

На правах рукописи

САФИНА ОЛЬГА МИХАЙЛОВНА

**Дорожные вибропрессованные бетонные
изделия с повышенными эксплуатационными
характеристиками**

05.23.05 – Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Уфа 2002

Работа выполнена в Уфимском государственном нефтяном техническом университете

Научный руководитель: **доктор технических наук,
профессор В.В. Бабков**

Официальные оппоненты: **доктор технических наук,
Л.Ф. Ямалтдинова**
**кандидат технических наук,
доцент Т.В. Латыпова**

Ведущая организация: **институт БашНИИстрой (г. Уфа)**

Защита состоится «___» июня 2002 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.289.02 в Уфимском государственном нефтяном техническом университете по адресу:

450062, г.Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан «___» мая 2002 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук



О.Л. Денисов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Одним из важнейших компонентов, влияющих на экологическую ситуацию в городе, является дорожное полотно. Широко применяемые асфальтобетонные дорожные покрытия являются далеко не идеальными с точки зрения загрязнения воздушного пространства и уровня шума от автомобильного транспорта. Переход на устройство дорожных покрытий с использованием мелкоштучных тротуарных изделий позволяет существенно сократить суммарный выброс в окружающую среду пылеватых частиц и токсичных веществ.

Преимущества мощения дорожного полотна бетонной плиткой заключаются в его ремонтпригодности, возможности получения архитектурного разнообразия, достигаемого с помощью использования широкой номенклатуры изделий по цвету и форме, экологическая чистота материала, наконец, за счет реализации достижений в технологии бетона последних десятилетий – в возможности получения бетонных изделий высокой долговечности.

Совершенствование технологии бетона в последние два десятилетия позволило, в основном за счет водоредуцирования бетонных смесей применением суперпластификаторов, достичь в практике строительства уровней прочности бетона на сжатие до 60-80 МПа и выше. Такого же порядка показателей по прочности в производстве мелкоштучных бетонных изделий с повышенными характеристиками по морозостойкости, водонепроницаемости, стойкости в агрессивных средах позволяет достигнуть технология вибрационного прессования, основанная на принудительном уплотнении бетонной смеси.

Однако надо отметить недостаточную изученность возможностей вибропрессовой технологии с точки зрения получения бетонов повышенной прочности и долговечности для дорожных изделий.

Другим направлением улучшения комплекса характеристик цементных бетонов является модифицирование их пористости пропиткой элементарной серой и полимерами. Существующая технология горячей пропитки серой реализуется при высоких температурах (140-150°С), что делает процесс энергоемким и нетехнологичным.

В данной работе предлагается метод модифицирования дорожных изделий новой пропиточной композицией на основе водорастворимой серы в условиях комнатной температуры. Способ модификации серы с переводом ее в водорастворимую форму разработан специалистами НИИ «Реактив» и УГНТУ (Р.С. Мусавилов, Ю.А. Сангалов, В.В. Зорин, И.А. Массалимов).

Существующие технологии производства дорожных изделий обеспечивают получение мелкоштучных элементов мощения со сроками эксплуатационной надежности, составляющими обычно 5-10 лет. Использование в производстве вибропрессованных бетонных дорожных изделий

оптимальных по гранулометрическому составу заполнителей бетонных смесей с последующей пропиткой изделий водорастворимой серой позволяет прогнозировать повышение их эксплуатационной надежности до 20-30 и более лет, что является экономически эффективным и актуальным.

Настоящая работа выполнена на кафедре «Строительные конструкции» Уфимского государственного нефтяного технического университета в соответствии с целевой комплексной программой ресурсо- и энергосбережения в строительном комплексе на 1996 – 2000 гг., программой «Стройнаука – 2000», программами научного сопровождения возведения объектов на период 1999-2002 гг., принятыми Кабинетом Министров и Министерством строительства, архитектуры и дорожного комплекса Республики Башкортостан.

Цель работы. Работа посвящена разработке эффективных технологических путей получения дорожных бетонных изделий высокой прочности, морозостойкости и долговечности, реализуемых вибропрессованием оптимизированных по гранулометрическому составу заполнителей бетонных смесей и модифицированием структуры бетона пропиткой водорастворимой серой.

Достижение поставленной цели предусматривает решение следующих задач:

1. Теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение возможности оптимизации технологии производства на оборудовании типа V3-12 Vibrapac фирмы «Besser» вибропрессованных бетонных дорожных изделий с прочностью на сжатие до 50-60 МПа, морозостойкостью до F 400-600, при водопоглощении 2-2,5% и расходе цемента не выше 260-280 кг/м³.
2. Исследование возможности улучшения физико-механических характеристик и повышения долговечности вибропрессованных бетонных дорожных изделий пропиткой водорастворимой серой.
3. Исследование свойств и долговечности дорожных бетонных изделий, получаемых вибропрессованием с последующей пропиткой водорастворимой серой.
4. Разработка и производственная апробация технологических режимов получения бетонных дорожных изделий высокой прочности и долговечности на предприятиях стройиндустрии Республики Башкортостан.
5. Разработка нормативной документации по реализации задачи производства высококачественных дорожных изделий.

Научная новизна

- Для условий вибропрессования разработаны принципы оптимизации гранулометрии заполнителей бетонных смесей, обеспечивающие получение бетонов высокой прочности, морозостойкости, с низким водопоглощением и расходом цемента.

- Предложены критерии технологичности процесса вибропрессования, увязывающие сочетание характеристик бетонных смесей (расход цемента, водоцементное отношение, гранулометрический состав заполнителей) с обеспечением нормальной формуемости и выпрессовки изделий.
- Исследованы механизмы и эффективность пропитки вибропрессованного бетона принципиально новой пропиточной композицией-гидрофобизатором – водорастворимой серой.

Практическое значение работы заключается в повышении долговечности вибропрессованных дорожных изделий, что позволяет за счет увеличения срока службы снизить эксплуатационные затраты, расширить область применения продукции в масштабах средней полосы и севера России.

Разработана расширенная номенклатура дорожных изделий, производимых по вибропрессовой технологии, вошедшая в нормативно-техническую документацию (ТУ 5746-115-02069450-99. Камни бортовые и плиты тротуарные бетонные вибропрессованные).

Реализация работы. В период с 1995 по 2001 гг. с использованием малоцементных среднезернистых бетонных смесей (расход цемента М400-500 в пределах 180-260 кг/м³) по технологии вибропрессования в СП «Берлек» ОАО БНЗС (г.Уфа), СП «Интерстройсервис» ОАО КПД (г.Уфа), ГП «Дорстройтрест» (г.Салават) произведено тротуарных изделий более 200 тыс. м² (марочная прочность на сжатие М300-М500, морозостойкость F300-500). Дорожные изделия повышенной прочности и долговечности были использованы для благоустройства территорий комплекса «Гостинный двор», Совмина РБ, мечети Ляйля-Тюльпан, магазина «Сезон», начальной школы №8 в г.Уфе, санатория Янган-Тау (Республика Башкортостан) и др.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на научно-технических конференциях УГНТУ (г.Уфа, 1996÷2001 гг.); Международной научно-технической конференции «Проблемы строительного комплекса России» (г.Уфа, 1998г.); научно-технических семинарах при Международной специализированной выставке «Строительство, архитектура, коммунальное хозяйство» (г.Уфа, 1997÷2001 гг.), где отдельные результаты работы были отмечены дипломами II степени; областной научно-технической конференции «Исследования в области архитектуры, строительства и охраны окружающей среды» (г.Самара, 1999г.); научно-практической конференции «Перспективные технологии и материалы в строительстве в XXI веке» при Международной выставке «Уралстрой-2000» (г.Уфа, 2000г.). Разработанная в соавторстве нормативно-техническая документация экспонировалась на международных специали-

зированных выставках «Уралстрой», «Строительство, архитектура, коммунальное хозяйство» (г. Уфа, 1999-2001 гг.) и была отмечена дипломами.

По результатам исследований опубликовано 12 статей и тезисов докладов, выпущены технические условия, получено положительное решение по заявке №201115466/20 (016225) «Способ обработки строительных материалов» (в соавторстве).

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка использованных источников, приложений. Работа изложена на 174 страницах машинописного текста, включает 4 приложения, содержит 36 иллюстраций и 38 таблиц. Список использованных источников включает 114 наименований.

На защиту выносятся:

- ◆ исследования по изучению влияния составов бетонных смесей и основных технологических параметров вибропрессования на свойства вибропрессованных бетонов;
- ◆ результаты исследований свойств вибропрессованных бетонов, модифицированных водорастворимой серой;
- ◆ технологические режимы пропитки водорастворимой серой бетонных вибропрессованных дорожных изделий;
- ◆ результаты опытно-промышленной апробации предлагаемых технических решений в производстве бетонных вибропрессованных дорожных изделий.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель исследований, дана краткая характеристика выполненной работы, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

В первом разделе дан обзор и сделан анализ опубликованных работ по вопросам производства и обеспечения долговечности бетонных дорожных изделий.

В настоящее время одним из средств, уменьшающих площади асфальтового покрытия дорог, а следовательно, позволяющих существенно сократить суммарный выброс в окружающую среду пылеватых частиц и токсичных веществ, является переход на устройство дорожных покрытий с использованием мелкоштучных бетонных дорожных изделий (брусчатка, тротуарная плитка и др.). Это предпочтительней с точки зрения экологии, эстетических позиций, удобства укладки, эксплуатации и ремонта.

Необходимо отметить, однако, что к долговечности дорожных изделий предъявляются повышенные требования. Бетон тротуарных плит работает в условиях совместного воздействия ряда факторов: замораживание и оттаивание в состоянии насыщения водой или солевым водным раство-

ром; химическая коррозия под влиянием минерализованной воды; кристаллизация в порах бетона солей при наличии свободных испаряющих поверхностей.

Существующие технологии производства дорожных изделий обеспечивают получение мелкоштучных элементов мощения с относительно невысокими сроками эксплуатационной надежности, что, по нашим наблюдениям, обуславливают следующие причины разрушения элементов тротуаров и потери ими декоративных качеств: формирование каверн на поверхности, вызываемых наличием меловых и глинистых включений в песке; отшелушивание декоративного поверхностного слоя, являющееся следствием недоуплотнения изделий, нарушения структуры поверхностного слоя при снятии отформованных и уплотненных изделий с вибрационного лотка; использование при очистке от ледовой корки тротуаров ледоколов и ледорубов в период зимней эксплуатации; недостаточность подготовки оснований перед укладкой плитки. Названные обстоятельства ставят задачу повышения качества дорожных изделий с увеличением эксплуатационной надежности в 2-3 раза.

Развитие дорожного строительства связано с совершенствованием технологий получения бетонных дорожных изделий. В последнее время в технологии бетонов успешно развиваются направления, основанные на принудительном уплотнении бетонных смесей в целях упрочнения структуры. В работах И.Н.Ахвердова, А.В.Волженского, Д.Рой, Г.Гоуды, Г.В.Мурашкина, Т.Б.Арбузовой и др. показана возможность получения материалов высокой прочности путем прессования жестких смесей с использованием заполнителей различной минералогической природы в широком интервале прессующих давлений. Одной из технологий, получившей определенное распространение, в частности, при производстве мелкоштучных бетонных изделий, является вибрационное прессование. Эта технология, используемая для прессования жестких бетонных смесей с пониженным водосодержанием, позволяет получать изделия достаточно высокой прочности. Однако малочисленность исследований по долговечности высокопрочных вибропрессованных цементных структур предопределяет необходимость постановки специальных исследований и поиска технологических путей, обеспечивающих получение бетонных дорожных изделий, сочетающих повышенную прочность и долговечность.

Новые возможности по улучшению комплекса физико-механических характеристик и повышению долговечности бетонных изделий открывает использование вибропрессовой технологии в сочетании с другими приемами модифицирования структуры цементного камня и бетона и, в частности, использованием пропиточных композиций.

Работами Ю.М.Баженова, В.В.Патуроева, А.Н.Волгушева, И.К.Касимова, Д.А.Угинчуса, Дж.Мэнсона, В.М.Мальхотры и др. показана эффективность пропитки цементных бетонов полимерами, мономерами, горячим расплавом серы, другими пропиточными составами при существ-

венном улучшении комплекса физико-механических характеристик и долговечности бетонов. Однако эти технологии достаточно трудоемки и дороги из-за высокой стоимости полимеров. Преимуществом нового вида пропиточной композиции – водорастворимой модификации серы, получаемой утилизацией многотоннажного отхода нефтегазопереработки – элементарной серы, накопления которой только в нефтеперерабатывающей отрасли Республики Башкортостан составляют 7,8 млн. т, является низкая стоимость композиции, простота технологии пропитки, осуществляемой при комнатной температуре и не требующей специального оборудования, низкая трудоемкость процесса.

В заключительной части раздела сформулированы цели и задачи исследований.

Второй раздел содержит описание характеристик исходных материалов и методов экспериментальных исследований.

Методы проведения экспериментов и исследований, используемые приборы и оборудование соответствовали действующим стандартам.

Получение и модифицирование структур вибропрессованных бетонных изделий введением тонкодисперсных минеральных наполнителей (ТМН) проводили на промышленных установках фирмы «Besser» V3-12 Vibroras в СП «Берлек» ОАО БНЗС (г.Уфа). Пропитку бетонных материалов и дорожных изделий водными растворами серы и определение их строительно-технологических свойств производили в лабораторных и производственных условиях.

В качестве исходных материалов при производстве вибропрессованных дорожных изделий, бетонов и растворов использовали портландцемент марок ПЦ 500-ДО, ПЦ 400-Д20, шлакопортландцемент ШПЦ 400, ШПЦ 300 производства Стерлитамакского ОАО «Сода» (г. Стерлитамак, РБ), удовлетворяющий требованиям ГОСТ 10178-85; среднезернистые заполнители – гравий, песок речной карьеров «Александровка», «Князево», «Чесноковка», «Чижев Яр» (г.Уфа), удовлетворяющие ГОСТ 8268-93, 8796-93; суперпластификатор С-3 (ТУ 6-14-625-80).

В качестве ТМН использовался крупнотоннажный минеральный отход переработки серного колчедана (пирита) в серную кислоту ОАО «Минудобрения» (г.Мелеуз) – пиритные огарки.

Измельчение пиритных огарков в лабораторных исследованиях осуществлялось с использованием барабанной шаровой мельницы типа МБЛ. Удельная поверхность сухих дисперсных материалов определялась методом пенетрации воздуха с помощью прибора ПСХ-2 и пневматического поверхностемера Т-3.

В качестве пропиточных составов использовались водные растворы серы различной концентрации, полученные в НИИ «Реактив» (г.Уфа). Схема получения водорастворимой формы серы включает следующие этапы: подготовка сырьевых компонентов (серы, реактивов); совместный по-

мол материалов; загрузка сухой смеси и требуемого количества воды в реактор; нагревание композиции и доведение до требуемой концентрации; фильтрация водного раствора серы; упаковка в тару. Характеристика препарата дана в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики водорастворимой серы

Наименование (обозначение) пропиточной композиции	Концентрация, %	Плотность, г/см ³	Значение pH	Примечания
Водный раствор серы на основе кальция (CaS) и натрия (NaS)	5-30	1,10-1,44	8-9	Цвет композиций - красно-оранжевый. Запах - характерный для серы, исчезающий при естественном осушении пропитанного образца. Срок хранения в закрытой таре без изменения свойств – 1 год

Используемые в исследованиях пиритные огарки и пропиточные композиции на основе водорастворимой модификации серы по санитарно-гигиеническим характеристикам можно применять без ограничений при производстве дорожных изделий.

Исследование поровой структуры материалов проводили методом ртутной порометрии на порозиметре "Carlo-Erba" (Италия).

Механические испытания экспериментальных образцов и дорожных изделий проводились на механическом прессе УП-8 ЛГУ и гидравлических прессах П-10, П-50, П-125 Армавирского ЗИМ.

Истираемость тротуарных вибропрессованных плит определялась в соответствии с ГОСТ 13087-91 на установке – круг истирания типа ЛКИ-2.

Ударную выносливость вибропрессованных цементных бетонов оценивали по удельной ударной вязкости, которую определяли испытанием образцов тротуарной плитки на вертикальном копре со свободно падающим грузом по нестандартной методике, разработанной на кафедре «Строительные конструкции» УГНТУ.

Третий раздел содержит материалы исследований по оптимизации технологии производства бетонных дорожных изделий применительно к условиям вибропрессования на оборудовании типа Viboras фирмы «Бессер».

Спецификой режима вибропрессования, реализуемого на названном оборудовании, является высокая скорость технологии, короткий цикл выработки изделий – 7-9 с, при часовой производительности порядка 2400 тротуарных изделий или около 50 м² изделий. Во временном балансе цикла выработки загрузка бетонной смеси, выпрессовка и другие вспомогательные операции занимают 5,5 – 7,5 с, а длительность приложения давления – 1,2-1,5 с.

Исследования, проведенные непосредственно на производственном вибропрессе, показали, что для полнотелых дорожных изделий с минимальным размером (толщиной) 60 мм оптимальным гранулометрическим составом заполнителей с максимальной крупностью до 20 мм является со-

четание фракций в следующем соотношении по массе: фракция 5-20 мм – 30-35%; 0,315-5 мм – около 55%; <0,315 мм – 10-15%; $M_{кр}=3,9\dots4,2$.

Данный грансостав соответствует минимальной пустотности насыпной смеси заполнителей, обеспечивает в условиях вибропрессования минимальную объемную концентрацию цементно-водной составляющей бетонной смеси и минимальный расход цемента при наилучших показателях формуемости смеси и прочности бетона в изделиях.

Рассчитаем объемно-пространственные характеристики четырехкомпонентной смеси, включающей цемент (c), воду (w), заполнители (in) и инертные тонкодисперсные наполнители (f), используя условие баланса объемов:

- относительный объем цементно-водной составляющей

$$\varphi_{cw} = \frac{\frac{1}{\gamma_c} + \frac{w}{\gamma_w}}{\frac{\alpha}{\gamma_{in}} + \frac{\alpha_1}{\gamma_f} + \frac{1}{\gamma_c} + \frac{w}{\gamma_w}}; \quad (1)$$

- весовой расход цемента

$$C = \frac{1}{\frac{\alpha}{\gamma_{in}} + \frac{\alpha_1}{\gamma_f} + \frac{1}{\gamma_c} + \frac{w}{\gamma_w}}, \quad (2)$$

где α - весовое соотношение расхода заполнителей и цемента; α_1 - соотношение весового расхода наполнителей и цемента в бетонной смеси; w - водоцементное отношение системы; γ_{in} , γ_f , γ_c , γ_w - плотности заполнителей, наполнителя, цемента и воды соответственно.

Основные объемно-пространственные характеристики твердеющего бетона для некоторой степени гидратации цемента θ при этом могут быть рассчитаны следующим образом:

- общая пористость системы

$$P_0 = \frac{w/c - \theta(\vartheta_0 - 1)}{\alpha/c_1 + \alpha_1/c_2 + w/c + 1}, \quad (3)$$

где $c = \gamma_w / \gamma_c$; $c_1 = \gamma_{in} / \gamma_c$; $c_2 = \gamma_f / \gamma_c$;

- плотность бетона в сухом состоянии

$$\gamma_s = \frac{1 + \theta \left(\frac{\gamma_g}{\gamma_c} \vartheta_0 - 1 \right) + \alpha + a_1}{\frac{\alpha}{\gamma_{in}} + \frac{a_1}{\gamma_f} + \frac{1}{\gamma_c} + \frac{w}{\gamma_w}}, \quad (4)$$

где ϑ_0 - коэффициент увеличения объема твердой фазы при гидратации вяжущего ($\approx 1,65$), γ_g - плотность гидратированного цемента (около $2,5 \text{ г/см}^3$).

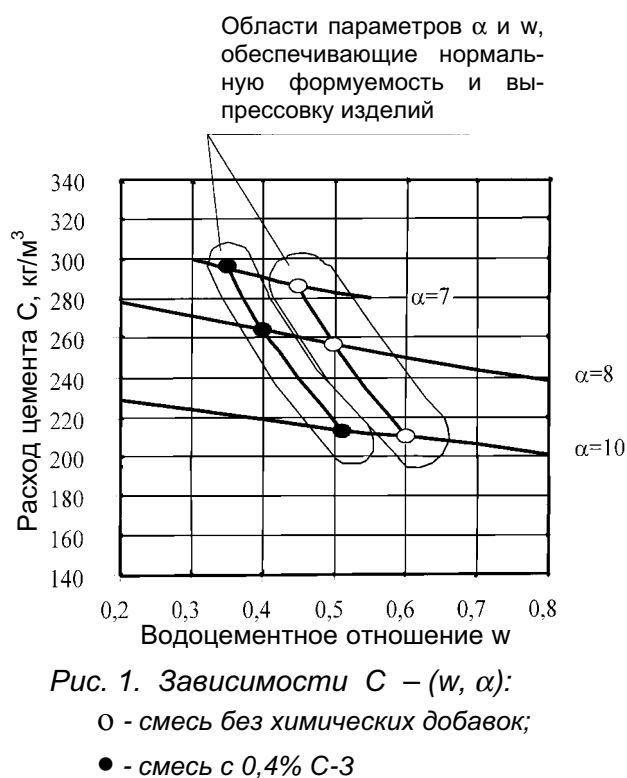
Эксперименты показали, что при оптимальном сочетании грансостава заполнителей и параметров вибропрессования в рассматриваемой технологии формируется бетон с практически контактной структурой заполнителей и полным заполнением межзернового пространства цементно-водной составляющей. Технология производства дорожных изделий наилучшим образом реализуется в диапазоне соотношений $\alpha = 7-10$ и $w \approx 0,45...0,6$ соответственно, что, согласно (1) и (2), соответствует меняющемуся в узком диапазоне значению $\varphi_{cw} \approx 0,19...0,22$ и расходам цемента от 200 до 280 кг/м³ (рис. 1).

Понижение $w < 0,45$ резко ухудшает условия формирования и качество сырца, ухудшает структуру вибропрессованного бетона, что негативно отражается на прочности изделий и ухудшает условия съема, выпрессовки изделий.

Для обеспечения формуемости, достижения контактной структуры и устойчивости структуры на стадии сырца цементно-водная составляющая должна обладать достаточно низкой вязкостью, что при ее относительно низкой объемной концентрации обеспечивается за счет сравнительно высокого водоцементного отношения. В связи с этим оказываются ограниченными возможности вибропрессованного бетона по прочности. Повысить расход цемента при снижении $w < 0,45$ в целях повышения прочности на сжатие выше 45-50 МПа не представляется возможным по условиям формуемости и съема изделий без введения суперпластификаторов. Использование суперпластификатора С-3 в количестве 0,4% от массы цемента позволило повысить прочность изделий на 20-30% и достичь прочности на сжатие 65 МПа (рис. 2).

Данные исследований показывают, что вибропрессовая технология при равном расходе цемента обеспечивает получение бетонов на 50-70% более высокой прочности, либо при равной прочности сокращение расхода цемента до 30-50% по сравнению с традиционными технологиями уплотнения (СНиП 5.01.23-83), что, с учетом высокой производительности технологии, делает ее весьма эффективной при производстве дорожных изделий.

Полученные для дорожной плитки рекомендации по оптимизации гранулометрического состава заполнителей бетонных смесей были ис-



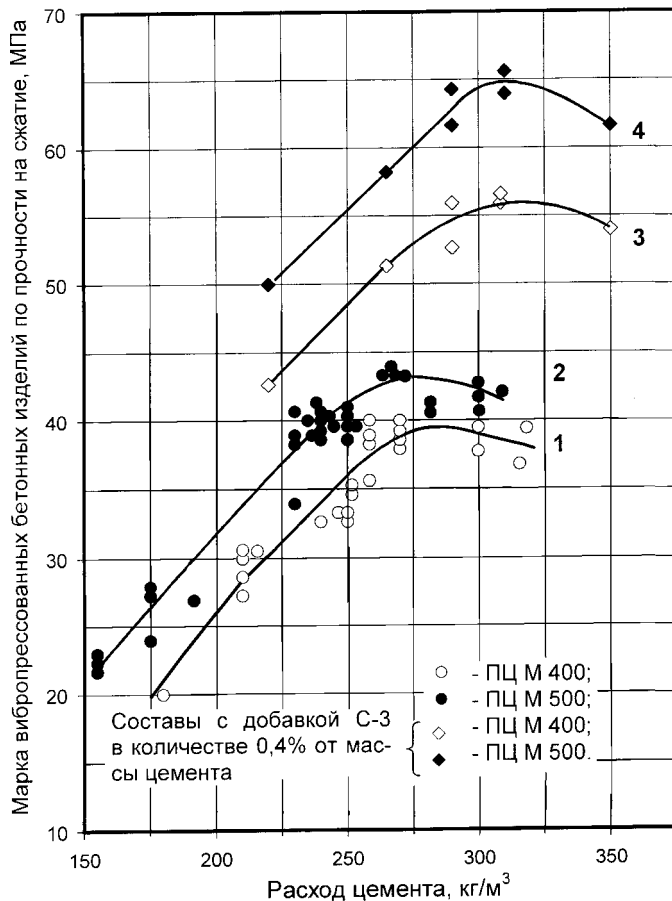


Рис. 2. Зависимости марочной прочности вибропрессованных бетонных изделий от расхода цемента для смесей с оптимальным гранулометрическим составом заполнителей (фр. 5 - 20 мм – 30...35%; 0,315 - 5 мм – 55...60%; <0,315 мм – 10...15%; $M_{кр}=3,9...4,2$)

пользованы также в производстве стеновых вибропрессованных бетонных изделий.

Вибропрессованные бетонные дорожные изделия на основе оптимальных по гранулометрическому составу бетонных смесей обладают низкой общей пористостью и низким водопоглощением (2,3 – 3% по ГОСТ 12730-78) при высокой морозостойкости до F400 – F500 ГОСТ 10060.2-95.

При вибропрессовании оптимальных по гранулометрическому составу заполнителей ($M_k \approx 4,1$) бетонных смесей изучалось влияние концентрации тонкодисперсных наполнителей в составе композиции на физико-механические характеристики дорожных изделий. Показано, что введение в бетонную смесь наполнителя в виде пиритного огарка с дисперсностью по удельной поверхности около $5000 \text{ см}^2/\text{г}$ в количестве до 10 - 15% от массы цемента при прочих равных

условиях позволяет повысить прочность изделий на 10 - 15%.

Технология вибропрессования позволяет получать изделия с более низкими показателями усадки, водопоглощения и более высокой морозостойкостью по сравнению с традиционными технологиями виброуплотнения при повышенной однородности продукции по прочности. Данные испытаний партий серийной продукции на линии в СП «Берлек» дали значения коэффициента вариации по прочности на сжатие для тротуарных бетонных плит (203x102x60 мм) от 0,06 до 0,09.

Четвёртый раздел посвящён вопросу модифицирования дорожных вибропрессованных бетонных изделий водорастворимой серой.

Опыт применения вибропрессованных дорожных изделий в условиях Башкортостана показал, что в связи с достаточно жесткими климатическими условиями для обеспечения длительной нормальной эксплуатации сборных дорожных покрытий необходима дополнительная их защита с це-

лью снижения водопоглощения и повышения морозостойкости. Этого позволяет достичь пропитка дорожных изделий водорастворимой серой.

При холодной пропитке водорастворимой серой вибропрессованного бетона с общей пористостью Π_0 раствор, проникая в поровое пространство цементного камня, обеспечивает после осушения частичную кольтматацию этого пространства закристаллизованной серой. Плотность водного раствора серы равна $\gamma_{ws} = \gamma_w(1 - \alpha_s) + \gamma_s \alpha_s$, где γ_w, γ_s - плотности воды и закристаллизованной серы; α_s - относительный объем закристаллизованной серы в поровом пространстве после осушения, рассчитываемый по формуле

$$\alpha_s = \frac{\gamma_{ws} - \gamma_w}{\gamma_s - \gamma_w} = \frac{\gamma_{ws}/\gamma_w - 1}{\gamma_s/\gamma_w - 1}. \quad (5)$$

Тогда общая пористость пропитанной и высушенной структуры с исходной пористостью Π_0 составит

$$\Pi_{0s} = \Pi_0 - \Pi_0 \frac{\gamma_{ws}/\gamma_w - 1}{\gamma_s/\gamma_w - 1} = \Pi_0 \frac{c_3 - c_4}{c_3 - 1}, \quad (6)$$

где $c_3 = \gamma_s / \gamma_w$, $c_4 = \gamma_{ws} / \gamma_w$.

Имея экспериментально полученный абсолютный привес образца, пропитанного водорастворимой серой, равный весу раствора серы в образце после пропитки M_s , и привес пропитанного образца в сухом состоянии, равный весу кольтматированной серы m_s , можно определить толщину слоя бетона, пропитанного водным раствором серы (глубину пропитки h). Абсолютное приращение объема раствора в образце после его пропитки составит M_s / γ_{ws} , а абсолютное приращение объема твердой фазы, соответствующее объему закристаллизованной серы после осушения образца, - m_s / γ_s . Абсолютный объем раствора равен объему пропитанного порового пространства

$$V_{ws} = \frac{m_s}{\gamma_s} + \frac{m_s}{\gamma_s} \cdot \frac{1 - \alpha_s}{\alpha_s} = \frac{m_s}{\gamma_s} \cdot \frac{\gamma_s/\gamma_w - 1}{\gamma_{ws}/\gamma_w - 1}. \quad (7)$$

Тогда $S \cdot h \cdot \Pi_0 = \frac{m_s}{\gamma_s} \cdot \frac{\gamma_s/\gamma_w - 1}{\gamma_{ws}/\gamma_w - 1}$, где S - поверхность образца, контактирующая с пропиточным раствором. Отсюда глубина пропитки h будет равна

$$h = \frac{m_s}{S \cdot \Pi_0 \cdot \gamma_s} \cdot \frac{c_3 - 1}{c_4 - 1}, \quad (8)$$

или

$$h = \frac{M_s}{S \cdot \Pi_0 \cdot \gamma_{ws}}. \quad (9)$$

Эксперименты по модифицированию пропиткой водорастворимой серой фильтрпрессованного цементного камня ($w=0,18$), виброформованного цементного камня с ($w=0,3$), цементно-песчаных растворов состава 1:3

($w=0,5$), тяжелого бетона (класс по прочности на сжатие В25) и вибропресованного бетона (В25 – В40) проводились на образцах: цилиндрах 2x2 см; кубах 2x2x2; 7,07x7,07x7,07; 10x10x10 см и дорожной плитке мощения (203x102x60 мм), твердевших в нормально-влажных условиях в течение 28 сут или в условиях ТВО. Предварительно высушенные образцы помещались в водный раствор серы плотностью 1,20 – 1,44 г/см³ и подвергались пропитке в течение 0,5 – 48 ч при $t = 20^\circ\text{C}$.

Как видно из рис. 3, активное поглощение раствора серы по механизму капиллярного подсоса малоформатными образцами цементных структур (цилиндры 2x2 см, кубы 2x2x2 см) происходит в течение первых 3-5 ч, затем процесс пропитки практически прекращается, что соответствует полному насыщению порового пространства раствором. Это обстоятельство подтвердилось сопоставлением объема поглощенного раствора согласно рис. 3 и рассчитанной по (3) общей пористости структур. Длительность пропитки цементных структур 2 - 5 ч была принята как приемлемая с точки зрения оборачиваемости пропиточных ванн и обеспечения глубины пропитки цементных структур 15-30 мм.

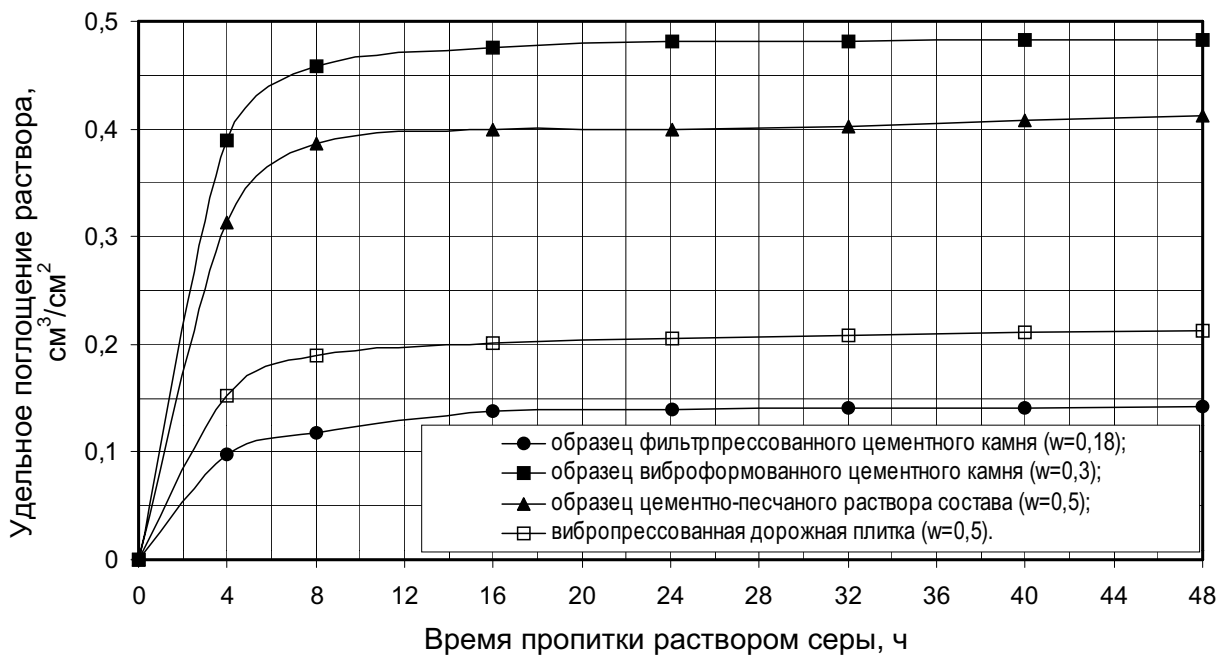


Рис. 3. Кинетика насыщения малоформатных образцов цементных структур раствором серы плотностью 1,24 г/см³ по механизму капиллярного подсоса

После осушения образцов (изделий) модифицированная сера закристаллизовывается и переходит в нерастворимую форму, стойкую к воздействию воды и вымыванию из порового пространства, что подтверждено испытаниями по многократному (до 10 раз и более) повторному осушению–замачиванию. Поверхность характеризуется высокими гидрофобными свойствами и углом смачивания 110-120°.

Анализ поровой структуры цементного камня методом ртутной порометрии показал, что сравнительно низкая вязкость пропиточного состава (2–5 сПз) позволяет модифицировать как капиллярные (радиусом $10^2 - 10^4$

нм), так и гелевые поры (радиусом 2–4 нм), снижая общую и улучшая дифференциальную пористость цементного камня.

Результаты по однократной пропитке полным погружением в раствор серы ($\gamma_{ws} = 1,24 \text{ г/см}^3$) вибропрессованной бетонной плитки мощения в течение 5 ч приведены в табл. 2.

Таблица 2

Показатели вибропрессованной бетонной плитки мощения (203x102x60 мм), модифицированной водорастворимой серой

Показатель	Изделия контрольные	Изделия, пропитанные раствором серы в течение 5 часов, глубина пропитки 20-25 мм
Прочность на сжатие по ГОСТ 17608-91, МПа	34,6	47,2
Упрочнение, %	-	36,4
Водопоглощение, % по массе	3,1	2,3
Снижение водопоглощения, %	-	28,2
Марка по морозостойкости по ГОСТ 10060.2-95	F400	F700 и более
Повышение марки по морозостойкости	-	1,7 раза
Истираемость, г/см ²	0,6	0,4
Снижение истираемости	-	1,5 раза

Для дорожных изделий, работающих в условиях циклического воздействия дождя, важным показателем, с точки зрения накопления влаги в объеме материала и ее последующей эвакуации по механизму осушения, является скорость водопоглощения во времени. С этой целью были проведены исследования по кинетике водопоглощения непропитанных и пропитанных раствором серы ($\gamma_{ws} = 1,32 \text{ г/см}^3$) полнотелых вибропрессованных

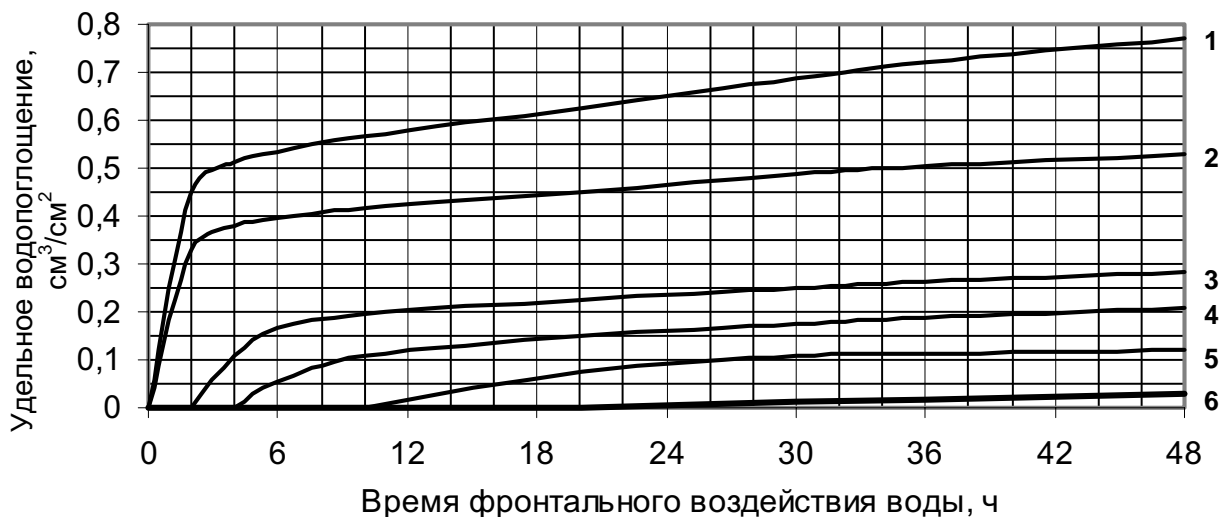


Рис. 4. Кинетика водопоглощения вибропрессованных бетонных плиток в зависимости от длительности пропитки водорастворимой серой способом полного погружения:

- 1 - непропитанный (контрольный) образец тяжелого бетона ($w=0,4$);
- 2 - непропитанный (контрольный) образец вибропрессованной бетонной плитки;
- 3 - пропитка вибропрессованной плитки в течение 2 ч полным погружением в раствор серы;
- 4 - то же в течение 5 ч;
- 5 - то же в течение 12 ч;
- 6 - то же в течение 48 ч

дорожных плит мощения (203x102x60 мм). Результаты испытаний по определению кинетики водопоглощения (методика наполненной водой стеклянной трубки, установленной на плоскую рабочую поверхность и герметизированной по периметру) в зависимости от режимов пропитки приведены на *рис. 4*.

В целом модифицирование водорастворимой серой обеспечивает снижение общей пористости, рост прочности бетонных дорожных изделий до 1,5 раза, снижение водопоглощения до 1,3 раза, повышение морозостойкости до 1,5 - 2 раз, повышение ударной выносливости бетона, что обуславливает повышение долговечности дорожных изделий.

Пятый раздел посвящён внедрению результатов исследований по оптимизации составов бетонных смесей и разработке технологических режимов модифицирования вибропрессованных дорожных изделий водорастворимой серой.

В разделе приведена краткая характеристика разработанных с участием автора для СП «Берлек» (г.Уфа) технических условий на вибропрессованные бетонные дорожные изделия (ТУ 5746-115-02069450-99), по которым в 2000-2001 гг. произведено дорожных изделий с высокими физико-механическими характеристиками в объеме свыше 20 тыс. м².

В период с декабря 1995 по сентябрь 2001 гг. на действующей технологической линии по производству вибропрессованных бетонных изделий V3-12 Vibrapac фирмы «Besser» в СП «Берлек» ОАО БНЗС автором велась работа по оптимизации гранулометрических составов заполнителей бетонных смесей. На первом этапе вибропрессованные дорожные изделия производились на заполнителях уфимских карьеров естественной гранулометрии. С 1996 по 1998 гг. проводилось внедрение в производство разделения естественной смеси заполнителей по некоторой границе с выделением крупной фракции выше этой границы и последующим использованием этой фракции для обогащения естественной смеси, что улучшало кривую рассеивания и повышало модуль крупности заполнителя. В 1999 - 2001 гг. для производства вибропрессованных дорожных изделий используются смеси с оптимальным соотношением крупной, средней и мелкой фракций заполнителя, что существенно улучшило всю совокупность характеристик производимых дорожных изделий (см. *табл. 3*).

На основании проведенных исследований разработаны и рекомендованы для производственного использования режимы пропитки бетонных вибропрессованных дорожных изделий водорастворимой серой полным погружением в ванну. Водные растворы серы могут быть использованы в качестве ремонтных составов также для модифицирования бетонных изделий в условиях строительной площадки.

Технология пропитки штучных дорожных изделий в заводских условиях предполагает их осушение при температуре 80 - 100°C, погружение изделий в раствор серы, пропитку, которую можно выполнять при нор-

Динамика изменения показателей бетонной вибропрессованной тротуарной плитки, произведенной в СП «Берлек» в период с 1995 по 2001 гг.

Год выпуска	Марочная прочность на сжатие, МПа	Водопоглощение по массе, %	Истираемость, г/см ²	Марка по морозостойкости (2 базовый метод)
1995	21 – 25	3,5 – 4,5	0,6 – 0,8	F200-250
1996	23 – 30	3,3 - 4,0	0,6 – 0,7	F250-300
1997	25 – 33	3,3 - 3,9	0,5 – 0,6	F350-400
1998	26 – 34	3,1 - 3,7	0,5 – 0,6	F350-400
1999	26 – 35	3,0 - 3,5	0,4 – 0,5	F350-400
2000	28 – 39	2,7 - 3,2	0,35 – 0,45	F400-450
2001	30 – 44	2,4 - 3,0	0,35 – 0,45	F400-450
Требования ГОСТ 17608-91 «Плиты бетонные тротуарные» - для тяжелого бетона - для мелкозернистого бетона	M300	не более 5% не более 6%	1,1 0,8	F200-F300

мальном давлении, в условиях вакуума в зависимости от требований к модифицируемым изделиям, естественное или принудительное осушение изделий. По данной технологии в производственных условиях на базе СП «Берлек» ОАО БНЗС были выпущены опытные партии объемом около 600 м² вибропрессованных тротуарных изделий с достижением марки по морозостойкости F500 и более, которые использованы при благоустройстве территории Дома Республики (Совмина РБ) в г. Уфе. Экономический эффект за счёт как минимум двукратного повышения долговечности дорожных изделий и снижения затрат на капитальный ремонт дорожного полотна составляет около 300 тыс. руб./ тыс. м² дорожного мощения за 20-летний цикл эксплуатации.

В разделе приведены результаты обследований состояния вибропрессованных бетонных дорожных изделий производства СП «Берлек», использованных для устройства отмотки при благоустройстве территорий ряда объектов в г. Уфе и Республике Башкортостан (рис. 5, 6), проведенных автором в 1999 – 2001 гг. Обследования показали, что состояние отмоток после 3 – 6 лет эксплуатации хорошее. Тротуарные плиты не получили за названное время значительных видимых повреждений, околы углов плит размером 10-20 мм из-за механических воздействий зафиксированы на отдельных изделиях, количество которых составило менее 0,2% от общей площади покрытия. Заметно лучшую по качеству поверхность имеют вибропрессованные бетонные плиты с тонкодисперсным наполнителем – пиритными огарками ОАО «Минудобрения», что позволяет прогнозировать их более высокую долговечность.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Предложены и внедрены в производство составы бетонных смесей, оптимальные по гранулометрическому составу заполнителей и эффективные по расходу цемента, условиям формовки и съема изделия-

сырца, обеспечивающие получение вибропрессованных дорожных изделий с прочностью на сжатие до 50-65 МПа, морозостойкостью F300-F500 и выше.

2. На основе проведенных исследований предложена технология пропитки водорастворимой серой вибропрессованных бетонных дорожных изделий, обеспечивающая улучшение характеристик изделий по прочности, морозостойкости и водопоглощению. Получены расчетные зависимости, описывающие взаимосвязь параметров структуры цементных бетонов, пропитанных водорастворимой серой. Предложенный расчетный аппарат, в сочетании с экспериментальными данными, позволяет рассчитать глубину пропитки и всю сумму параметров, характеризующих структуру пропитанного цементного камня и цементных бетонов.

3. Проведенные исследования по модифицированию водорастворимой серой вибропрессованных бетонных дорожных изделий показали, что пропитка обеспечивает снижение общей пористости цементного камня, рост прочности бетона при сжатии и растяжении до 1,5 раза, снижение водопоглощения на 20-40%, повышение морозостойкости до 1,5 – 2,5 раза (до F700), повышение ударной выносливости до 1,5-2 раз, снижение истираемости до 1,5 раза. Пропитка цементных бетонов водорастворимой серой обеспечивает высокую степень гидрофобности поверхности изделий, что важно как для дорожных, так и для стеновых изделий, используемых в облицовочных слоях наружных стен зданий.

4. Полученные на основе оптимизированных бетонных смесей дорожные изделия повышенной прочности и морозостойкости были использованы для благоустройства территорий комплекса «Гостиный двор», Дома Республики Башкортостан, мечети Ляйля-Тюльпан, начальной школы №8 в г.Уфе, территорий санатория Янган-Тау (Республика Башкортостан) и др.

5. На основе результатов исследований разработаны и внедрены в производство технические условия на изготовление вибропрессованной тротуарной плитки ТУ 5746-115-02069450-99 «Камни бортовые и плиты тротуарные бетонные вибропрессованные».

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Гайсин А.М., Чуйкин А.Е., Сафина О.М. и др. Оптимизация грансостава заполнителей в технологии производства вибропрессованных бетонных изделий // Материалы 48-й науч.-техн. конф. УГНТУ. Секция архитектурно-строительная. – Уфа, 1997. - С. 16.

2. Местные заполнители для производства бетонных изделий на оборудовании фирмы «Бессер» / В.В. Бабков, Г.С. Колесник, О.М. Сафина и др. // Бюллетень строительного комплекса Республики Башкортостан. – Уфа. - 1997. - № 1. - С. 35 - 40.
3. Проектирование составов бетонных смесей в технологии производства вибропрессованных бетонных изделий / В.В. Бабков, В.И. Парфенов, А.М. Гайсин, О.М. Сафина и др. // Материалы Международного научно-технического семинара при 3-й Международной специализированной выставке «Строительство, архитектура, коммунальное хозяйство – 97». – Уфа: УГНТУ, 1997. - С. 14-15.
4. Тротуарная бетонная плитка, производимая на вибропрессовом оборудовании / О.М. Сафина, Л.В. Кроткова // Проблемы строительного комплекса России: Материалы II Международной научно-технической конференции при IV Международной специализированной выставке «Строительство, архитектура, коммунальное хозяйство - 98». – Уфа, 1998. - С. 21-22.
5. Несущие наружные трёхслойные стены зданий с повышенной теплозащитой / В.В. Бабков, А.М. Гайсин, О.М. Сафина и др. // Строительные материалы. - 1998. - №6. - С.16-18.
6. Обоснование критериев пригодности заполнителей для производства изделий на оборудовании фирмы «Бессер» / В.В. Бабков, Г.С. Колесник, О.М. Сафина и др. // Строительные материалы ... Башкортостан: Сб. науч. ст. – Уфа: БашНИИстой, 1998. – С. 14-26.
7. Морозостойкость дорожных бетонных изделий, производимых на вибропрессовом оборудовании / О.М. Сафина, К.В. Старков, Л.В. Кроткова // Проблемы строительного комплекса России: Междунар. межвуз. сб. науч. тр. – Уфа: УГНТУ, 1998. - С. 11-12.
8. Сафина О.М., Старков К.В. Плитка мощения с повышенными строительными характеристиками // Исследования в области архитектуры ... среды: Тез. докл. областной 56-й науч.-техн. конф. (апрель 1999 г.). – Самара: СамГАСА, 1999. – С. 13.
9. Особенности структурообразования вибропрессованных бетонов / Р.Р. Гареев, О.М. Сафина, В.В. Бабков и др. // Материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. при IV Междунар. специализированной выставке «Строительство, архитектура, коммунальное хозяйство – 2000». – Уфа: УГНТУ, 2000. – Т. 1. - С. 24-25.
10. Эксплуатационные характеристики вибропрессованной бетонной плитки мощения / О.М. Сафина, А.Ю. Кашицин, Л.В. Кроткова // Материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. при IV Междунар. специализированной выставке «Строительство, архитектура, коммунальное хозяйство – 2000». – Уфа: УГНТУ, 2000. – Т. 1. - С. 23.
11. Чуйкин А.Е, Сафина О.М., Бабков В.В. Долговечность вибропрессованной тротуарной плитки, пропитанной модифицированной серой // Материалы 52-й науч.-техн. конф. УГНТУ. Секция архитектурно-строительная.

– Уфа, 2001. - С. 35.

12. Сафина О.М., Кроткова Л.В. Вопросы повышения эксплуатационных характеристик тротуарных бетонных изделий // Материалы V Международ. науч.-техн. конф. при V Международ. специализированной выставке «Строительство, архитектура, коммунальное хозяйство – 2001». – Уфа: УГНТУ, 2001. - С. 14-15.

13. Положительное решение по заявке №201115466/20 (016225) «Способ обработки строительных материалов» (в соавторстве).

14. ТУ 5746-115-02069450-99. Камни бортовые и плиты тротуарные бетонные вибропрессованные. – Уфа, 1999. – 26 с.

Соискатель

Сафина О.М.