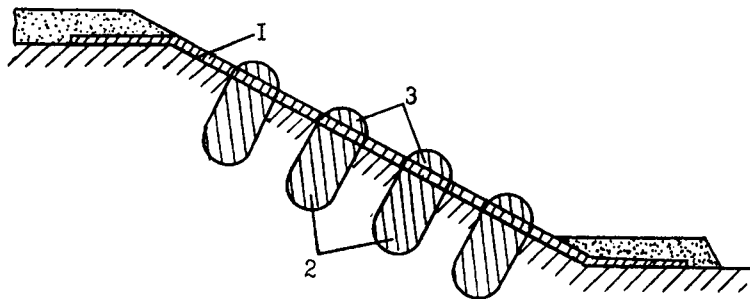


Рис. 7.7. Схема укрепления откоса

Конструкция укрепленного откоса состоит из гибкого покрытия, например синтетического материала 1, массивов 2 закрепленного грунта, полусфер 3, образованных выступающей над откосом частью массива 2.

Укрепление грунта осуществляется следующим образом.

Синтетический материал, выпускаемый промышленностью в рулонах, раскатывается по профилированной поверхности откоса сверху вниз с обязательным нахлестом по бокам и заделом сверху, на обочине и внизу, у подошвы откоса. Заделывание устраивают на 0,5–1,0 м. Перекрытие соседних полос синтетического материала составляет примерно 0,3–0,5 м. Для фиксации заделов синтетического материала необходимо устраивать грунтовую присыпку. Затем на поверхность откоса опускают инъекторы, закрепленные в шахматном порядке. Инъектор при этом прокалывает синтетический материал. Включается нагнетательный орган, и вяжущее вещество нагнетается через инъекторы в грунт. Излишек вяжущего, вышедшего на поверхность откоса, образует полусферу над закрепленной областью, приклеивая тем самым синтетический материал к массиву укрепленного грунта. По завершении времени нагнетания инъекторы извлекаются из грунта и перемещаются на новое место.

Рассмотренный способ укрепления откоса позволяет предотвратить эрозию земляных сооружений.

7.3.2. Установка для укрепления грунта

Установка для укрепления грунта [91] обеспечивает повышение производительности за счет автоматического регулирования параметров инъектирования закрепляющего раствора.

Установка для укрепления грунта (рис.7.8) содержит продольные элементы 1, поперечные элементы 2, продольную балку 3, поперечные балки 4, инъекторы 5, пантографные системы 6, 7, 8, гидроцилиндры 9, 10, 11, 12, 13, механизмы 14 и 15 регистрации плотности грунта, устройства 16 контроля перемещения инъекторов.

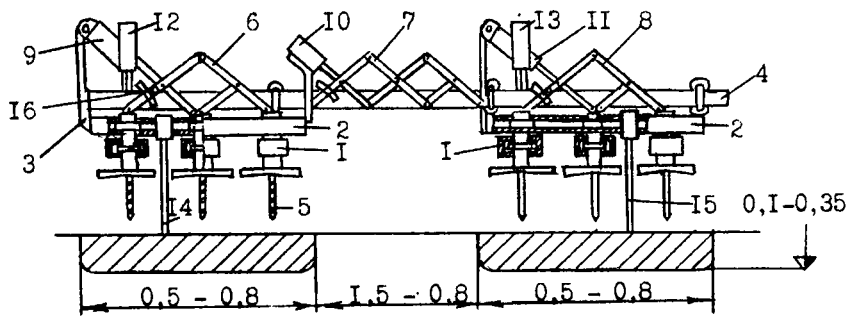


Рис. 7.8. Схема установки для укрепления грунта.

Установка работает следующим образом.

Установку в сборе подсоединяют к емкости и насосу для нагнетания укрепляющего раствора и с помощью грузоподъемного механизма установливают на поверхность грунта. Механизмы 14 и 15 регистрации плотности грунта в зависимости от состояния грунта, автоматически устанавливают оптимальные параметры инъектирования закрепляющего раствора: ширину каждой колеи, расстояние между колеями, расстояние инъекторами, глубину их погружения в грунт, величины давления и расхода раствора. Под весом установки или под воздействием дополнительной силы инъекторы заглубляют в грунт. При достижении необходимой глубины погружения инъекторов включают систему нагнетания раствора. По окончании пропитки грунта установку поднимают, при этом она приходит в исходное состояние, и перемещают на следующий участок для укрепления грунта.

Благодаря автоматическому регулированию параметров инъектирования закрепляющего раствора повышается производительность работы и обеспечивается высокое качество укрепленного грунта.

7.4. Рецептуры закрепляющих растворов для инъектирования

Анализируя рецептуры, применяемые в строительной практике для закрепления грунтов, и учитывая особенности инъектирования, связанные с проницаемостью растворов без нарушения естественного сложения грунтов считаем, что наибольший эффект достигается при химическом закреплении. Для этого применяется раствор силиката натрия (жидкое стекло) плотностью 1,4–1,5 г/см³ или смолы типа карбамидных, фенолформальдегидных, фуруроловых, индено-алкилароматических.

При использовании синтетических смол в дорожном строительстве первостепенное значение приобретают вопросы охраны окружающей среды [105]. В связи с этим были рассчитаны ПДК содержания формальдегида в воздухе рабочей зоны для карбамидных смол КМ, КМ-2, КМ-3 и сравнены с требованиями государственного стандарта безопасности труда и общими санитарно-гигиеническими нормами (ГОСТ 12.1 005-80). Расчеты показали, что содержание формальдегида меньше ПДК [106].

Карбамидная смола представляет собой продукт поликонденсации формальдегида с мочевиной. Эта смола полимеризуется при нормальной температуре в присутствии отвердителя — соляной или щавелевой кислот или хлористого аммония, хорошо растворяется в воде и в этом состоянии имеют небольшую вязкость. Наибольшее распространение получили карбамидные смолы: “Крепитель М”, “Крепитель М-2”, “Крепитель М-3”. например для “Крепителя М” оптимальным раствором является раствор смолы плотностью 1,075–1,08 г/см³ (100 частей) и соляной кислоты 3 %-ной концентрации (4–6 частей). Время гелеобразования при таком соотношении смолы и отвердителя находится в пределах 1–3 ч.

Инструкцией по повышению устойчивости земляного полотна автомобильных дорог глубинным закреплением грунтов (РСН 15-76) предлагается использовать при глубинном инъектировании концентрат сульфатно-дрожжевой бражки.

Рекомендуемые рецептуры для инъектирования грунтов приведены в табл. 7.1.

Помимо смоляных растворов при закреплении грунтов способом инъектирования могут найти применение рецептуры, составленные на основе силиката натрия.

Для закрепления песчаных грунтов с коэффициентом фильтрации 2–80 м/сут., в строительной практике широко применяют двухрастворную силика-

тизацию, представляющую собой поочередное нагнетание в грунт растворов силиката натрия и хлористого кальция. В результате песчаный грунт приобретает прочность 1,5–5 МПа.

Для закрепления мелких песков и пылеватых грунтов, характеризующихся коэффициентом фильтрации 0,5–1,0 м/сут., применяется способ однорастворной силикатизации, представляющий собой введение раствора, состоящего из двух или трех компонентов с вязкостью, близкой к вязкости воды. При однорастворной силикатизации применяются рецептуры: силикатно-фосфорнокислая, силикатно-алюмосерноокислая, силикатно-фтористосерноокислая, аммонийно-силикатная, силикатно-кремнефтористоводородная, алюмосиликатная.

Для закрепления песчаных и супесчаных грунтов с $K_{\phi} = 0,1–20$ м/сут., в том числе водонасыщенных, может использоваться способ газовой силикатизации, основанный на применении углекислого газа в качестве отвердителя жидкого стекла [107].

Таким образом, можно утверждать, что в строительной практике известно большое количество рецептов, составленных на основе смол или жидкого стекла, которые могут найти применение при инъектировании грунтов.

Проведя анализ рецептов растворов, применяемых при инъектировании, можно заключить, что основными компонентами являются: вяжущее, отвердитель, вода. Смешение их в определенном соотношении позволяет получить раствор заданной вязкости и плотности.

Таблица 6.1.

Рецептуры смесей для инъектирования

№ пп	Компоненты смеси	Объемное соотношение компонентов	Плотность раствора г/см ³	Виды грунтов. Разбавление водой
1	2	3	4	5
1	Смола КМ Соляная к-та (3%)	100 3–6	1,07–1,08 1,013	Песчаные и супесчаные грунты с $K_{\phi} > 1$ м/сут и карбонатностью не выше 3 % (1:1)
2	Смола КМ Щавелевая к-та	100 8–12	1,15–1,16 1,019–1,008	
3	Смола КМ-2 Щавелевая к-та	100 8–12	1,09 1,023	
4	Смола КМ-3 Щавелевая к-та	100 14–24	1,15–1,67 1,023	
				– “ – 1 : 2,5

1	2	3	4	5
5	Карбамидная смола МФ-17 Соляная к-та	100 8	1,25 1,02	— “ — 1 : 1
6	Карбамидная смола УКС Щавелевая (4 %)	100 2	1,23 1,03	— “ — 1 : 1
7	Смола КМ-3 Сульфитно-спиртовая барда Соляная к-та	100 100–200 25–45	1,178–1,18 1,15–1,16 1,013	— “ — 1 : 2,5
8	Смола КМ-3 Азотнокислый аммоний Соляная к-та	100 100–200 10–8	1,178–1,18 1,1–1,2 1,023	— “ — 1 : 2,5
9	Силикат натрия Сернокислый аммоний	100 80	1,19 1,025	Мелкие пески и пльвуны. Карбонатные
10	Силикат натрия Кремнефторитоводородная к-та	100 14	1,25 1,08	Слабоводопроницаемые. Карбонатные
11	Силикат натрия Алюминат натрия	100 20	1,15 1,05	Алювиальные мелкозерн. пески

7.5. Производство работ по инъектированию при ремонте цементобетонных покрытий

После принятия решения о целесообразности усиления основания цементобетонных покрытий выполняются следующие работы:

- разметка площадки для оборудования (шириной 2–3 м, глубиной 1,5–2,0 м, длиной — до плоскости откоса);
- отрывка с помощью легкого экскаватора (на базе трактора “Беларусь”) площадки для оборудования;
- крепление вертикальных стенок щитами (инвентарное деревянное оборудование) и укладка пологого щита;

- установка упорного щита и его крепление анкерами, забитыми на глубину до 1,0 м;
- установка металлической упорной плиты;
- установка задавливающего механизма;
- крепление на подвижной каретке задавливающего механизма перфорированного звена инжектора;
- создание давления в гидроцилиндрах задавливающего механизма, в результате чего происходит погружение инжектора в грунт;
- освобождение подвижной каретки от перфорированного звена и возврат каретки с помощью обратного гидроцилиндра в исходное положение;
- крепление глухого звена инжектора между подвижной кареткой и перфорированным звеном;
- задавливание перфорированного и глухого звеньев (эти операции повторяются до тех пор, пока общая длина инжектора не станет равной ширине цементобетонного покрытия);
- подсоединение инжектора с помощью трубопровода к емкости, в которой создается рабочее давление, смонтированной в кузове грузового автомобиля;
- приготовление рецептуры закрепляющего раствора в смесительной емкости;
- включение инжекционной установки и нагнетание раствора в грунт, при этом по манометру контролируется давление и по секундомеру — время;
- по истечении времени нагнетания раствора производится отсоединение инжектора от трубопровода и присоединение к подвижной каретке;
- извлечение инжектора на одно глухое звено;
- повторение операции по подсоединению инжектора к емкости, приготовлению закрепляющего раствора и нагнетанию его в грунт до тех пор, пока не будет закреплена полоса грунта под цементобетонным покрытием;
- демонтаж задавливающего механизма, крепительных и упорных щитов осуществляется в обратной последовательности;
- восстановление обочины и откосов насыпи с обязательным послойным уплотнением и засевом трав.

Для получения раствора рабочей концентрации исходный вяжущий материал разбавляется водопроводной водой, количество которой определяется по формуле:

$$Q_w = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_2 - 1} Q_u, \quad (7.9)$$

где Q_w — количество добавляемой воды, л; γ_1 — плотность исходного раствора, г/см³; γ_2 — плотность раствора рабочей концентрации, г/см³; $Q_{\text{и}}$ — количество исходного раствора, л.

Рабочий раствор приготавливается непосредственно перед нагнетанием в грунт. При работе с соляной кислотой для предохранения от коррозии металлической емкости и инъекционного оборудования в кислоту необходимо добавлять ингибитор “Уникол-2” — продукт конденсации анилина и уротропина, в количестве 1%.

При глубинном инъектировании и вертикальном расположении инжектора должен быть оставлен слой незакрепленного грунта мощностью 1–1,5 м. При горизонтальном расположении инжектора под цементобетонным покрытием инжектор заглубляется в грунт либо сразу под слоем укрепленного грунта, либо под слоем щебня.

Количество израсходованного раствора на одну заходку контролируется расходомером, включенным в сеть трубопровода. Это количество может быть определено расчетным путем по формуле:

$$Q_p = \pi R^2 h n \beta, \quad (7.10)$$

где R — радиус закрепления, м; h — глубина закрепления, м; n — пористость грунта, %; β — коэффициент, равный при смолизации 10.

Отклонение количества нагнетаемого в каждую заходку раствора не должно быть больше 5%. Отклонение в величине давления при нагнетании раствора не должно быть более 10%. Процесс нагнетания раствора может производиться циклически с продувкой воздухом после каждой остановки процесса. При поверхностном инъектировании грунтов на обочине автомобильной дороги инжекторы располагаются в шахматном порядке.

Основным видом вспомогательных работ является промывка и чистка оборудования. Блок-схема производства работ по инъектированию грунтов, лежащих в основании дорожных цементобетонных конструкций, представлена на рис. 7.9.

Выводы по главе 7

Для закрепления грунта способом инъектирования при ремонте автомобильных дорог с цементобетонным покрытием разработана конструктив-

ная схема оборудования. Согласно этой схеме, производится внедрение инъектора, находящегося в горизонтальном положении, непосредственно в грунт под бетонным покрытием, а нагнетание через него закрепляющего раствора осуществляется по мере извлечения из грунтового массива.

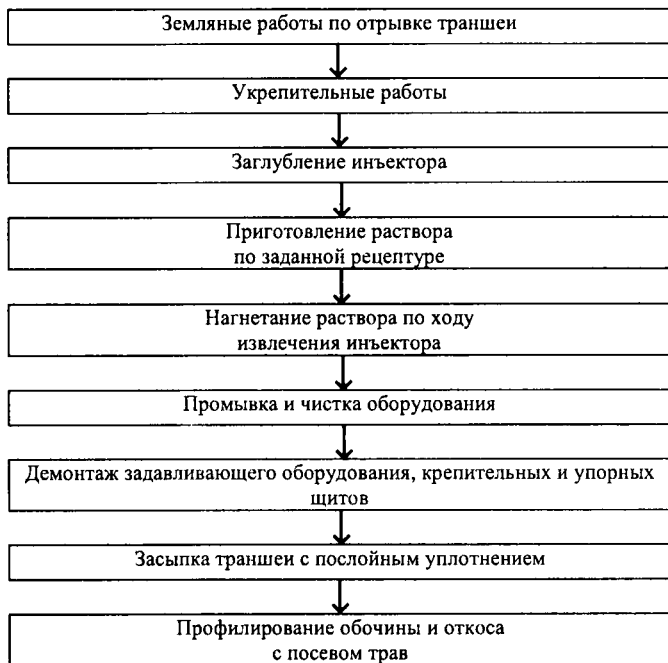


Рис. 7.9. Блок-схема производства работ по инъектированию при ремонте цементобетонных покрытий.

Для поверхностного закрепления грунта способом инъектирования, т.е. на глубину не более 0,5 м от дневной поверхности и механизации технологического процесса, разработана конструкция дорожной инъекционной машины, заглубляющей инъекторы в грунт и извлекающей их при непрерывном движении. Инъекционная машина имеет ряд конструктивных особенностей, касающихся соотношений зубчатых колес для уравнивания движения машины и тележки с рабочим органом; длины плиты и длины цепи рабочего органа для обеспечения монолитности закрепленного массива грунта; выреза на тележке в виде 1/4 циклоиды для вертикального заглубления инъекторов.

Для укрепления грунта способом инъектирования на наклонной поверхности (откос насыпи автомобильной дороги) разработана конструкция машины, осуществляющей перемещение автономного рабочего органа по поверхности откоса с помощью телескопической стрелы или пантографной системы.

Разработан способ укрепления откоса земляного полотна автомобильной дороги, заключающийся в укладке на поверхности откоса нетканого синтетического материала и его фиксации на откосе сверху и снизу с помощью массива грунта, закрепленного способом инъектирования

Учитывая, что местные грунты могут быть представлены разными видами и иметь различную плотность, что отразится на коэффициенте фильтрации и на радиусе распространения раствора в грунте при его укреплении способом инъектирования, разработана схема установки. Эта установка представляет собой систему взаимно перемещаемых инъекторов, что позволит получить однородный массив укрепленного грунта.

Способ инъектирования наиболее эффективен, если в качестве закрепляющих растворов применяются растворы смол или силиката натрия. Учитывая богатый опыт по закреплению грунтов способом инъектирования и результаты исследований, проводимые в научных центрах России и Беларуси, предложены рецептуры смесей для использования при способе инъектирования.

Производство работ по инъектированию регламентировано отдельными технологическими операциями, которые составляют технологический цикл. На основании этого составлена блок-схема производства работ по укреплению грунтов способом инъектирования при ремонте автомобильных дорог с цементобетонным покрытием.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Республика Беларусь имеет широко разветвленную сеть автомобильных дорог с цементобетонным покрытием, на которых в последние годы стало появляться большое количество дефектов. Все они связаны с процессами и деформациями, протекающими как в самом цементобетоне, так и в основании дорожной конструкции. Чтобы не разрушать бетонное покрытие при усилении основания, предлагается применять способ инъецирования, заключающийся во внесении вяжущего вещества в пористую среду грунта или дорожно-строительного материала.

Проведен анализ проницаемости грунта при ламинарном режиме течения жидкости, в результате чего рассмотрена модель фиктивного грунта, составленного из частиц одного диаметра, которая характеризуется уменьшением пористости за счет возникновения застойных зон при обтекании шаров вязкой жидкостью. Кроме того, у вязкой жидкости при ламинарном течении между слоями возникают касательные напряжения, в результате чего появляется сила сопротивления. Процесс течения жидкости в поровом пространстве может быть представлен в виде совокупности параллельных линий (одномерная задача), радиальных линий с ограничением по длине (плоско-радиальная задача) и линий тока, образующих сферическую область (сферическая задача). Каждая из этих задач решена относительно радиуса распространения раствора. Рассматривая истечение раствора через отверстие инъектора, можно заметить, что при выходе раствора из отверстия пористая среда создает определенное сопротивление, а поток жидкости имеет перепад давления от максимального значения у отверстия до минимального — у границы распространения раствора. Величину перепада давления учитывает коэффициент гидравлических потерь, который зависит от величины и количества отверстий на инъекторе. Введя этот коэффициент в формулу для определения радиуса распространения раствора через сферический источник, по-

лучили выражение, согласно которому расчетные данные имели наименьший показатель точности по сравнению с общеизвестными формулами.

Построена схема формирования структуры бетона, состоящая из процессов затворения бетонной смеси с образованием дисперсной структуры, развитием пространственной коллоидной системы, образованием мелких гидросиликатов кальция и их кристаллизацией, ростом длинных волокон этрингита с образованием жесткой структуры. На каждой из этих стадий возникают и создаются условия по зарождению причин образования дефектов на дальнейших стадиях. После рассмотрения кинетики твердения бетона проанализированы возможные причины протекания трех видов коррозии. На заключительном этапе проведенного анализа цементобетон представлен в виде строительной конструкции — дорожной плиты, имеющей весьма развитую поверхность, контактирующую с влажным основанием и в связи с этим имеющую значительный перепад температур и влажности. Кроме того, эта конструкция постоянно работает на изгиб, сжатие и расширение, делающие ее эксплуатацию весьма сложной, что, в свою очередь, приводит к возникновению дефектов.

Автомобильная дорога как объект изучения рассмотрена в трех состояниях: новом — D_{10} , подверженном дефектам — D_{20} и отремонтированном — D_{30} . Приняв в качестве определяющего фактора прочностные показатели, проанализировали возможные варианты возникновения дефектов. Для этого каждая из систем разделена на соответствующие подсистемы, определяющие:

- 1) для новой дороги — качественные составляющие бетонной смеси и прочное основание;
- 2) для дороги, имеющей дефекты, — разрушение одного или нескольких составляющих бетона и ослабление несущей способности основания;
- 3) отремонтированной конструкции — усиление основания, заделку дефектов цементобетонной смеси.

Оценка дефекта связана с переходом от структурной модели (D_{10}) к функционально-структурной, характеризуемой прочностными показателями цементобетона и основания, а также оптимальной плотностью бетона.

Определены факторы, отличающие систему D_{10} от D_{20} и исследовано их влияние на каждый из возникающих дефектов. Помимо количественной проведена качественная оценка дефекта на возникновение удара колеса автомобиля о препятствие, что позволило обосновать геометрические размеры критических параметров дефектов.

Разработка системы D_{30} позволила определить пути воздействия материалов и технологий, применяемых при ремонте конструкции как основания, так и цементобетонного покрытия.

Технология инъектирования характеризуется такими основными технологическими параметрами, как давление, расход и время, которые определяют область распространения раствора в грунте через радиус и глубину пропитки. Рассмотрены четыре варианта областей пропитки, создаваемые в глубинном или в поверхностном слое при вертикальном или горизонтальном расположении источника нагнетания. Учитывая экспериментальные результаты, указывающие на неравномерность распространения раствора в вертикальной плоскости, рассчитаны объемы закрепленного грунта, а также определены радиусы пропитки для грунтов с различными коэффициентами фильтрации.

На основании экспериментальных данных, обработанных методом математической статистики, установлена корреляционная связь между технологическими параметрами. В алгоритме программы заложен критерий Фишера, позволяющий оценить адекватность модели. Выбор функциональных зависимостей из 16 просчитанных моделей производился методом наименьших квадратов. В результате установлены зависимости, характеризующие изменение давления от расхода и параметров распространения раствора в грунте.

Обоснован выбор весовой нагрузки для расчета плиты цементобетонного покрытия.

На основании положений, утверждающих, что при давлении нагрузки, приложенной к поверхности грунта, в грунтовом основании по краям нагрузки возникают зоны пластических деформаций, способствующие просадкам плиты по краям (швам) или в местах возникновения трещин, предложена схема усиления основания в местах возникновения этих пластических деформаций и конструкция усиления жесткой дорожной одежды. Произведен расчет упругих прогибов по трем схемам, отличающимся друг от друга конструкциями усиления. Для расчета плиты на упругом основании использован метод конечных элементов и проектирующая система несущих конструкций строительных объектов "Liga". Результаты расчета указывают на уменьшение вертикальных осадок.

Предложены варианты усиления дорожных конструкций с помощью инъектирования. Разработана концепция изучения причин возникновения дефектов.

Выполнены экспериментальные исследования по определению зависимости изменения давления от фильтрационных свойств грунта, конструкции инжектора, влажности грунта, плотности и времени нагнетания раствора. Все эти зависимости связаны с определенным расходом раствора. На основании полученных результатов установлены технологические параметры как для поверхностного, так и для глубинного инъецирования.

Основной показатель эффективности инъецирования — радиус распространения раствора. Поэтому оптимальными технологическими параметрами считаются те, которые позволяют получить наибольший радиус распространения. Однако радиус не является самоцелью. Основным показателем является прочность закрепленного грунтового массива. Испытаны образцы укрепленного грунта, выпиленные из различных областей зекрепленного массива единичной глыбы и сопряженных глыб. Получены сравнительные прочностные результаты для одних и тех же грунтов, обработанных способами смешения и инъецирования растворами, имеющими различную плотность.

На образцах цементобетона, отобранных с мест разрушения на автомобильных дорогах, проведен полный комплекс физико-химических исследований, включающий химический, рентгенофазовый, термогравиметрический анализы, оптическую и электронную микроскопию. На основании полученных результатов высказана гипотеза о причине возникновения дефекта.

Для инъецирования грунтов предложено оборудование, обеспечивающее нагнетание вяжущих растворов в поверхностные слои земляного полотна, в основание цементобетонного покрытия автомобильной дороги, а также в глубинные слои. Предложены рецепты инъекционных закрепляющих растворов, а также способы и материалы для ремонта дефектов цементобетонных покрытий автомобильных дорог.

Разработана блок-схема применения инъецирования для устранения дефектов дорожных конструкций с цементобетонным покрытием, а также блок-схема производства работ по инъецированию при ремонте этих конструкций. Составлен перечень технологических операций по усилению основания.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Закрепление грунтового основания при строительстве автомобильной дороги может быть осуществлено способом инъецирования, относящимся к поверхностному и образующему область, состоящую из цилиндрической и полусферической зон, каждая из которых по отдельности может быть

отнесена к плоскорадиальной и сферической задачам. Учитывая, что безразмерная часть сферического источника описывается кубическим уравнением, можно заключить, что распространение раствора через сферический источник при одних и тех же условиях идет медленнее, чем через плоскорадиальный. В связи с этим для дальнейших преобразований выбрано выражение, характеризующее плоскорадиальную задачу, которое дополнено коэффициентом гидравлических потерь, учитывающим перепад давления в самом инъекторе при выходе из отверстия и на периферии области распространения [30].

2. Дефекты в дорожной плите начинают возникать при наличии таких определяющих факторов, как концентрация напряжений, воздействие динамических нагрузок и возникновение различных видов коррозии. Каждый из видов дефектов имеет причинную зависимость, приводящую к ликвидации одного или нескольких факторов, отражающих прочность. Переход от структурной модели к функционально-структурной осуществлен на основе выбора однофакторной ситуации между прочностными показателями и оптимальной плотностью смеси. Качественная оценка дефектов позволила определить их объемы соизмеримые с отпечатком следа колеса на покрытии. Основной была выбрана подсистема характеризующая усиление основания, поскольку это позволит ликвидировать причину прогрессирующей деформации плиты [108].

3. Инъектирование грунтов в поверхностных слоях земляного полотна или непосредственно под цементобетонной плитой необходимо осуществлять при режиме, характеризуемом постоянным давлением нагнетания, как наиболее простом и эффективном [10].

Основным технологическим параметром является давление нагнетания, которое определяет расход раствора и параметры пропитки. Установлена корреляционная связь между характеристиками для определенного грунта и промежутка времени. Проведен полный анализ уравнений множественной регрессии и рассчитаны коэффициенты уравнений, представляющие прямолинейную зависимость, кубическую и составленную из произведений и неизвестных в первой степени [30].

4. Расчет упругих прогибов, проведенный по трем моделям, представляющим собой цементобетонную плиту, лежащую на упругом неоднородном основании, и приложении нагрузки на углу плиты и посередине крайнего сечения показал, что устройство укрепленной области в основании уменьшает упругую деформацию. Помимо разных вариантов основания изменялись показатели самой цементобетонной плиты, в частности удельный вес и коэффициент Пуассона.

Концепция определения причин разрушения дорожных конструкций имеющих цементобетонное покрытие заключается в последовательном выполнении визуальных, инструментальных и лабораторных исследований, которые позволяют выдвинуть гипотезу по разрушению конструкции [108].

5. Наилучшее распространение в порах грунта имеют вяжущие материалы на неорганических растворителях, в частности синтетические смолы типа карбамидных. Применяемую плотность раствора необходимо учитывать при влажности грунта. Прочность укрепленного грунта, характеризуемая пределом прочности при сжатии, выше у образцов, укрепленных способом инъектирования, чем у аналогичных образцов, укрепленных способом смешения [102].

6. Для укрепления грунтов способом инъектирования разработаны оригинальные конструкции установок и дорожных машин, защищенные авторскими свидетельствами на изобретения, позволяющие механизировать процесс нагнетания раствора в грунты. Ремонт дефектов выполняется на основе подбора необходимых материалов и способов, которые выбираются в зависимости от цели проведения работ [85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93].

ЛИТЕРАТУРА

1. Glossop R. The invention and development of injection process. *Geotechnique*, sept. 1960 — dec. 1961.
2. Камбефор А. Инъекция грунтов. / Пер. с фр.— М.: Энергия, 1971.— 332 с.
3. Гончарова Л.В. Основы искусственного улучшения грунтов. — М.: Изд-во Московского университета, 1973. — 376 с.
4. Бабков В.Ф. Устойчивость земляного полотна автомобильных дорог. М., Высш. шк., 1966. — 106 с.
5. Волоцкой Д.В. Теоретические предпосылки химических способов обеспечения устойчивости земляного полотна. //Труды МАДИ. Вып 63. — М., 1973. — с. 110–116.
6. Волоцкой Д.В. Основы глубинного закрепления грунтов земляного полотна автомобильных дорог. — М.: Транспорт, 1978. — 119 с.
7. Гринько В.С., Горелик А.А., Порицкий Р.З. Повышение устойчивости существующих автомобильных дорог глубинным закреплением грунтов// Строительство и эксплуатация автомобильных дорог и мостов. Сб. статей — Мн., 1973. с 14–22.
8. Дранников А.М., Стрельцес Г.В., Купраш Р.П. Оползни на автомобильных дорогах. — М.: Транспорт, 1972. — 157 с.
9. Инструкция по повышению устойчивости земляного полотна автомобильных дорог глубинным закреплением грунтов. РСН 15-76. Госстрой БССР. — Мн., 1976. — 55 с.
10. А.с. 755943 СССР, МКИ³ E 02 D 3/12. Способ укрепления грунта. / Бабаскин Ю.Г. (СССР) — № 2583819/29-33; Заявлено 22.02.78; Опубл. 15.08.80, Бюл. № 30 // Открытия. Изобретения. — 1980. — № 30. — с. 25.
11. Андрианов П.И. Связанная вода почв и грунтов//Труды института мерзлотоведения им. Н.А.Обручаева. т. III. — М.: Изд-во Академии наук СССР, 1946. — 264 с.
12. Лейбензон Л.С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. ОГИЗ. — М.-Л.: Гостехиздат, 1947. — 240 с.
13. Лейбензон Л.С. Собрание трудов: т. II. Подземная гидрогазодинамика. — М.: Изд-во Академии наук СССР, 1953. — 544 с.

14. Щелкачев В.Н., Лапук Б.Б. Подземная гидравлика. — М.: Гостоптехиздат, 1949. — 524 с.
15. Полубаринова-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод. — М.: Наука, 1977. — 664 с.
16. Полубаринова-Кочина П.Я. О неустановившихся движениях грунтовых вод при фильтрации из водохранилищ//Прикладная математика и механика. Т. XIII, В. 2. — М.-Л.: Академия наук СССР, 1949. — с. 187–206.
17. Веригин Н.Н. О фильтрации из канала в сухой грунт. Доклады Академии наук СССР. Т. XXIX № 4. — М., 1951. С. 581–585.
18. Веригин Н.Н. Методы определения фильтрационных свойств горных пород. — М.: Госстройиздат, 1962. — 180 с.
19. Волоцкой Д.В. Обеспечение устойчивости земляного полотна автомобильных дорог инъекционным закреплением грунтов: Автореф. дис. д-ра технич. наук: 05.23.14 / Моск. авт. дор. ин-т. — М., 1984. — 38 с.
20. Волоцкой Д.В., Нетфулов Ш.Х. Химический способ укрепления откосов земляного полотна//Автомобильные дороги. № 12. 1973. — С. 13—14.
21. Истомина В.С. Фильтрационная устойчивость грунтов. — М.: Изд-во лит-ры по стр-ву и архитектуре, 1957. — 296 с.
22. Жуковский Н.Е. Собр. соч. Теоретические исследования о движении почвенных вод. т. III. — М.: Гостехиздат, 1949. — 700 с.
23. Минц Д.М. Некоторые вопросы теории фильтрации однородных жидкостей и суспензий и их практические приложения в области очистки воды. Докт. дис-ция. — М.: ВодГЕО, 1953. — 273 с.
24. Аравин В.И., Нумеров С.М. Теория движения жидкостей и газов в недеформируемой пористой среде. — М.: Гос. изд-во “Техническая литература”, 1953. — 616 с.
25. Ломидзе Г.М. Фильтрация в трещиноватых породах. — М.: Госэнергоиздат, 1951. — 253 с.
26. Соболевский Ю.А. Водонасыщенные откосы и основания. — Мн.: Высшейш. шк., 1975. — 399 с.
27. Гатчек Э. Вязкость жидкостей /Пер. с англ. — М.-Л.: ОНТИ, 1935. — 156 с.
28. Марголин В.М. Исследование распространения раствора вокруг одиночных инъекторов при химическом закреплении грунтов: Дис-ция кандидата технич. наук. — М., 1969. — 182 с.
29. Горбунов Б.П., Марголин В.М. Расчет радиусов закрепления при

нагнетании крепителей в неводоносные грунты.//Основание, фундаменты и механика грунтов. № 3. — М.: 1967. с 22–24.

30. Бабаскин Ю.Г. Исследование способа укрепления песчаных грунтов инъектированием при строительстве автомобильных дорог. Дис-ция кандидата технич. наук: 05.23.14. — М.: СоюздорНИИ, 1982. — 194 с.

31. Леонтьев Н.Л. Техника статистических вычислений. — М.: Лесная промышленность, 1966. — 250 с.

32. Евгенийев И.Е. Яромко В.Н. Обработка результатов инженерно-геологических изысканий при проектировании дорожных переходов через болота. — Мн.: Польша, 1973. — 64 с.

33. Каранфилов Т.С. Определение величины радиуса закрепления грунтов при постоянном коэффициенте фильтрации.// Гидротехническое строительство № 1. — М.: Госэнергоиздат, 1951. — С. 39 — 42.

34. Указания по смолизации песчаных грунтов. — М.: Гос. изд-во лит. по стр-ву и архитектуре, 1963. — 32 с.

35. Методические рекомендации по борьбе с пучинами инъекцией закрепляющих растворов. — Мн., 1973. — 35 с.

36. Минин А.В. Состояние, проблемы и перспективы освоения новых технологий в области дорожного строительства.//Строительство и эксплуатация автомобильных дорог и мостов. Сб. науч. докладов. Мн., Белдорнии, 2001. С. 7–11.

37. Федоров А.Г., Франкевич И.Д. Методологические подходы и основные принципы разработки государственной программы “Дороги Беларуси” на период 1997–2005 годы.//70 лет Белорусской дорожной науке. Сб. науч. трудов, — Мн., 1998. — С. 193–204.

38. Babaskin Y.G., Kolivoska J. Sucasny stav a perspectiva rozvoja medzinarodnych ciest v Bieloruakej republike. Silnicni obzor № 8. — Praha, 1997. S. 252–256.

39. Волженский А.В. Минеральные вяжущие вещества. — М.: Стройиздат, 1986. — 464 с.

40. Ларионов З.М., Никитина Л.В., Гарашин В.Р. Фазовый состав, микроструктура и прочность цементного камня и бетона. — М.: Стройиздат, 1977. — 262 с.

41. Москвин В.М., Иванов Ф.М., Алексеев С.Н., Гузеев Е.А. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты. — М.: Стройиздат, 1980. — 535 с.

42. Бунин М.Т., Грушко И.М., Ильин А.Г. Структура и механические свойства дорожных цементных бетонов. — М.: Стройиздат, 1968. — 198 с.

43. Бабаскин Ю.Г. Системный анализ комплексной оценки состояния дорожных цементобетонных покрытий. // Вклад вузовской науки в развитие приоритетных направлений производственно-хозяйственной деятельности, разработку экономичных и экологически чистых технологий и прогрессивных методов обучения. Материалы МНТК. Часть 8. — Мн.: БГПА, 2000. — 109 с.
44. Инструкция по строительству цементобетонных покрытий автомобильных дорог. ВСН 139-80. Минтрансстрой СССР. — М.: ВПТИтрансстрой, 1980. — 106 с.
45. Инструкция по проектированию жестких дорожных одежд. ВСН 197-83. Минтрансстрой СССР. — М.: СоюздорНИИ, 1983. — 130 с.
46. Строительство цементобетонных оснований и покрытий автомобильных дорог. Пособие к СНиП 3.06.03-85. — Мн.: Мин-во архитектуры и строительства РБ, 1998. — 51 с.
47. Баженов Ю.М., Вознесенский В.А. Перспективы применения математических методов и технологии сборного железобетона. — М.: Стройиздат, 1974. — 192 с.
48. Корн Г., Корн Т., Справочник по математике для научных работников и инженеров. — М.: Наука, 1973. — 832 с.
49. Болтянский В.Г. Математические методы оптимального управления. — М.: Наука, 1969. — 175 с.
50. Медников И.А. Использование результатов натурных измерений прогибов дорожных покрытий для определения кривизны и напряжений в них и показателей жесткости основания. // Прочность и ресурс автомобильных и дорожных конструкций: Труды МАДИ. — М., 1986. — С. 77-84.
51. Медников И.А. Эквивалентные характеристики грунта для плит на упругом основании из конечного числа неоднородных слоев. // Основание, фундаменты и механика грунтов. № 2. — М., 1969.
52. Леонович И.И., Вурко Н.П., Шумчик К.Ф., Лашенко А.П. Эксплуатация автомобильных дорог и организация дорожного движения. — Мн.: Вышэйш. шк., 1988. — 348 с.
53. Сильянов В.В. Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организация движения. — М.: Транспорт, 1977. — 303 с.
54. Сильянов В.В. Транспортно-эксплуатационные качества автомобильных дорог. — М.: Транспорт, 1983. — 209 с.
55. Чудаков Е.А. Теория автомобиля. — М.: ГНТИ, 1950. — 318с.
56. Певзнер Я.М., Тихонов А.А. Исследование статических свойств

микропрофиля дороги и колебания автомобиля.//Автомобильная промышленность. № 10. — М., 1961. — с. 14–15.

57. Осорин В.И. Колебания машины при движении по дороге случайного профиля//Научно-технический бюллетень, № 7. — Л.: Ленинградский политехнический институт, 1960.— С. 27–128. .

58. Ротенберг Р.В. Подвеска автомобиля и его колебания. — М.: Машгиз, 1972. — 348 с.

59. Смирнов А.В. Динамика дорожных одежд автомобильных дорог. — Омск: Западно-сибирское книжное изд-во, Омское отделение, 1975. — 183 с.

60. Синельников Е.Д. Радиальная жесткость автомобильных шин.//Автомобильная промышленность, № 6. — М., 1959. — С. 8–10.

61. Жуков А.В., Леонович И.И. Колебания транспортных машин. — Мн.: Изд-во БГУ, 1973. — 239 с.

62. Ковалев Я.Н. Новое в строительном материаловедении.//Вклад вузовской науки в развитие приоритетных направлений производственно-хозяйственной деятельностью: Материалы МНТК. Ч. 8. — Мн.: БГПА, 2000. —С. 106.

63. Ковалев Я.Н., Кравченко С.Е. Теоретические предпосылки применения трибоэлектризованных дисперсных материалов в дорожных бетонах. /“Вклад вузовской науки в развитие приоритетных направлений производственно-хозяйственной деятельности: Материалы МНТК. Часть 8. — Мн.: БГПА, 2000. — С. 107.

64. Поляков В.Л. Определение эффективности режима нагнетания раствора при технической мелиорации грунтов. //Закрепление и уплотнение грунтов в строительстве: Материалы Всесоюзного совещания. — М.: Стройиздат, 1978. — С. 186–188.

65. СТБ 943-93. Грунты. Классификация. — Мн.: Мин-во архитектуры и строительства РБ, 1994. — 18 с.

66. Румшинский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. — М.: Наука, 1971. — 192 с.

67. Бабаскин Ю.Г. Исследование свойств дорожных бетонов и предложения по их модернизации.// Дорожное строительство и геотехника: Сб. докладов VI междунар. конф. — Кошица, 1997. — С. 69–72.

68. Полторжицкий А.З., Нестерович И.В. Диагностика и оценка качества состояния дорог республики. //70-летие Белорусской дорожной науке: Сб. науч. трудов. — Мн.: НПО Белавтодорпрогресс, 1998. — С. 205–214.

69. Федотов Г.А. Проектирование автомобильных дорог: Справочник инженера-дорожника. — М.: Транспорт, 1989. — 437 с.
70. Смолка Б.И. Расчет жестких одежд с монолитными слоями. // Информавтордор: Информац. сб. № 11. — М., 1996. — С. 11–30.
71. Пузыревский Н.П. Фундаменты. — Л.-М.: Госстройиздат, 1934. — 516 с.
72. Филоненко-Бородич М.М. Основы теории упругости. — М.-Л.: Госстройиздат, 1933. — 170 с.
73. Пастернак П.Л. Основы нового метода расчета фундаментов на упругом основании при помощи двух коэффициентов постели. — М.: Гос. изд-во лит. по стр-ву и архитектуре, 1954. — 218 с.
74. Власов В.З. Избранные труды: 3-х т. Т. 1. — М.: Изд-во АН СССР, 1962. — 528 с.
75. Филиппов А.П. Воздействие динамических нагрузок на элементы конструкций. — Киев: Наука и техника, 1974. — 176 с.
76. Коренев Б.Г. Вопросы расчета балок и плит на упругом основании. — М.: Гос изд-во лит. по стр-ву и архитектуре, 1954. — 232 с.
77. Коренев Б.Г., Черниговская Е.И. Расчет плит на упругом основании (Пособие для проектировщиков). — М.: Госстройиздат, 1962. — 355 с.
78. Бляхман Р.П. О колебаниях бесконечной пластинки, лежащей на упругом полупространстве, под действием движущейся нагрузки в условиях плоской задачи. Известия вузов, № 2. — М.: 1967. — С. 43–46.
79. Герсеванов Н.М., Польшин Д.Е. Теоретические основы механики грунтов и их практическое применение. — М.: Стройиздат, 1948. — 247 с.
80. Герсеванов Н.М. Основы динамики грунтовой массы. — М., 1937.—345 с.
81. Бабков В.Ф., Безрук В.М. Основы грунтоведения и механики грунтов. — М.: Высш. шк., 1986. — 239 с.
82. Горбунов-Посадов М.И., Маликова Т.А. Расчет конструкций на упругом основании. — М.: Стройиздат, 1973. — 627 с.
83. Симвулиди И.А. Расчет инженерных конструкций на упругом основании. — М.: Высш. шк., 1973. — 432 с.
84. Терцаги К., Пек Р. Механика грунтов в инженерной практике. — М.: Госстройиздат, 1958. — 607 с.
85. А.с.535391 СССР, МКИ Е 02 D3/12. Установка для укрепления грунта. /Леонович И.И., Вырко Н.П., Бабаскин Ю.Г. (СССР).— № 2077956/33; Заявлено 22.11.74; Опубл. 15.11.76, Бюл. № 42 // Открытия. Изобретения. — 1974. — № 42. — 43 с.

86. А.с. 613006 СССР, МКИ Е 02 D 3/12. Машина для укрепления грунта. / Леонович И.И., Вырко Н.П., Бабаскин Ю.Г. (СССР). — № 2416532/29-33; Заявлено 03.11.76; Оpubл. 30.06.78, Бюл. № 24 // Открытия. Изобретения. — 1976. — № 24. — 12 с.

87. А.с. 631591 СССР, МКИ Е 02 D 3/12. Установка для укрепления грунта. / Бабаскин Ю.Г., Леонович И.И., Мытько Л.Р. (СССР). — № 2471626/29-33; Заявлено 01.04.77; Оpubл. 05.11.78, Бюл. № 41 // Открытия. Изобретения. — 1978. — № 41. — 18 с.

88. А.с. 747929 СССР, МКИ Е 02 D 3/12. Машина для укрепления грунта. / Бабаскин Ю.Г., Леонович И.И., Мытько Л.Р. (СССР). — № 2575139/29-33; Заявлено 31.01.78; Оpubл. 15.07.80, Бюл. № 26 // Открытия. Изобретения. — 1980. — № 26. — 16 с.

89. А.с. 897943 СССР, МКИ Е 02 D3/12. Установка для укрепления грунта. / Бабаскин Ю.Г. (СССР). — № 2911940/29-33; Заявлено 15.04.80; Оpubл. 15.01.82, Бюл. № 2 // Открытия. Изобретения. — 1982. — № 2 — 26 с.

90. А.с. 1183608 СССР, МКИ Е 02 D3/12. Установка для укрепления грунта. / Бабаскин Ю.Г., Леонович И.И. (СССР). — № 3777986/29-33; Заявлено 06.08.84; Оpubл. 07.10.85, Бюл. № 37 // Открытия. Изобретения. — 1985. — № 37. — 37 с.

91. А.с. 1270214 СССР, МКИ Е 02 D3/12. Рабочий орган машины для упрочнения грунта. / Бабаскин Ю.Г., Леонович И.И. (СССР). — № 3818583/29-33; Заявлено 03.12.84; Оpubл. 15.11.84, Бюл. № 42 // Открытия. Изобретения. — 1984. — № 42. — 24 с.

92. А.с. 887722 СССР, МКИ Е 02 D 3/12. Машина для укрепления грунта. / Бабаскин Ю.Г., Леонович И.И. (СССР). — № 2901672/29-33; Заявлено 22.02.80; Оpubл. 07.12.81, Бюл. № 45 // Открытия. Изобретения. — 1981. № 45. — 36 с.

93. А.с. 1361233 СССР, МКИ Е 02 В 3/12. Устройство для предотвращения эрозии земляных сооружений. / Бабаскин Ю.Г., Леонович И.И., Шестаков И.А. (СССР) — № 4103043/29-15; Заявлено 19.05.86; Оpubл. 23.12.87, бюл № 47 // Открытия. Изобретения. — 1987. — № 47. — 22 с.

94. А.с. 1170043 СССР, МКИ Е 02 D3/12. Машина для укрепления грунта на откосах. / Бабаскин Ю.Г., Вырко Н.П., Леонович И.И., Цобкало В.Е. (СССР). — № 3322002/29-33; Заявлено 27.07.81. Оpubл. 30.07.85, Бюл. № 28 // Открытия. Изобретения. — 1985. № 28. — 27 с.

95. Сильянов В.В. Транспортно-эксплуатационные качества автомобильных дорог. — М.: Транспорт, 1983. — 209 с.

96. Сиденко В.М., Михович С.И. Эксплуатация автомобильных дорог. — М.: Транспорт, 1976.
97. Разработка методов повышения эффективности и качества работ по содержанию и ремонту автомобильных дорог. — Киев : КАДИ, 1980. — 45 с.
98. Методика комплексной оценки транспортно-эксплуатационного состояния автомобильных дорог. — М.: МАДИ, 1985. — 34 с.
99. Яромко В.Н. Руководство по комплексной оценке технико-эксплуатационного состояния автомобильных дорог и назначению ремонтных работ. — Мн.: НПО Дорстройтехника, 1992. — 38 с.
100. Яромко В.Н. Оценка прочности и остаточного ресурса дорожной одежды./ Диагностика эксплуатационного состояния автомобильных дорог, новые технологии их ремонта и содержания: Доклады МНТК. — Мн.: БГПА, 1998. С. 111–117.
101. Воробьев В.А. Применение физико-математических методов для исследования бетонов. — М.: Высш. шк., 1977. — 271 с.
102. Бабаскин Ю.Г. Исследование свойств дорожных бетонов и предложения по их модернизации. //Дорожное строительство и геотехника: Сб. докладов VI междунар. конф. — Кошица, 1997. — С. 69–72.
103. Любимова Т.Ю., Пинус Э.Р. Процессы кристаллизационного структурообразования в зоне контакта между заполнителем и вяжущим в цементном бетоне // Коллоидный журнал. Т. XXIV. — М.: АН СССР, 1962. — С. 578–580.
104. Смородинов М.И. Справочник по общестроительным работам. — М.: Стройиздат, 1974. — 372 с.
105. Бусел А.В. Инженерная экология дорожно-строительных материалов. — Мн.: Изд-во “Университетское”, 1997. — 190 с.
106. Леонович И.И., Бабаскин Ю.Г. Обеспечение безопасности при применении синтетического вяжущего материала в дорожном строительстве //Организация и безопасность дорожного движения (Вып. IV): Сб. статей. — Тбилиси: Изд-во “Сабчота Сакартвело”, 1986. с 14-16.
107. Рекомендации по газовой силикатизации песчаных и лессовых грунтов. —М.: Стройиздат, 1974. — 33 с.
108. Леонович И.И., Бабаскин Ю.Г. Физико-химические исследования по определению причин коррозии дорожных цементобетонных покрытий. Сб. докладов V Международной конференции по строительству. — Кошица, 1992. — С. 145–149.
109. Бабаскин Ю.Г. Свойства грунтов и их влияние на устойчивость инженерных сооружений. БГПА. Мн., 2000, — 73 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ И ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СПОСОБА ИНЪЕКТИРОВАНИЯ ПРИ УКРЕПЛЕНИИ ГРУНТОВ	7
Выводы по главе 1	12
2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ НАГНЕТАНИЯ ВЯЗКИХ РАСТВОРОВ В ПОРИСТУЮ СРЕДУ ГРУНТА	13
2. 1. Проницаемость грунта при ламинарной фильтрации жидкости	13
2. 2. Реологические особенности течения вязких жидкостей в пористой среде	18
2.3. Принципы инъектирования грунтов	20
2.4. Вывод уравнения для определения радиуса распространения раствора	25
Выводы по главе 2	31
3. ОЦЕНКА КАЧЕСТВЕННОГО СОСТОЯНИЯ ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ.....	34
3.1. Виды дефектов на автомобильных дорогах с бетонным покрытием	34
3.2. Формирование системы оценки дефекта	38
3.3. Характеристика структурной и функционально-структурной моделей дорожной бетонной конструкции	61
3.5. Качественная оценка дефекта покрытия	66
3.6. Характеристика системы, отражающей дорогу после ремонта	72
Выводы по главе 3	76
4. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НАГНЕТАНИЯ	78
4.1. Обоснование параметров, характеризующих технологию инъектирования	78
4.2. Исследование прочности закрепленного грунта	97
Выводы по главе 4	99

5. КОНСТРУКЦИЯ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ С ЖЕСТКИМ ПОКРЫТИЕМ И ОСНОВАНИЕМ, УСИЛЕННЫМ СПОСОБОМ ИНЪЕКТИРОВАНИЯ	101
5.1. Обоснование расчетной весовой нагрузки	101
5.2. Выбор схемы расчета цементобетонного покрытия с усиленным основанием в местах дефекта	102
5.3. Расчет упругих прогибов усиленных конструкций	106
5.4. Варианты усиления дорожных конструкций	113
Выводы по главе 5	118
6. РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ ИЗУЧЕНИЯ ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ ДЕФЕКТОВ	119
6.1. Определение физико-химических показателей бетона	122
6.1.1. Химический анализ	122
6.1.2. Термогравиметрический анализ	124
6.1.3. Рентгенофазовый анализ	127
6.1.4. Электронно-микроскопический анализ	129
6.1.5. Петрографический анализ	131
6.2. Анализ полученных результатов и обоснование причины разрушения цементобетона	134
Выводы по главе 6	139
7. ОБОРУДОВАНИЕ И РЕЦЕПТУРЫ, РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ДЛЯ СПОСОБА ИНЪЕКТИРОВАНИЯ	142
7.1. Оборудование для укрепления грунтов инъектированием	142
7.1.1. Оборудование для глубинного инъектирования	144
7.2. Конструкция дорожной инъекционной машины	145
7.2.1. Конструктивные особенности дорожной инъекционной машины	148
7.3. Машина для укрепления грунта на откосах	150
7.3.1. Способ укрепления откоса земляного полотна	151
7.3.2. Установка для укрепления грунта	152
7.4. Рецептуры закрепляющих растворов для инъектирования	154
7.5. Производство работ по инъектированию при ремонте цементобетонных покрытий	156
Выводы по главе 7	158
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	161
ЛИТЕРАТУРА	167

Научное издание

БАБАСКИН Юрий Георгиевич

**Укрепление грунтов инъектированием
при ремонте автомобильных дорог**

Ответственный за выпуск А. П. Аношко
Технический редактор Н.Д. Константинова
Редактор Н.Ф. Крицкая

Подписано в печать 22.10.2002.

Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 10,2. Уч.-изд. л. 8,9. Тираж 350 экз. Зак. 1229.

Издательство УП «Технопринт», ЛВ № 380 от 29.04.1999

Отпечатано на УП «Технопринт», ЛП № 203 от 26.01.1998

220027, Минск, пр-т Ф. Скорины, 65, корп. 14, оф. 215, тел. 231-86-93