

На правах рукописи

ДАВЛЕТШИН МАРАТ БУЛАТОВИЧ

**Модифицированные бетоны
повышенной ударной выносливости**

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
Вадим Васильевич Бабков**

Официальные оппоненты: **доктор технических наук, профессор
Валерий Петрович Попов**
**кандидат технических наук
Александр Петрович Далецкий**

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

Защита состоится « **20** » **декабря** 2002 г. в **15³⁰** 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 « ____ » ноября 2002 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук,
профессор

О.Л. Денисов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Многолетний опыт применения свайных фундаментов показал их высокую эффективность в промышленном и гражданском строительстве, предопределяемую по сравнению с другими типами фундаментов их более высокой надежностью и жесткостью, более низкой материалоемкостью, высокой индустриальностью производства, возможностью круглогодичного ведения работ, сокращением использования ручного труда в строительстве. Однако при всех названных достоинствах при использовании свайных фундаментов на основе забивных свай далеко не всегда удается обеспечить бездефектное погружение свай и избежать их потерь при забивке.

Одним из типичных дефектов, возникающих при забивке свай, в особенности в тяжелых грунтовых условиях, стало разрушение головы сваи, что вызывает необходимость производить срубку голов недобитых свай. По данным Уфимского НИИпромстроя при строительстве отдельных объектов объем срубки голов свай достигает 7-20% всего объема погружаемых свай.

Исследования ПГУПСа, НИИЖБа, БашНИИстроя (НИИпромстроя), Уфимского государственного нефтяного технического университета и ряда других организаций показали, что, наряду с дополнительным армированием головы сваи, эффективным способом повышения динамической стойкости свай и снижения их потерь при забивке является применение ударостойких бетонов.

Существует несколько очевидных технологических путей решения данной задачи, которые, однако, не всегда оптимальны по технико-экономическим показателям. Одним из путей является, например, повышение прочности бетона свай до уровня по классу бетона на сжатие В40-В80, и этот путь практикуется в ряде зарубежных стран. Он основан на использовании высокомарочных цементов, фракционированных заполнителей, суперпластификаторов. Другим направлением является использование при производстве свай дисперсноармированных (исследования Б.А. Крылова, И.А. Лобанова, Г.С. Родова, В.С. Стерина) и полимерцементных бетонов, обладающих высокой ударной выносливостью. Однако такие бетоны дороги, технология их производства не всегда совмещается со стандартной технологией массового производства сборного железобетона.

Перспективной является технология модифицирования структуры бетона введением в бетонную смесь маложестких пористых дисперсных компонентов (демпфирующих добавок), исследованию которой посвящены работы П.Г. Комохова, В.Н. Мохова, С.М. Капитонова, В.А. Якушина, И.Н. Некипелова и др. Такой прием позволяет в значительной степени оптимизировать структуру бетона, повысив его прочность на растяжение, трещиностойкость, ударную выносливость, морозостойкость, что дает возможность решать актуальную для строительной индустрии задачу по-

вышения качества забивных железобетонных свай, связанную с обеспечением их сохранности при забивке в грунтовое основание.

Обоснованию критериев оценки ударной выносливости цементных бетонов, углублению представлений о природе повышения ударной выносливости бетонов на основе демпфирующих компонентов и исследованию ударной стойкости бетонов на основе расширенной группы мало жестких дисперсных продуктов посвящена настоящая работа.

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 состоит в обосновании критериев ударной выносливости бетонов и изучении роли мало жестких дисперсных компонентов (добавок), обладающих демпфирующим действием и обуславливающих повышение ударной выносливости и прочности бетона на растяжение.

Достижение поставленной цели предусматривает решение следующих задач:

1. Отработать методику испытаний бетона на ударную выносливость.
2. Предложить и обосновать критерии оценки ударной выносливости бетона.
3. Углубить представления о сущности механизма демпфирования цементных бетонов при статическом и ударном нагружении.
4. Провести экспериментальные исследования прочности и ударостойкости цементных бетонов на плотных заполнителях с добавками различных демпфирующих компонентов.
5. Систематизировать и классифицировать материалы, обладающие демпфирующим действием.
6. Разработать и апробировать в производственных условиях составы бетонов повышенной ударной выносливости на основе демпфирующих компонентов.

Научная новизна

- Предложены критерии оценки ударной выносливости бетона, основанные на использовании соотношений параметров зависимости количества ударов до разрушения от относительного уровня динамического нагружения – коэффициента динамического упрочнения и коэффициента выносливости.
- Предложено обоснование механизма демпфирующего действия дисперсных мало жестких компонентов, обуславливающего повышение прочности на растяжение, трещиностойкости, ударной выносливости цемент-

ных бетонов.

- Исследована эффективность повышения ударной выносливости цементных бетонов введением демпфирующих компонентов различной природы и дисперсности.
- Предложена классификация демпфирующих компонентов по группам жесткости и по влиянию на прочность и ударную выносливость бетонов.

Практическое значение работы заключается в повышении качества и ударной стойкости забивных железобетонных свай, что обеспечивает возможность их бездефектного погружения, позволяет снизить затраты на устройство свайных фундаментов за счет снижения трудозатрат на срубку и усиление разрушенных свай, расширяет область эффективного применения забивных свай для строительных площадок с осложненными геологическими условиями.

Разработаны производственные составы бетонов повышенной ударной выносливости на основе демпфирующих компонентов в виде керамзита различной дисперсности, диспергированной резиновой крошки, полипропиленовой крошки.

Реализация работы. В период с 1999 по 2002 гг. с использованием бетонных смесей на основе демпфирующих компонентов в виде керамзита различной дисперсности и диспергированной резины в ОАО «Уфимский ЖБЗ №2» были выпущены три опытно-промышленные партии забивных железобетонных свай марок СВн 10.30т и СВн 8.30т общим объемом около 225 м³ на основе бетона класса по прочности на сжатие В25 (М300).

Забивку свай повышенной ударной выносливости выполняло ОАО «Элеваторспецстрой» (г. Уфа) на строительных площадках 14-этажного жилого дома №29 в микрорайоне «Сипайлово-2» Октябрьского района г.Уфы и жилого дома №1 в квартале №570 Кировского района г. Уфы.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на научно-технических конференциях УГНТУ (*г.Уфа, 1998÷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, 2000÷2002 гг.*), где отдельные результаты работы были отмечены дипломами; Международной научно-технической конференции «Надежность и долговечность строительных материалов и конструкций» (*г.Волгоград, 2000г.*); областной научно-технической конференции «Исследования в области архитектуры, строительства и охраны окружающей среды» (*г.Самара, 2001г.*); 9-ой Сибирской конференции по железобетону (*г.Новосибирск, 2002г.*).

По результатам исследований опубликовано 12 статей и тезисов докладов.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка использованных источников, приложений. Работа изложена на 149 страницах машинописного текста, включает 2 приложения, содержит 18 иллюстраций и 27 таблиц. Список использованных источников включает 150 наименований.

На защиту выносятся:

- ◆ критерии оценки ударной выносливости бетона по результатам испытаний образцов-кубов на вертикальном динамическом копре;
- ◆ результаты исследований по изучению влияния дисперсных маложестких демпфирующих добавок в составах цементных бетонов на их свойства и, в частности, прочность на сжатие и растяжение, ударную выносливость;
- ◆ результаты опытно-промышленной апробации предлагаемых технических решений в производстве забивных железобетонных свай.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, определена цель исследований, дана краткая характеристика выполненной работы.

В первом разделе дан обзор опубликованных работ отечественных и зарубежных исследователей по вопросам связи структуры со специфическими характеристиками бетона – трещиностойкостью, усталостной выносливостью, ударостойкостью. Этому направлению посвящены исследования Ю.М. Баженова, О.Я. Берга, В.С. Гладкова, И.М. Грушко, А.Е. Шейкина и ряда других ученых. Проанализированы работы, посвященные вопросам влияния дефектности структуры бетонов на их физико-механические свойства, связанные с усталостной выносливостью и трещиностойкостью. Авторами работ показано, что инициаторами трещинообразования в бетоне при одноосном сжатии являются микротрещины, дислоцированные на поверхности раздела “крупный заполнитель - песчано-цементный раствор” и в самом цементном камне. Причиной возникновения таких дефектов структуры считается наличие в цементном камне и контактных зонах цементной матрицы с заполнителями пор, пустот, начальных микротрещин термомеханической и усадочной природы. Большое влияние на величину усадки и внутрискруктурное напряженное состояние бетона оказывают заполнители, и, в частности, их упругие свойства и объемная концентрация. Бетоны на пористых заполнителях при относительно невысокой прочности на сжатие имеют более высокую трещиностойкость по сравнению с более прочными бетонами на плотных заполнителях.

Исследования Дж. Глюклиха, С. Шаха, Ф. Мак-Гарри, Ш. Поповича и др. авторов подтверждают способность отдельных элементов структуры бетона в виде зерен заполнителя, пор, пустот и других структурных дискретностей тормозить развитие трещин. О.В. Кунцевич, П.Г. Комохов,

В.В. Бабков и др. указывают на возможность создания искусственных дефектов, повышающих трещиностойкость хрупких пористых материалов, в том числе бетона, введением в их структуру мало жестких дисперсных компонентов.

Механизм действия демпфирующих добавок состоит в том, что на пути растущей трещины возникает энергетический «гаситель» в виде мало жесткого (низкомодульного) включения, которое не способно отдавать полученную энергию, затраченную на его деформирование. Тем самым уменьшается энергия роста трещины и релаксируют напряжения в ее вершине.

В работах отечественных и зарубежных исследователей, посвященных изучению влияния структуры бетона на его динамическую прочность, показано, что возможными способами модифицирования структуры бетона с целью повышения трещиностойкости, ударной стойкости и прочности являются улучшение сцепления заполнителя с цементным камнем за счет повышения чистоты и шероховатости поверхности плотных заполнителей, применение пористых заполнителей, оптимизация гранулометрического состава заполнителей.

Обобщая данные исследований по связи структуры и стойкости бетона при динамическом нагружении, можно выделить наиболее простой и технологичный способ оптимизации структуры, основанный на введении в бетонную смесь демпфирующих компонентов. Известные работы по этому направлению свидетельствуют о его эффективности и имеющихся резервах повышения ударной выносливости бетонов, что обуславливает необходимость в углублении представлений о природе эффекта демпфирования, в изучении роли основных параметров демпфирующих добавок – дисперсности, жесткости и объемной концентрации, в расширении номенклатуры мало жестких дисперсных продуктов, в том числе на основе отходов промышленности.

Второй раздел содержит обоснование механизма демпфирования бетона при введении в его состав мало жестких дисперсных компонентов типа керамзитового песка, резиновой крошки и т.п.

Механизм действия демпфирующего включения как энергетического «гасителя» обусловлен балансом между приращением упругой энергии разгрузки локального микрообъема материала в вершине трещины и высвобождающейся поверхностной энергии формирующихся поверхностей. Пока прирост упругой энергии разгрузки превышает приращение поверхностной энергии трещина, согласно принципу минимума энергии, будет спонтанно прогрессировать.

Включение пониженной жесткости на пути трещины снизит уровень напряжений в ее вершине приблизительно пропорционально соотношению модулей упругости фаз матрицы и демпфера E_1/E_2 , при этом уровень плотности упругой энергии понизится пропорционально квадрату модулей уп-

ругости $(E_1/E_2)^2$ за счет изменения напряжения и, с другой стороны, повысится пропорционально E_1/E_2 в связи со снижением модуля упругости твердой фазы до уровня E_2 . Общее снижение упругой энергии в вершине трещины с учетом этих изменений окажется пропорциональным соотношению E_1/E_2 .

В идеальном случае высокая деформативность и высокие упруго-вязкие свойства демпфирующей фазы при ее хорошем сцеплении с матрицей могут обусловить, кроме того, высокие показатели этой фазы по характеристике энергии разрушения γ_{Σ} , а совместное влияние названных последствий действия демпфера обусловит энергетическую невыгодность трещинообразования и его локализацию.

В предельном случае демпфером является включение с нулевой жесткостью, т. е. пора. Однако включение очень низкой жесткости, являясь выраженным концентратором напряжений, формирует собственное поле напряжений высокой интенсивности. Локальное повышение напряжений в окрестности низко модульного включения интенсифицирует процесс трещинообразования по механизму взаимодействия растущей трещины с областью концентрации напряжений.

Природа демпфирующего эффекта не ограничивается ролью демпфирующих включений как энергетических «гасителей» и регуляторов процесса трещинообразования. Важнейшая составляющая демпфирующего действия маложестких включений состоит также в их благоприятном влиянии на внутрискруктурное напряженное состояние, обусловленное действием усадки цементного камня и перепадами температур.

При назначении объемной концентрации демпфирующих компонентов следует исходить из решения задачи понижения внутрискруктурных напряжений и, прежде всего, снятия напряжений отрыва на границе с заполнителями. Эта задача на каждом структурном уровне бетона (растворной части, макроконгломерата) может решаться понижением объемной концентрации жестких заполнителей в пределах одного яруса заполнителей, что нецелесообразно ввиду перерасхода вяжущего. Другая схема – бетон с демпфирующими компонентами – состоит в равнообъемной замене части естественного плотного заполнителя маложесткими компонентами.

Таким образом, эффект демпфирования обусловлен снижением уровня собственных напряжений (усадочных, термомеханических) и их деструктурирующего влияния, а также поглощением энергии деформации и торможением процесса трещинообразования при нагружении, повышением упруго-вязких свойств бетона.

В разделе предложены критерии оценки ударной выносливости бетона, основанные на использовании характеристики удельной ударной вязкости и параметров динамического упрочнения и выносливости.

Простейшей характеристикой ударной выносливости бетона может служить количество ударов N одинаковой энергии, необходимых для разрушения некоторого эталонного образца (куба, призмы). Количество уда-

ров до разрушения в соответствии с усталостной природой разрушения в условиях многократных повторных воздействий будет связано с относительным уровнем динамических напряжений в бетоне σ_d/R в момент удара (здесь σ_d – нормальное сжимающее динамическое напряжение; R – статическая прочность бетона на сжатие) и увязывается с этой характеристикой, а также с коэффициентами динамического упрочнения κ_d и выносливости κ_r принятой при описании усталостной выносливости линейной зависимостью в полулогарифмических координатах

$$\sigma_d/R = \kappa_d - \kappa_r \lg N. \quad (1)$$

Очевидно, что повышение ударной выносливости бетона от некоторого уровня N до более высокого уровня $\eta_d N$ (здесь $\eta_d > 1$) возможно на основе приемов, оказывающих влияние на соотношение σ_d/R . Количественно это влияние можно учесть коэффициентом $\gamma < 1$

$$\gamma \sigma_d/R = \kappa_d - \kappa_r \lg (\eta_d N). \quad (2)$$

Решая совместно уравнения (1) и (2), будем иметь:

$$\gamma(\kappa_d - \kappa_r \lg N) = \kappa_d - \kappa_r \lg(\eta_d N),$$

и тогда степень относительного динамического упрочнения бетона η_d будет определяться зависимостью

$$\eta_d = N^{\gamma-1} \cdot 10^{\kappa_d/\kappa_r \cdot (1-\gamma)}. \quad (3)$$

Учитывая, что для понижения уровня напряжений σ_d/R с целью повышения η_d применительно к процессу забивки железобетонной сваи снижение энергии удара нежелательно из-за потерь производительности сваебойного оборудования, можно считать, что простейшим приемом повышения ударной стойкости будет повышение статической прочности бетона R .

Увеличению прочности бетона сопутствует повышение его модуля упругости и, в частности, динамического модуля упругости E_d , который оказывает влияние на величину динамического напряжения при нагружении свободно падающим грузом в соответствии с формулой М. Венюа

$$\sigma_d = K_k E_d h^{1/2}, \quad (4)$$

где K_k – константа, называемая коэффициентом копра, $m^{-1/2}$; h – высота свободного сбрасывания груза, м.

Тогда для названного выше приема динамического упрочнения значение коэффициента γ составит

$$\gamma = \gamma_b = \alpha_b^{-1} \beta_b, \quad (5)$$

где α_b и β_b – соответственно соотношения прочностей на сжатие и значений динамического модуля упругости более прочного бетона по отношению к исходному менее прочному ($\alpha_b, \beta_b > 1$).

Если допустить, что в пределах одного типа бетона уравнение (1) справедливо для достаточно широкого диапазона изменения прочности, т. е. что характеристики уравнения κ_d и κ_r не изменяются при переходе от бетона одного класса по прочности к другому, то степень динамического упрочнения бетона может быть рассчитана по формулам (3) и (5).

Другие варианты бетонов повышенной ударостойкости – это бетоны,

обладающие $\eta_d > 1$ при одинаковом уровне динамических напряжений σ_d/R со сравниваемым обычным бетоном за счет отличия значений коэффициентов κ_d и κ_r , что соответствует следующим комбинациям соотношений коэффициентов уравнения (1) κ_{d1} , κ_{r1} для исходного и κ_{d2} , κ_{r2} – нового бетона повышенной ударной выносливости:

$$\kappa_{r1} > \kappa_{r2}, \kappa_{d1} = \kappa_{d2}; \quad (6)$$

$$\kappa_{r1} = \kappa_{r2}, \kappa_{d1} < \kappa_{d2}; \quad (7)$$

$$\kappa_{r1} > \kappa_{r2}, \kappa_{d1} < \kappa_{d2}. \quad (8)$$

Как правило, это бетоны с принципиально иной структурой и, в частности, дисперсноармированные бетоны, полимербетоны, бетоны на основе демпфирующих добавок, обеспечивающие повышение ударной вязкости без увеличения статической прочности.

Записав по аналогии с (1) и (2) пары уравнений для исходного и более эффективного вариантов бетона, можно получить зависимости для определения степени динамического упрочнения соответственно для каждого из трех возможных сочетаний коэффициентов κ_d и κ_r .

Для случая (6) с учетом условия $\sigma_d/R = const$ будем иметь:

$$\sigma_d/R = \kappa_{d1} - \kappa_{r1} \lg N; \quad \sigma_d/R = \kappa_{d2} - \kappa_{r2} \lg(\eta_d N);$$

$$\kappa_{d1} - \kappa_{r1} \lg N = \kappa_{d2} - \kappa_{r2} \lg(\eta_d N); \quad \lg \eta_d = \lg N^{\kappa_{r1}/\kappa_{r2}-1}.$$

Для случая (7) по аналогии получим:

$$\kappa_{d1} - \kappa_{r1} \lg N = \kappa_{d2} - \kappa_{r1} \lg(\eta_d N); \quad \lg \eta_d = \frac{\kappa_{d2} - \kappa_{d1}}{\kappa_{r1}}.$$

Наконец, для случая (8):

$$\kappa_{d1} - \kappa_{r1} \lg N = \kappa_{d2} - \kappa_{r2} \lg(\eta_d N); \quad \lg \eta_d = \frac{\kappa_{d2} - \kappa_{d1}}{\kappa_{r1}} + \lg N^{\kappa_{r1}/\kappa_{r2}-1}.$$

Тогда степень динамического упрочнения бетона для каждого из трех рассматриваемых случаев составит соответственно

$$\eta_d = N^{(\kappa_{r1}/\kappa_{r2}-1)}; \quad (9)$$

$$\eta_d = 10^{\frac{\kappa_{d2}-\kappa_{d1}}{\kappa_{r1}}}; \quad (10)$$

$$\eta_d = 10^{\left\{ \frac{\kappa_{d2}-\kappa_{d1}}{\kappa_{r2}} + \lg N^{(\kappa_{r1}/\kappa_{r2}-1)} \right\}}. \quad (11)$$

Таким образом, полно и всеобъемлюще бетон по ударной выносливости характеризуют параметры уравнения (1) κ_d и κ_r . Значения комбинаций коэффициентов $\{\kappa_d, \kappa_r\}$ для двух бетонов позволяют с использованием зависимостей, (9), (10), (11) сравнить эти бетоны по ударной выносливости, оценить эффективность того или иного технологического приема с точки зрения повышения ударной выносливости.

Определенные трудности использования вышеназванных критериев связаны с потребностью в средствах динамической тензометрии для регистрации динамических деформаций-напряжений. В связи с этим на практике широкое распространение получили методы оценки ударной вынос-

ливости бетона по величине удельной ударной вязкости. Испытание бетона в этом случае выполняется на вертикальном динамическом копре и заключается в последовательном свободном сбрасывании груза определенной массы с принятой постоянной высоты до разрушения стандартного образца, обычно куба с ребром 7,07 или 10 см. Удельная ударная вязкость a (Дж/см³) определяется путем деления суммарной потенциальной энергии, затраченной на разрушение, на объем испытуемого образца

$$a = \frac{mgh}{V} \cdot N, \quad (12)$$

где m – масса свободно падающего груза, кг; $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения; h – высота падения груза, м; N – число ударов, выдерживаемых образцом до разрушения; V – объем образца, см³.

Такая техника испытаний при фиксированных параметрах m , h , V и одинаковых условиях на опорных площадках позволяет по характеристике a сравнивать бетоны по ударной выносливости.

Недостаток описанного метода состоит в том, что он не учитывает количественно уровня динамических напряжений σ_d/R , не отражает его изменения с изменением модуля упругости материала. Характеристика a существенно изменяется при изменении параметра испытаний h .

Третий раздел содержит описание вертикального динамического копра для испытаний бетона на удар, другие экспериментальные установки и методы испытаний, использованные в работе. В разделе приведены характеристики применяемых материалов.

Варианты копров, работающих в автоматическом режиме в диапазоне скоростей циклического нагружения, соответствующих стандартному копровому оборудованию для забивки свай, были разработаны Р.И. Бурангуловым в Уфимском БашНИИСтрое (для испытания кубов с ребром 7,07 см), В.Н. Моховым в Уфимском нефтяном институте (для испытаний кубов с ребром 7,07, 10 см). Экспериментальная часть исследований была выполнена на копре УНИ. Конструкция копра приведена на рис. 1.

Для образца-куба с ребром 7,07 см при массе свободно падающего груза 4,5 кг по данным выполненной нами тарировки значение постоянной копра составило $K_k = 2,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1/2}$.

В качестве исходных материалов при производстве опытных образцов бетонов использовали портландцемент марок ПЦ 500-ДО, ПЦ 400-Д20 производства Стерлитамакского ОАО «Сода» (г. Стерлитамак, Республика Башкортостан), удовлетворяющий требованиям ГОСТ 10178-85*; среднезернистые заполнители – щебень, гравий; песок речной карьера «Чесноковка» (г.Уфа), удовлетворяющие ГОСТ 8267-93*, 8736-93*.

В качестве демпфирующих компонентов использовались гравий керамзитовый фракции 5-10 мм Шакшинского завода керамзитового гравия; керамзитовый песок, полученный дроблением в щековой дробилке керамзитового гравия фракции 5-20 мм; гранулированный доменный шлак

Ашинского металлургического завода (г.Аша Челябинской обл.) и Белорецкого металлургического комбината (г.Белорецк, Республика Башкортостан); керамзитовая пыль - отход производства керамзитового гравия на Шакшинском заводе керамзитового гравия; резиновая крошка нескольких фракций, полученная на опытном производстве переработкой отработанных автомобильных шин в г. Уфе; полипропиленовая крошка – отход производства изделий из полипропилена в г.Туймазы (Республика Башкортостан).

Измельчение демпфирующих компонентов 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.

Механические испытания экспериментальных образцов проводились на гидравлических прессах П-50, П-125 Армавирского ЗИМ.

Четвёртый раздел содержит данные исследований физико-механических свойств цементных бетонов с демпфирующими компонентами различной природы и дисперсности.

В качестве исходного объекта исследований были приняты мелкозернистые бетоны, имеющие один уровень заполнителей – кварцевый песок.

Сырьем для получения поризованных песков являлся керамзит, практически без ограничения по характеристикам и качеству. При дроблении керамзитового гравия или щебня образуются гранулы с широким диапазоном пористости, прочности и жесткости, в зависимости от исходных характеристик керамзитового гравия и дисперсности получаемого песка. Готовыми маложесткими дисперсными продуктами являются керамзитовый песок, получаемый обжигом в кипящем слое, песок как попутный продукт производства гравия.

Исследования влияния равнообъемной замены части кварцевого песка керамзитовым четырех фракций (2,5 – 5 мм; 1,25 – 2,5 мм; 0,315 – 1,25 мм и < 0,315 мм) на комплекс физико-механических характеристик мелкозернистых бетонов были проведены на бетоне с исходным (базовым) составом 1:3 при В/Ц=0,4, что соответствует объемной концентрации мелкого заполнителя $\varphi_{мз}=0,62$. Керамзитовый песок был получен дроблением керамзитового гравия Шакшинского завода с насыпной плотностью 505 кг/м³ (плотность в «куске» $\gamma_k=0,84$ г/см³) и прочностью при сдавливании в цилиндре 2,6 МПа с последующим рассевом песчаной смеси по фракциям. Эксперименты проведены на равноконсистентных смесях, что обеспечивалось корректировкой расхода воды на водопоглощение керамзитового песка. Использовался кварцевый песок Чесноковского карьера (г. Уфа) с модулем крупности 2,76 и портландцемент ПЦ400 Стерлитамакского ОАО «Сода». На каждую точку были изготовлены образцы-кубы с ребром 7,07 см для испытаний на ударную выносливость и прочность на сжатие и образцы-балочки 4x4x16 см для испытаний на сжатие и растяжение при изгибе, а также призмы 10x10x40 см с целью определения начального моду-

ля упругости бетона с использованием средств тензометрии.

Результаты испытаний образцов, прошедших термовлажностную обработку (по режиму 4+3+8+3 ч при температуре изотермического прогрева 80-85°C), для составов при $\varphi_k/\Sigma\varphi_{мз} = 0; 0,2; 0,3; 0,4$ и $0,5$ (φ_k – объемная концентрация керамзитового песка, $\Sigma\varphi_{мз}$ – суммарная концентрация мелких заполнителей) по прочности на сжатие, растяжение при изгибе, ударной выносливости представлены на рис. 2. Удельная ударная вязкость a (Дж/см³) рассчитывалась для постоянной высоты сбрасывания груза на вертикальном динамическом копре $h = 0,7$ м.

Анализ полученных результатов показывает, что оптимальным для ударной стойкости и прочности является керамзитовый песок фракции 0,315 – 1,25 мм со средней плотностью гранул $\gamma_k = 1,2$ г/см³, что соответствует ориентировочно показателям керамзитовой фазы $E_k \approx 10^4$ МПа, $R_k \approx 15$ – 20 МПа. Модуль упругости этой фазы в 5–6 раз ниже модуля упругости кварцевого песка.

Прирост удельной ударной вязкости бетона на этом песке при его оптимальной относительной объемной концентрации $\varphi_k/\Sigma\varphi_{мз} \approx 0,3$ составил 1,9 раза, прочности на растяжение при изгибе – до 1,5 раз без потерь по прочности на сжатие. Близкие к названным показатели при небольших потерях по прочности на сжатие получены на смежной фракции керамзитового песка 1,25 – 2,5 мм, имеющей еще более низкую жесткость фазы по

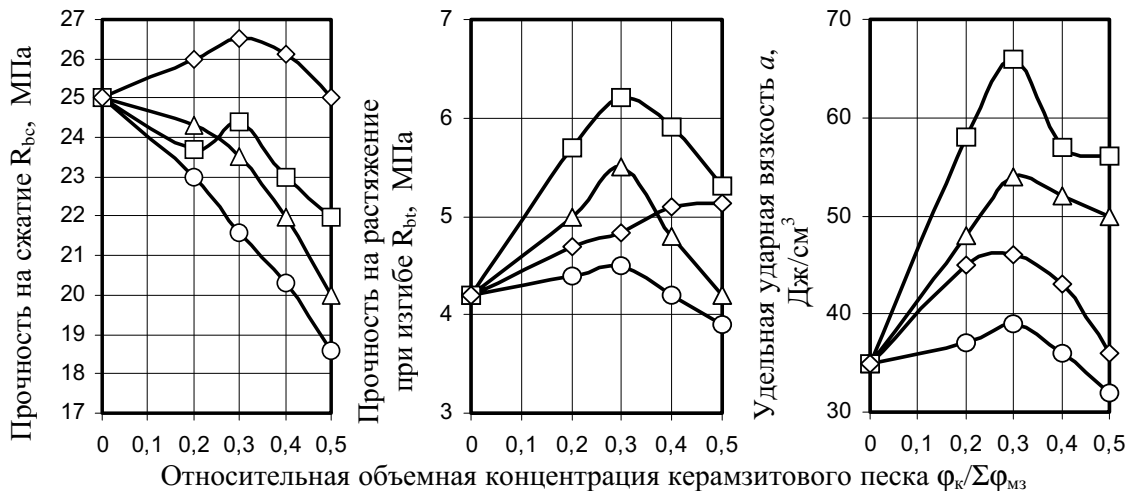


Рис. 2. Зависимости физико-механических характеристик мелкозернистых бетонов при замене части кварцевого песка керамзитовым различных фракций: ○ – фракция 2,5-5 мм; Δ – фракция 1,25-2,5 мм; □ – фракция 0,315-1,25 мм; * – менее 0,315 мм.

сравнению с фракцией 0,315 – 1,25 мм.

Удвоение удельной ударной вязкости получено на естественной смеси фракций 0–2,5 мм того же молотого керамзитового песка с гранулометрией, близкой заменяемому кварцевому. При одинаковой статической прочности на сжатие и растяжение при изгибе смесь фракций влияет на характеристику a количественно так же, как и лучшая монофракция 0,315–1,25 мм.

В других экспериментах в качестве демпфирующих компонентов с дисперсностью мелкого заполнителя в составах мелкозернистых бетонов исследовались доменные гранулированные шлаки Ашинского металлургического завода и Белорецкого металлургического комбината.

Анализ экспериментальных данных показывает, что введение пористых песков фракции 0 – 2,5 мм из керамзита, гранулированного доменного шлака обуславливает существенное повышение прочности на растяжение при изгибе и ударной стойкости. При этом положительное влияние пористых песков на основные физико-механические свойства раствора проявляется как при его твердении в нормальных условиях, так и в естественных условиях. Замена 1/4 – 1/3 объема кварцевого песка в растворе пористым песком такой же фракции позволяет при определенных потерях прочности на сжатие на 10 – 40% повысить прочность на растяжение при изгибе и в 1,5 – 2,5 раза – удельную ударную вязкость.

Как показали эксперименты, эффективными демпфирующими компонентами полимерной природы являются гранулированный полистирол и полипропиленовая крошка. Замена в мелкозернистой бетонной смеси бисерным полистиролом и полипропиленовой крошкой фракции 0,315-1,25 мм (невспененный суспензионный полистирол марки ПСБ, модуль упругости фазы $3,2 \cdot 10^3$ МПа; полипропилен, модуль упругости $1,3 \cdot 10^3$ МПа) 15 – 20% объема кварцевого песка обуславливает повышение ударной вязкости бетона в 2 – 3 раза без потерь статической прочности.

Анализ полученных экспериментальных данных в координатах $\sigma_d/R - \lg N$ показал, что для тяжелых мелкозернистых и среднезернистых бетонов, твердевших в естественных условиях и в условиях ТВО (табл. 1), в пределах достаточно широкого диапазона изменения статической прочности бетона 22,8...47,6 МПа (по прочности на сжатие кубов 7,07x7,07x7,07 см) характеристики уравнения (1) $k_d \approx 1,71$ и $k_r \approx 0,24$ остаются стабильными при изменении прочности бетона и соответствуют зависимости 1 на рис. 3. Расчет динамических напряжений в этих экспериментах, проведенных на вертикальном динамическом копре УНИ со свободно падающим грузом постоянной массы, выполнялся по формуле (4), при этом динамический модуль упругости E_d рассчитывался умножением начального статического модуля на повышающий коэффициент 1,2.

Таблица 1 - Результаты испытаний на ударную выносливость среднезернистых бетонов на гранитном щебне фракции 5-10 мм. Твердение в условиях ТВО

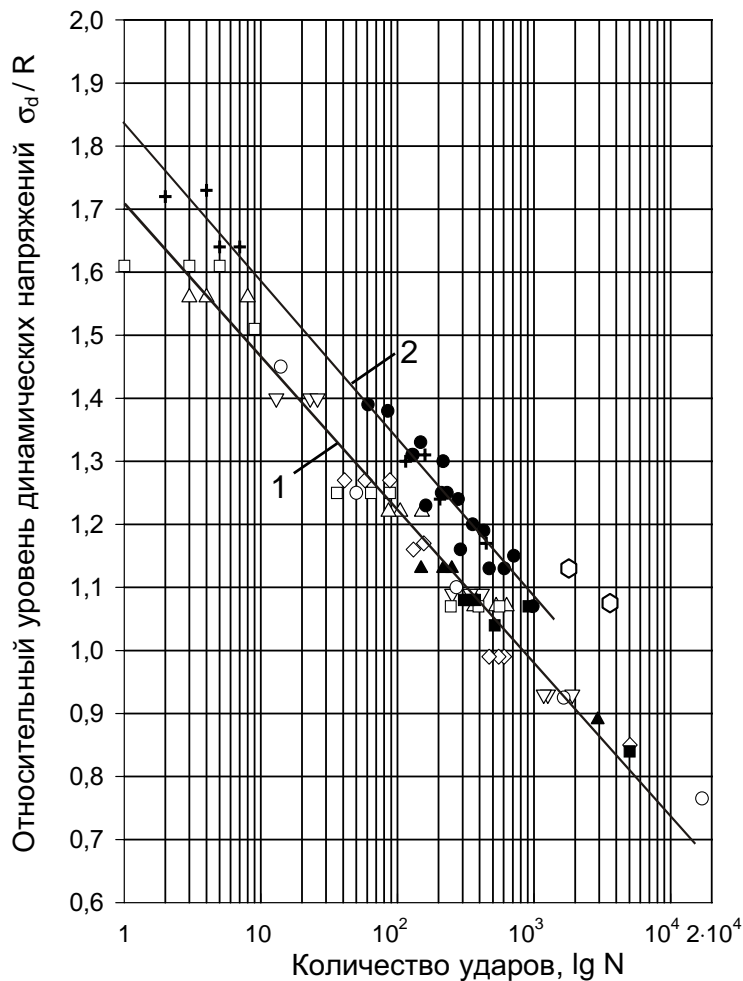
№ состава	Прочность при сжатии $R_{7,07}$, МПа	Модуль упругости $E_b \cdot 10^{-3}$, МПа	Высота сбрасывания груза h , м	Динамическое напряжение σ_d , МПа	Отношение σ_d / R_b	Среднее количество ударов до разрушения образца
1	22,8	19,8	0,35	23,8	1,07	528
			0,45	27,8	1,22	105
			0,80	35,7	1,56	6

2	30,5	23,7	0,35	28,4	0,93	1662
			0,45	33,2	1,09	342
			0,80	43,7	1,40	23
3	47,6	30,0	0,45	42,9	0,89	2926
			0,80	54,0	1,13	226

При анализе полученных результатов в координатах $\sigma_d/R - \lg N$ бетоны на основе демпфирующих компонентов, вводимых взамен части мелких жестких заполнителей, соответствует зависимости 2 на рис. 3 при параметрах прямой в полулогарифмических координатах $k_d \approx 1,82$ и $k_r \approx 0,24$. Относительное динамическое упрочнение при этом соответствует случаю $k_{r1} = k_{r2}$, $k_{d1} < k_{d2}$ и описывается зависимостью (10), что при названных выше значениях параметров k_d и k_r дает $\eta_d \approx 2,9$.

Анализ результатов при расчете относительного уровня напряжений σ_d/R выполнен с учетом изменения при введении низко модульного заполнителя статической прочности на сжатие и модуля упругости бетона.

На рис. 3 приведены также данные исследований по фибробетонам, армированным стальной фиброй, (диаметр 0,4 мм, длина 25-30 мм), полученные на этом же копре А.В. Парфеновым. Дисперсное армирование при оптимальной объемной концентрации фибры (проценте армирования) 1,5% обеспечивает примерно 9-10 кратное повышение ударной выносливости бетона и является наиболее эффективным приемом ударного упрочнения бетона.



▣ - данные М. Венюа по тяжелым бетонам на крупнозернистых заполнителях; Δ ∇ $*$ - данные автора по среднезернистым бетонам с кубиковой прочностью (кубы $7,07 \times 7,07 \times 7,07$ см) 22,8 – 47,6 МПа, твердевшим в условиях ТВО; \odot \diamond \square - то же, по мелкозернистым бетонам группы А по СНиП 2.03.01-84 с кубиковой прочностью 16,2 – 35,4 МПа, твердевшим в условиях ТВО; $+$ - то же, среднезернистым бетонам с введением диспергированной резины с кубиковой прочностью 22,8 – 30,3 МПа, твердевшим в естественных условиях; \square - то же, мелкозернистых бетонов с кубиковой прочностью 18,2 – 25 МПа при замене части кварцевого песка керамзитовым; \circ - данные А.В. Парфенова по фибробетону, армированному стальной фиброй (1,5% по объему); 1 – бетоны на плотных заполнителях; 2 – то же, с введением демпфирующих компонентов.

Рис. 3. Результаты экспериментов по исследованию ударной выносливости бетонов различных составов в координатах $\sigma_d/R - \lg N$.

Проведенные нами эксперименты на кубках с ребром 7,07 см показали, что замораживание при $T = -18 \dots -25^\circ\text{C}$ мелкозернистых бетонов естественной влажности повышает прочность на сжатие более чем на 20%, а ударная вязкость при этом возрастает примерно в 3 раза. Увлажнение образцов замачиванием до полного водонасыщения и последующее замораживание при той же температуре $T = -20 \dots -25^\circ\text{C}$ еще более упрочняет бетон на сжатие, но не увеличивает его ударостойкости по сравнению с замороженным бетоном естественной влажности.

Сравнительно маложесткая фаза – лед, имеющий модуль упругости около $5 \cdot 10^3$ МПа и прочность на растяжение до 4 МПа, является хорошим демпфером, обуславливающим высокие показатели бетона по ударной стойкости. Зимнее время, таким образом, является благоприятным периодом для производства работ по забивке железобетонных свай с точки зрения обеспечения их ударостойкости. В зимний период при устойчивой

минусовой температуре ниже -15°C случаи разбивки свай резко снижают-

ся.

На основании обобщения данных исследований предложена классификация демпфирующих компонентов с дисперсностью мелких заполнителей по группам жесткости и по их влиянию на основные физико-механические характеристики бетонов (табл. 2). В табл. 2 применительно к трем группам жесткости систематизированы также основные виды сырья, пригодного для производства демпфирующих компонентов с целью повышения ударной выносливости и прочности на растяжение цементных бетонов.

Таблица 2 - Классификация демпфирующих компонентов с дисперсностью мелких заполнителей по группам жесткости и систематизация видов сырья для их производства

Характеристики бетона	Группы демпфирующих компонентов по степени жесткости		
	А – компоненты повышенной жесткости с модулем упругости $(1,0 - 1,8) \cdot 10^4$ МПа	Б – компоненты умеренной жесткости с модулем упругости $(0,1 - 1,0) \cdot 10^4$ МПа	В – компоненты низкой жесткости с модулем упругости $10^2 - 10^3$ МПа
Статическая прочность:			
- на сжатие;	+	0(-)	-
- на растяжение.	+	+	0(-)
Ударная выносливость	+	+	+

Примечания: 1. Эффекты: положительный (+), отрицательный (-), нейтральный (0).

2. В группы А, Б и В входят:

в группу А:

- керамзитовый песок, получаемый дроблением керамзитового гравия марок по насыпной плотности 600-900 по ГОСТ 9758-86;
- песок, получаемый дроблением отвальных и гранулированных доменных шлаков;
- песок, получаемый дроблением природных поризованных пород вулканического происхождения (туфы, вулканические шлаки, литоидная пемза) и осадочного происхождения (пористые известняки, опока, трепел) с пористостью не более 35 – 40%.

в группу Б:

- керамзитовый песок, получаемый дроблением керамзитового гравия марок по насыпной плотности 400–600 кг/м³ по ГОСТ 9758-86;
- перлитовый песок;
- песок, получаемый дроблением аглопорита;
- пески, получаемые дроблением природных поризованных пород с пористостью 40 – 80%;
- гранулированный полистирол, полипропиленовая крошка;
- замороженная капиллярная влага.

в группу В:

- диспергированная резина;
- пенополистирол.

Пятый раздел содержит сведения по опытно-промышленному внедрению забивных железобетонных свай на основе бетонов повышенной ударной выносливости.

В рамках промышленного эксперимента были отработаны несколько составов тяжелых бетонов с демпфирующими компонентами в виде керамзита различной дисперсности и диспергированной резины. По одной схеме в качестве демпфирующих компонентов использовали комбинацию тонкодисперсного и обычного керамзитовых песков, по другой – комбинацию песка фракции 0-5 мм и гравия фракции 5-10 мм. Третья схема предусматривала использование резиновой крошки фракции <0,63 мм.

На Уфимском ЖБЗ №2 треста Башстройконструкция (г. Уфа) были выпущены три опытно-промышленные партии забивных железобетонных свай общим объемом около 225 м³ бетона.

Первая опытно-промышленная партия состояла из 63 экспериментальных свай типа СВн 10.30т, произведенных из бетона М300 (класс по прочности на сжатие В25), и 60 аналогичных контрольных. Вторая опытно-промышленная партия состояла из 60 экспериментальных свай типа СВн 10.30т и 66 аналогичных контрольных из бетона М300 (класс В25).

Забивку первой и второй партий выполняли на строительной площадке 14-этажного жилого дома №29 в микрорайоне «Сипайлово-2» Октябрьского района г.Уфы копром СП-67, оборудованным штанговым дизель-молотом марки С-330 (масса ударной части 4 т, высота падения молота 2 м, частота падения молота при забивке свай – 60 ударов в минуту).

Сваи, изготовленные из бетона с демпфирующими компонентами в виде комбинации обычного и тонкодисперсного керамзитовых песков, керамзитового песка и гравия, были погружены до проектной отметки или показали расчетный отказ без существенных повреждений, тогда как 5% свай из обычного тяжелого бетона разрушились, 30% имели значительные продольные трещины и околы бетона в голове.

Третья опытно-промышленная партия состояла из 20 экспериментальных свай марки СВн 8.30т и 20 аналогичных контрольных, представляющих собой верхние части составных 18-метровых свай, произведенных из бетона М300 (В25).

Сравнительную забивку экспериментальных и контрольных свай проводили на стройплощадке жилого дома №1 в квартале №570 Кировского района г. Уфы. В качестве навесного оборудования к копру СП-49В использовали штанговый дизельный молот С-330 с массой ударной части 4 т. На данной площадке все экспериментальные сваи были погружены до проектной отметки, из них 85% свай не имели существенных повреждений. В то же время только 43% контрольных свай не имели повреждений, у 30% свай головы были полностью разрушены и 17% не были забиты до проектной отметки из-за преждевременного разрушения ствола свай или ее головы.

При забивке свай из бетона повышенной ударной стойкости экономическая эффективность и снижение трудозатрат достигается за счет бездефектного погружения свай, снижения трудозатрат на срубку и усиление разрушенных свай. Ожидаемый экономический эффект при этом составляет около 240 тыс. руб. на тыс. м³ бетона железобетонных забивных свай.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Предложено обоснование природы демпфирующего действия дисперсных маложестких компонентов на механизм разрушения и комплекс физико-механических характеристик бетона. Установлено, что эффект демпфирования обусловлен снижением уровня собственных напряжений

(усадочных, термомеханических) и их деструктирующего влияния, а также поглощением энергии деформации и торможением процесса трещинообразования при нагружении, повышением упруговязких свойств бетона.

2. Отработана методика ударных испытаний бетона на вертикальном динамическом копре со свободно падающим грузом. Для стандартных образцов бетона конкретной конфигурации и объема применительно к данному копру при конкретной массе сбрасываемого груза связь между значениями динамического напряжения, динамического модуля упругости и высотой свободного падения груза определяется константой – коэффициентом копра. Определение динамических напряжений в сечении испытуемого стандартного образца бетона возможно расчетом по формуле М. Венюа с использованием значения коэффициента копра без дополнительного применения средств динамической тензометрии.

3. Ударная выносливость бетона, оцениваемая по результатам испытаний образцов-кубов бетона на вертикальном динамическом копре, может быть охарактеризована удельной ударной вязкостью, рассчитываемой делением затраченной на разрушение суммарной потенциальной энергии свободно падающего груза на объем образца.

4. Предложен и апробирован ряд оптимальных применительно к ударной выносливости бетона маложестких материалов, которые при введении в бетонную смесь в виде компонентов (добавок) различной дисперсности проявляют демпфирующую способность. Показано, что универсальным сырьем для получения демпфирующих компонентов с дисперсностью естественных песков является керамзит, практически без ограничения по характеристикам и качеству. На основе керамзитовых песков различной дисперсности и характеристик, а также диспергированной резины получены бетоны 2 – 3-кратной ударной выносливости по сравнению с исходным вариантом мелкозернистых и обычных по гранулометрии заполнителей тяжелых бетонов. Такого же порядка динамическое упрочнение наблюдается при замораживании бетона ниже температуры -15°C , что объясняется работой льда как дисперсно распределенной демпфирующей фазы с модулем упругости около $5 \cdot 10^3$ МПа.

5. Анализ ударной выносливости бетонов по линейным зависимостям относительного уровня динамических напряжений от количества ударов до разрушения в полулогарифмических координатах, характеризуемым количественно коэффициентами динамического упрочнения k_d и выносливости k_r , показал, что ударная выносливость тяжелых мелкозернистых и крупнозернистых бетонов в координатах $\sigma_d/R_b - \lg N$ описывается единой зависимостью со значениями констант $k_d \approx 1,82$ и $k_r \approx 0,24$. Повышенная ударная выносливость бетонов на основе демпфирующих компонентов связана с повышенными упруго-вязкими свойствами названных бетонов и повышенным коэффициентом динамического упрочнения.

6. Данные сравнительного анализа результатов забивки свай из тяжелого бетона на стандартных плотных заполнителях и экспериментальных свай из бетона с керамзитовыми компонентами и диспергированной резиной показали эффективность свай из бетона с компонентами демпфирующего действия.

7. Эксперименты в заводских условиях и на строительной площадке показали, что эффективными приемами динамического упрочнения стандартных свай на основе обычных тяжелых бетонов, способствующими их бездефектному погружению в плотных и прочных грунтах, являются: в летнее время – выдержка свай на воздухе после пропаривания в течение 15-30 дней, обеспечивающая статическое упрочнение и, соответственно, динамическое упрочнение бетона; в зимнее время – ведение работ по забивке свай при отрицательных температурах ниже -15°C за счет повышенной ударной выносливости бетона с замороженной капиллярной влагой.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Ударостойкость железобетона в присутствии косвенной арматуры / М.Б. Давлетшин, А.В. Парфенов, В.Н. Мохов и др. // Междунар. межвуз. сб. науч. трудов «Проблемы строительного комплекса России». – Уфа: УГНТУ, 1998. - С. 9.
2. Демпфирующие компоненты в составах бетонов повышенной ударной выносливости / М.Б. Давлетшин, А.В. Парфенов, В.Н. Мохов и др. // Междунар. межвуз. сб. науч. трудов «Проблемы строительного комплекса России». – Уфа: УГНТУ, 1998. - С. 10.
3. К вопросу расчета ударной выносливости забивных железобетонных свай / В.В. Бабков, М.Б. Давлетшин, А.В. Парфенов и др. // Новые технологии ... газа: Труды Самарского филиала секции “Строительство” Российской Инженерной Академии. Вып. 6. – Самара, 1999. - С. 145 - 150.
4. Исследование ударной выносливости фибробетона на основе стекловолокна / В.В. Бабков, А.В. Парфенов, М.Б. Давлетшин и др. // Материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. при IV Междунар. специализированной выставке «Строительство, архитектура, коммунальное хозяйство – 2000». – Уфа: УГНТУ, 2000. – Т. 1. - С. 22.
5. Бетоны с модифицированной структурой повышенной ударной выносливости / В.В. Бабков, М.Б. Давлетшин, А.В. Парфенов и др. // Надежность и долговечность ... конструкций: Материалы II Междунар. науч.-техн. конф. В 3 ч. – Волгоград: ВолгГАСА. – Волгоград, 2000. – Ч. 2. – С. 79-80.
6. Критерии оценки ударной выносливости бетона / В.В. Бабков, М.Б. Давлетшин, А.В. Парфенов и др. // Исследования в области архитектуры ... среды: Тез. докл. областной 58-й науч.-техн. конф. (апрель 2001 г.). – Самара: СамГАСА, 2001. – С. 93-94.

7. Ударная выносливость бетонов, армированных стальной фиброй / А.В. Парфенов, М.Б. Давлетшин, В.Н. Мохов и др. // Исследования в области архитектуры ... среды: Тез. докл. областной 58-й науч.-техн. конф. (апрель 2001 г.). – Самара: СамГАСА, 2001. – С. 94-95.
8. Элементы теории ударного упрочнения бетона / В.В. Бабков, А.В. Парфенов, М.Б. Давлетшин и др. // Материалы V Междунар. науч.-техн. конф. при V Междунар. специализированной выставке «Строительство, архитектура, коммунальное хозяйство – 2001». – Уфа: УГНТУ, 2001. - С. 5-6.
9. Фибробетон в условиях многократных ударных воздействий / А.В. Парфенов, М.Б. Давлетшин, В.Н. Мохов и др. // Материалы V Междунар. науч.-техн. конф. при V Междунар. специализированной выставке «Строительство, архитектура, коммунальное хозяйство – 2001». – Уфа: УГНТУ, 2001. - С. 7.
10. Оценка уровня динамических напряжений при действии ударной нагрузки / М.Б. Давлетшин, Л.В. Кроткова, А.В. Парфенов // Материалы V Междунар. науч.-техн. конф. при V Междунар. специализированной выставке «Строительство, архитектура, коммунальное хозяйство – 2001». – Уфа: УГНТУ, 2001. - С. 8.
11. Давлетшин М.Б., Бабков В.В. Ударная выносливость бетонов на основе демпфирующих компонентов // Современные ... технологии строительства: Труды секции “Строительство” Российской Инженерной Академии. Вып. 3. – М., 2002. – Ч. 2. - С. 157 - 162.
12. Модифицированные бетоны повышенной ударной выносливости / В.В. Бабков, В.Н. Мохов, М.Б. Давлетшин и др. // Строительные материалы. - 2002. - №5. - С. 24-25.