

**АО «УЗБЕКИСТОН ТЕМУР ЙУЛЛАРИ»**  
**ТАШКЕНТСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ**  
**ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

На правах рукописи

УДК 691.322

**ЕЛУБАЕВ КУАТ ТАЛГАТОВИЧ**

**«РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ И ТЕХНОЛОГИИ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ  
БЕТОНОВ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ»**

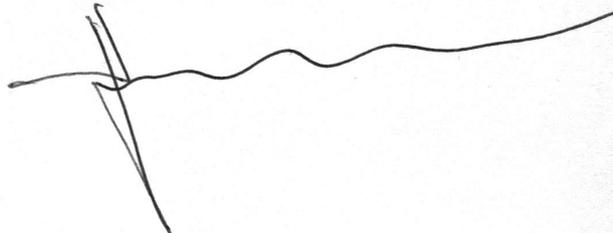
**5А340201 «Строительство зданий и сооружений»**

**Магистерская диссертация**

**на соискание степени магистра**

**Научный руководитель:**

**д.т.н., проф. Адылходжаев А.И.**



**Ташкент – 2016 г.**

## АННОТАЦИЯ

На территории Республики Узбекистан мало карьеров крупного заполнителя. Дефицит крупного заполнителя можно восполнить применением мелкозернистых бетонов. Цементно-песчаные бетоны имеют ряд преимуществ перед традиционными бетонами.

Диссертационная работа посвящена разработке составов и технологии мелкозернистых бетонов требуемых показателей свойств и со сниженным расходом цемента. Решение данной проблемы осуществлялась путем оптимизации составов бетона.

Доказана возможность получения мелкозернистого бетона со сниженным 10-15% расходом цемента.

## ANNOTATION

On the territory of the Republic of Uzbekistan a little coarse aggregate quarries. Coarse aggregate deficit can be bridged using the fine-grained concrete. These concretes have a number of advantages over traditional concrete.

The thesis is devoted to the development of structures and technology of fine-grained concrete required performance characteristics and reduced cement consumption. The solution of this problem was carried out by optimization of concrete compositions.

The possibility of obtaining fine-grained concrete with reduced 10-15% of cement.

## АННОТАЦИЯ

Ўзбекистон Республикаси худудида йирик тўлдирувчи карьерлари кам. Йирик тўлдирувчиларнинг танқислигини майда заррачали бетонлар ёрдамида қоплаш мумкин. Цемент асосидаги қумли бетон анъанавий бетондан бир неча афзалликларга эга.

Диссертация иши майда заррачали бетонларнинг керакли хусусиятларга эга таркибини цемент миқдорини камайтирилган ҳолда аниқлашга бағишланган. Бу муаммони ечими тўлдирувчиларнинг таркибини оптималлаштириш орқали амалга оширилди.

Цемент истеъмолини 10-15% камайтирилган ҳолда майда заррачали бетон олиш имконияти исботланган.

| <b>Содержание</b> |   |    |
|-------------------|---|----|
|                   | <b>Введение.....</b>  | 4  |
| <b>Глава I</b>    | <b>Изучение состояния вопроса разработки составов и технологии мелкозернистых бетонов высококачественной структуры.....</b>     | 6  |
| 1.1               | Сбор необходимой информации по различным источникам (Интернет, монографии, статьи, патенты и т.д.).....                         | 6  |
| 1.2               | Теоретические предпосылки создания необходимых показателей свойств мелкозернистых бетонов. Проблемы и пути реализации.....      | 19 |
| 1.3               | Аналитический обзор выполненных работ. Формирование целей и задач исследований.....   | 29 |
|                   | <b>Выводы по главе I.....</b>   | 31 |
| <b>Глава II</b>   | <b>Характеристика исходных материалов и методы исследования.....</b>  | 32 |
| 2.1               | Исследование качественных показателей составляющих бетонной смеси оптимального состава.....                                     | 32 |
| 2.1.1             | Подбор состава мелкозернистого бетона.....  | 36 |
| 2.1.2             | Характеристика исходных материалов.....   | 39 |
| 2.2               | Изучение процесса структурообразования мелкозернистых бетонов оптимальной структуры.....  | 42 |
|                   | <b>Выводы по главе II.....</b>  | 50 |
| <b>Глава III</b>  | <b>Технико-экономическое обоснование предлагаемой разработки.....</b>   | 50 |
|                   | <b>Выводы по главе III.....</b>   | 52 |
| <b>Глава IV</b>   | <b>Разработка рекомендаций по исследованию предлагаемой технологии мелкозернистого бетона высококачественной структуры.....</b> | 53 |
|                   | <b>Общие выводы.....</b>  | 55 |
|                   | <b>Список использованной литературы.....</b>  | 56 |

## Введение

**Актуальность работы.** Бетон является основным строительным материалом, обеспечивающим высокую несущую способность и длительный срок службы возводимых сооружений. Развитие современного бетоноведения направлено с одной стороны на повышение физико-механических характеристик бетона, с другой на снижение затрат при производстве и эксплуатации бетонных и железобетонных конструкций. Для реализации данных задач необходимо применение инновационных технологий при производстве бетона.

В настоящее время одним из приоритетных направлений развития промышленности строительных материалов является производство песчаных бетонов и изделий из них. Актуальность разработки заключается в получении высококачественного материала с использованием местного сырья. На территории Узбекистана считанное количество месторождений крупного заполнителя, поэтому внедрение песчаных бетонов при строительстве имеет большое значение.

Преимуществом использования высокопрочных мелкозернистых бетонов (МЗБ) являются:

- снижение массы конструкций в несущих железобетонных элементах зданий за счет уменьшения объема бетона, приводящее к экономии всех материалов входящих в состав бетона, также снижаются трудоемкость изготовления, транспортные расходы и приведенные затраты;
- получение высокопрочных изделий с повышенными эксплуатационными характеристиками.

Следует отметить и недостатки цементно-песчаного бетона, вследствие которых наблюдаются медленные темпы его производства и применения в строительстве. Прежде всего, они обусловлены структурой цементно-

песчаного бетона, для которой характерны: большая однородность и мелкозернистость, высокое содержание цементного камня, отсутствие жесткого каменного скелета, повышенные пористость и удельная поверхность твердой фазы. Так, например в мелкозернистых бетонах деформации усадки могут быть в 1.5-2 раза выше, чем у равнопрочных бетонов с крупным заполнителем.

Разработка составов мелкозернистых бетонов требуемых показателей свойств сопряжена с решением ряда задач – повышенная суммарная удельная поверхность заполнителей, с одной стороны, улучшает однородность структуры и позволяет получать бетон повышенной прочности по сравнению с обычными бетонами, но с другой стороны, повышенная водопотребность таких смесей приводит к росту расхода цемента для обеспечения нужной консистенции цементирующего вещества.

**Целью диссертационной работы** является разработка мелкозернистых бетонов высококачественной структуры с наименьшим расходом цемента и требуемым показателем свойств.

Для этого необходимо решить следующие **основные задачи**:

- на основе анализа мирового опыта по разработке составов и технологии мелкозернистых бетонов произвести мониторинг достоинств и недостатков проектирования таких бетонов;
- провести комплекс исследований составляющих бетонных смесей;
- оптимизировать составы бетонов высококачественной структуры;
- разработать рекомендации по использованию предлагаемой технологии.

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

- обосновать возможность получения мелкозернистого бетона высококачественной структуры путем оптимального выбора зернового состава песка, позволяющие сократить расход цемента;
- разработать технологию изготовления мелкозернистых бетонов высококачественной структуры;
- обосновать возможность сокращения расхода цемента при оптимальном подборе состава заполнителя.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и выводов, общий объем 60 страниц машинописного текста и списка использованной литературы. Количество рисунков – 6 шт., количество таблиц – 10 шт., количество диаграмм – 3 шт.

## **Глава I.1. Изучение состояния вопроса разработки составов и технологии мелкозернистых бетонов высококачественной структуры**

### **1.1. Сбор необходимой информации по различным источникам (Интернет, монографии, статьи, патенты и т.д.)**

Ф. Коанье впервые упомянул о мелкозернистом бетоне, используемом в строительстве к середине XIX века. Известны его научные разработки в области строительства сооружений для гидротехнических конструкций с использованием мелкозернистых бетонов на основе различных вяжущих. В качестве вяжущих использовались портландцемент, гидравлическую и воздушную известь, а в качестве заполнителей пески различной крупности. В строительной литературе такой бетон называли «бетоном Коанье». Он использовался с середины XIX в. при сооружении водосточных каналов в Париже, Лионе, Одессе при строительстве акведука в городе Ванна протяженностью около 60 км. В 1861 г. Ф. Коанье была опубликована работа [1], дающая обоснование предложенного им способа изготовления мелкозернистых бетонов. Разработанные им основные принципы

остаются актуальными и по сей день. Н.А. Житкевич в своих работах [2] отмечал правильность основных принципов получения и практического применения мелкозернистых бетонов Ф. Коанье. Также он считал, что сооружения, построенные в эпоху Римской Империи из бетонов и растворов, хорошо сохранились из-за защиты облицовки их поверхности тесанным камнем.

Стоит особо отметить работы А.В. Волженского [3,4,5,6], в которых он уделил внимание разработке составов, исследованию свойств и освоению мелкозернистого бетона в строительной промышленности. Он доказал возможность и экономическую эффективность применения мелкозернистых бетонов для строительства зданий и сооружений в районах с дефицитом крупного заполнителя. На сегодняшний день мелкозернистые бетоны один из наиболее распространенных видов строительных материалов, используемых при возведении несущих и ограждающих конструкций, в теплоизоляции и в качестве защитного облицовочного слоя конструкций для защиты от воздействий агрессивных сред.

Большой вклад в технологию и исследование свойств разнообразных видов мелкозернистого бетона внесли Ю.М. Баженов и его коллеги, Л.А. Алимов, В.В. Воронин, В.Г. Батраков, А.Е. Шейкин.

В настоящее время в различных отраслях строительства активно используются мелкозернистые бетоны. Раньше их широкое использование было невозможно из-за некоторых особенностей свойств и структуры. Оптимизация структуры мелкозернистых бетонов позволило существенно повысить эксплуатационные характеристики таких бетонов.

Ю.М. Баженов [7], отмечает, что мелкозернистая структура обладает множеством преимуществ, основными из которых являются:

- возможность получения однородной тонкодисперсной высококачественной структуры бетона с отсутствием включений крупных зёрен имеющих иное происхождение;

- повышенная способность бетонных смесей к трансформации и тиксотропия;
- широкий спектр технологического применения - возможность формирования изделий и конструкций различными методами: экструзии, литья, торкретированием, штампованием, прессованием и другими;
- улучшенная транспортабельность;
- возможность использования различных сухих смесей с гарантированным постоянством состава и свойств;
- получение различных материалов с заданными комплексами свойств;
- получение специальных бетонов, таких как: гидроизоляционный бетон, фибробетон, армоцемент, электропроводящий, декоративный бетон и других;
- возможность получать новые архитектурно-конструкционные решения - тонкостенные и слоистые конструкции, изделия переменной плотности, гибридные конструкции и т.д.;
- многофункциональность материала, т.е. на одном и том же цементе и заполнителе возможно только с помощью корректировки дозировок, изменения компонентов, и технологических приёмов получить различные виды бетонов: конструкционный, гидроизоляционный, теплоизоляционный, декоративный;
- широкая возможность использования местных материалов и, обычно, более низкая себестоимость в сравнении с бетоном на обычных крупных заполнителях.

Ю.М. Баженов отмечал [8], что повышение пористости мелкозернистых бетонов происходит из-за того, что заполнитель обладает высокой удельной поверхностью, заметно увеличивающей водопотребность бетонной смеси, что при вибрации способствует вовлечению в неё воздуха в пределах 5%. Кроме того, абсолютный объём

цементного теста в мелкозернистых бетонах должен быть всегда больше, чем в крупнозернистом бетоне, поэтому на общую пористость бетона влияет межзерновая пустотность, которая образуется при недостаточном его количестве. Мелкозернистая бетонная смесь имеет более однородную структуру из-за отсутствия крупного заполнителя, а также легче поддается различным технологическим переделам. Это дает возможность получения изделий и конструкций различного вида с различными эксплуатационными свойствами, которые не всегда можно получить, используя крупный заполнитель.

Чтобы получить специальные мелкозернистые бетоны в составе также используют жидкое стекло, полимеры, фосфатные связующие, глинозёмистый и высокоглинозёмистый цементы [9,10,11,12,13]. Наиболее часто в качестве заполнителя применяется природный кварцевый песок, хотя также есть разработки и опыт использования иных мелкозернистых заполнителей – различных шлаков плотной и пористой структуры, керамзитового и перлитового песка, боя стекла и фарфора, пиритных огарков, отходов мокрой магнитной сепарации железистых кварцитов, вермикулита, пенополистирола, молотого кирпичного боя, отходов древесной промышленности, мелких фракций всевозможных огнеупорных материалов.

Для использования в качестве конструкционно-теплоизоляционного материала разработаны составы МЗБ, в которых в качестве заполнителя применяется шлаковый песок. Такие мелкозернистые бетоны показывают достаточную прочность при сжатии 6-10 МПа при средней плотности 1200-1400 кг/м<sup>3</sup> и низкую теплопроводность. В зависимости от влажности бетона от 0 до 15% такие бетоны показывают теплопроводность 0,175-0,395 Вт/м.К соответственно [14].

Силикатный или известково-песчаный МЗБ, имеющий плотность 1700-2400 кг/м<sup>3</sup>, прочность при сжатии 20-70 МПа и морозостойкость 200 циклов и более применяют при изготовлении различных сборных

бетонных и железобетонных конструкций, как обычных, так и предварительно-напряженных [15].

Для получения изделий из мелкозернистого бетона с ячеистой структурой в мелкозернистую цементно-песчаную или силикатную смесь вводят порообразующие добавки. Таким образом получают мелкозернистый пено- и газобетон. Первый патент на это изобретение был зарегистрирован в 1890 г. [16], а применение таких бетонов в строительстве началось в 20-х годах XX столетия.

В работах Ю.М. Баженова [8] были описаны наиболее важные моменты изготовления армоцементных конструкций. Армоцемент представляет собой тонкостенные конструкции различной формы, которые армируются стальными сетками. Для таких конструкций он рекомендует использовать низкопластичную либо пластичную цементно-песчаную смесь, а также контролировать подвижность мелкозернистых бетонных смесей на специальном приборе, который позволяет определять, насколько эффективно подобраны компоненты по времени вытекания навески приготовленной мелкозернистой бетонной смеси в секундах.

Для кровельных покрытий возможно использовать композиции мелкозернистых бетонов с добавкой промышленных отходов. В работе С.И. Павленко [14] приведены результаты исследований, а также разработаны составы бетона с количеством цемента 450 - 570 кг/м<sup>3</sup>, шлакового песка 950-1150 кг/м<sup>3</sup>, гидроудаленной золы 180-210 кг/м<sup>3</sup>, воды 180-240 кг/м<sup>3</sup>, добавок ЛСТ+Ж136-157 М (в соотношении 1 к 2) и расходе 0,1% от цемента по массе. Получаемый мелкозернистый бетон, показывал водонепроницаемость W12, тогда как его морозостойкость составляла от 1100 до 1300 циклов. Это дает возможность не использовать какие-либо дополнительные защитные покрытия.

Мелкозернистый бетон также широко распространен в устройстве дорожных и аэродромных покрытий [17,18]. Для таких бетонов в качестве заполнителя могут быть использованы различные материалы: обычные

карьерные пески, шлаковый песок, кварцевополевошпатовые пески, представляющие собой смесь природных и дробленых песков, а также отсеков дробления, которые отличаются повышенной микрошероховатостью, отходы мокрой магнитной сепарации железистых кварцитов, бой фарфора и стекла, пиритные огарки и т.д. Результаты исследований МЗБ для дорожного и аэродромного строительства, а также для устройства износостойких покрытий полов промышленных зданий описываются и в других работах [17,19,20].

Особой разновидностью мелкозернистых бетонов являются строительные кладочные растворы. С совершенствованием технологий их производства, а также внедрением новых разработок все более расширяется ассортимент различных сухих строительных смесей, которые позволяют производить кладку каменных конструкций, как в летний, так и в зимний период при отрицательных температурах.

В патенте на изобретение [21], авторами которых являются: Хозин В.Г., Мугинов Х.Г., Морозов Н.М., Степанов С.В. – говорится, что мелкозернистый бетон – относится к строительным материалам и может быть использован для изготовления изделий как в гражданском, так и в промышленном строительстве. Полученный технический результат - повышение прочности на сжатие и при изгибе в раннем и проектном возрасте, уменьшение водопоглощения. Мелкозернистый бетон получен из смеси, содержащей портландцемент, фракционированный кварцевый песок с содержанием фракций в следующем соотношении, %: фракция 5-1,25 мм - 57-63; фракция 1,25-0,315 мм - 17-23; фракция 0,315-0,14 мм - 17-23, молотый кварцевый песок с удельной поверхностью  $S_{уд} = 120-170 \text{ м}^2/\text{кг}$ , продукт на основе модифицированного поликарбоксилата - гиперпластификатор «Melflux 2651 F» и воду, при следующем соотношении компонентов, мас. %: портландцемент 15,0-23,0, фракционированный песок 68,1-78,1, молотый кварцевый песок 1,5-2,3, гиперпластификатор «Melflux 2651 F» 0,075-0,115, вода остальное.

Следующий патент на изобретение, автором которого является Львович К.И., относится к строительству, а именно к способам приготовления бетонных смесей для получения крупнопористых мелкозернистых бетонов низких марок с коэффициентом уплотнения 0,88-0,96. Наиболее близким к предлагаемому, является способ приготовления бетонной мелкозернистой смеси, включающий перемешивание компонентов смеси с воздухововлекающей добавкой в вакууме с последующим уплотнением [22].

Следует отметить, что недостатком известных способов является то, что введение в смесь воздухововлекающей добавки приводит к снижению прочности бетона. Для сохранения прочностных характеристик используют, например, дорогостоящую операцию вакуумирования для удаления крупных пузырьков воздуха при перемешивании.

Техническая задача заключалась в обеспечении возможности использования для производства несущих конструкций крупнопористых мелкозернистых бетонов низких марок с коэффициентом уплотнения 0,88-0,96 за счет повышения однородности бетона. Поставленная задача решается таким образом, что в способе приготовления бетонной смеси для получения крупнопористого мелкозернистого бетона с коэффициентом уплотнения 0,88-0,96, включающем перемешивание компонентов смеси с введением воздухововлекающей добавки и последующее уплотнение, согласно изобретению, воздухововлекающую добавку вводят в смесь в количестве, обеспечивающем объем вовлеченного воздуха, равный объему межзернового пространства заполнителя, не заполненного цементным тестом уплотненной бетонной смеси, при этом строят зависимость коэффициента уплотнения бетонной смеси от количества добавки в % от цемента, и определяют ее количество по точке, соответствующей началу уменьшения коэффициента уплотнения.

При приготовлении бетонной смеси для получения мелкозернистого бетона марок М50-М300, цементного теста, как правило, для заполнения с

избытком межзернового пространства заполнителя не хватает, в результате образуются воздушные поры. Использование таких бетонов для несущих конструкций недопустимо по СНиПу 2.01.03-84 из-за большого разброса показателей прочности в связи с неоднородностью структуры бетона. Расположение пор в крупнопористых бетонах нерегулируемо, что означает возможность их концентрации в опасном сечении, например в зоне главных растягивающих напряжений. Коэффициент вариации при испытании образцов из крупнопористых мелкозернистых бетонов превышает коэффициент вариации испытаний образцов мелкозернистого бетона слитной структуры. Для получения заданной средней прочности крупнопористых мелкозернистых бетонов используют такие приемы как повышение расхода цемента, применение тонкомолотого вяжущего, введение тонкодисперсных добавок и др., что удорожает процесс приготовления смеси [23].

Предлагаемый способ приготовления мелкозернистой бетонной смеси позволит использовать их для фундаментов, стен, перегородок, блоков перекрытий наряду с бетонами слитной структуры.

Патент на изобретение, автором которого является Баранов В.Н. [24], относится к технике производства строительных изделий, например, из мелкозернистых жестких бетонов, а также установки для его осуществления.

Известны способы формования строительных изделий из мелкозернистых жестких бетонных смесей, заключающиеся в том, что в форму, установленную на виброплощадке, укладывают мелкозернистую бетонную смесь, сверху опускают пригруз и производят уплотнение.

Целью работы Краснова А.М. – «Формирование структуры, состава и свойств высокопрочных мелкозернистых бетонов для сборных покрытий автомобильных дорог» - является разработка научных основ формирования структуры, состава и свойств высокопрочных мелкозернистых бетонов высокого наполнения с изучением их

физических, физико-механических и физико-технических свойств для получения долговечных покрытий автомобильных дорог [25]. Задачами являются:

- определение закономерностей влияния тонкодисперсного наполнителя на формирование структуры мелкозернистых бетонов на цементных и органических вяжущих рациональных составов;
- изучение физических, физико-механических и технических характеристик высоконаполненного мелкозернистого бетона повышенной прочности и долговечности;
- исследование возможности использования полистирольного наполнителя в бетонных конструкциях дорожного покрытия автомобильных дорог с определением основных физических и физико-механических характеристик бетона рационального состава;
- разработка режима виброуплотнения цементно-песчаной смеси для достижения высокой структурной прочности высоконаполненного мелкозернистого бетона;
- разработка состава мелкозернистого песчаного асфальтобетона с повышенным содержанием тонкодисперсного наполнителя и исследование его основных физико-механических характеристик;
- определение усилий в сборных напряженно-деформированных дорожных плитах из высоконаполненного мелкозернистого бетона от подвижных расчетных нагрузок;
- определение экономической эффективности использования высокопрочного мелкозернистого бетона в производстве сборных железобетонных плит покрытия автомобильных дорог.

В работе определены закономерности влияния тонкодисперсного наполнителя на формирование структуры мелкозернистых бетонов на

цементных и органических вяжущих; исследовано влияние фракционного состава наполнителя на свойства высокопрочного мелкозернистого бетона. Найдено, что наилучшие прочностные характеристики показывает бетон с использованием наполнителя удельной поверхности 450... 500 м<sup>2</sup>/кг. Получено максимальное объемное наполнение цементной матрицы дисперсными кварцевыми частицами для уплотненного четырехфракционного кварцевого песка в пределах размеров зерен от 0,63 до 0,14 мм, которое подтверждено математическим расчетом объема пустот. С помощью физико-химических методов анализа определены фазовые составы цементного камня в зоне контакта «цементный камень – заполнитель».

Целью работы Кожиева С. Б. [26] – «Высококачественный мелкозернистый бетон для дорожных покрытий с органоминеральной добавкой» - создание высококачественного МЗБ для дорожных покрытий с органоминеральной добавкой. В работе:

- разработана технология высококачественного МЗБ для дорожных покрытий, основанная на модификации его структуры органоминеральной добавкой, состоящей из модификатора МБ 10-01 и золы-уноса;
- разработаны оптимальные составы высококачественного МЗБ для дорожных покрытий с органоминеральной добавкой классов по прочности на растяжение при изгибе  $B_{tb}$  6,8...8,0 и В 70...80 по прочности на осевое сжатие; марок F 600...800 по морозостойкости и W16-W20 по водонепроницаемости на основе портландцемента марки 500 ДО-Н при использовании крупных песков;
- разработана органоминеральная добавка, состоящая из модификатора МБ 10-01 и золы-уноса;

Анализ работ по созданию МЗБ с повышенной эксплуатационной стойкостью для дорожных покрытий показывает, что для этого могут быть использованы различные способы. Главные из них:

- улучшение гранулометрического состава песка и снижение его пустотности;
- применение различных расширяющихся цементов;
- применение композиционных (смешанных) цементов;
- использование химических добавок;
- использование комплексных органоминеральных добавок.

Первый способ связан с обогащением песчаных смесей крупными фракциями или исключением мелких фракций. Этот способ позволяет получить песчаную смесь с оптимальным гранулометрическим составом, и низкой пустотностью. При этом образуется плотная структура упаковки мелкого заполнителя и значительно снижается водоцементное отношение. За счёт правильного подбора состава песка либо специальной его переработки возможно получение МЗБ с повышенными эксплуатационными свойствами и одновременное снижение расхода цемента на 80... 140 кг/м<sup>3</sup>.

Гриневым А. П. предложены - «Мелкозернистые бетоны для монолитного строительства на основе сырья Ханты-Мансийского автономного округа». Автором представлена разработка композиционного вяжущего и мелкозернистого бетона для монолитного строительства в северных районах на основе сырья ХМАО [27].

В работе разработаны принципы повышения эффективности мелкозернистого бетона для монолитного строительства в условиях пониженных температур, заключающиеся в управлении процессами структурообразования за счет использования композиционного вяжущего на основе цемента и полиминеральных полевошпат-кварцевых песков, оказывающего комплексное влияние на формирование бетона в присутствии противоморозных добавок. Создаваемые условия гидратации

позволяют снизить влияние отрицательных температур на процессы твердения и, как следствие, набор прочности бетона, уменьшив падение прочности по сравнению с образцами, твердевшими в нормальных условиях.

Установлено влияние состава кремнеземного компонента на гранулометрию композиционного вяжущего. Присутствие в составе полиминерального песка полевых шпатов, которые обладают спайностью и более низкой твердостью, по сравнению с кварцем, приводит: к улучшению размолоспособности вяжущего, а, следовательно, снижению энергозатрат на помол; полимодальному распределению частиц по размерам и созданию более плотной упаковки частиц ВНВ; снижению микропористости цементного камня мелкозернистого бетона.

Представляет определенный интерес работа Королевой Е.Л. - «Мелкозернистые бетоны на техногенном глауконитовом песке». В работе дано обоснование возможности получения мелкозернистого бетона на глауконитовом песке путем целенаправленного регулирования структуры разработанной комплексной модифицирующей добавкой КДГ, вводимой с дисперсным носителем и получаемой совместным помолом глауконитового песка, С-3 (1 %) и нитратом кальция (1 %), компоненты которой за счет синергетического эффекта позволяют повысить технико-эксплуатационные свойства МЗБ [28].

Выявлены особенности процесса структурообразования в МЗБ на глауконитовом песке. Установлено, что глауконитовый песок замедляет процессы гидратации портландцемента в ранние сроки твердения за счет катионного обмена между ионами кальция цементной системы и ионами, расположенными в межплоскостных положениях отрицательно заряженной кристаллической решетки глауконита, состоящей из листовых структур алюмосиликата.

Установлены закономерности регулирования, реологических свойств; мелкозернистой, бетонной смеси на глауконитовом песке, гипер- и

суперпластификаторами. Показано, что для увеличения подвижности бетонной смеси на глауконитовом песке наиболее эффективной является: добавка гиперпластификатора Мигор в количестве 1%, позволяющая увеличить подвижность до 30%, а прочность, в том числе и в ранние сроки твердения, на 45-50%.

Автором предложены последовательности ввода компонентов разработанной добавки КДГ в процессе ее производства. Доказано, что наиболее эффективным является следующий вариант получения модифицирующей добавки КДГ: помол 1,5 часа глауконитового песка и С-3 (1%) до удельной у поверхности 300 м<sup>2</sup>/кг, добавление Са(ОН)<sub>2</sub> (1%) с последующим помолом еще 1,5 ч до удельной поверхности 400 м<sup>2</sup>/кг.

Доказано улучшение параметров структуры МЗБ на глауконитовом песке за счет изменения химизма процессов гидратации в присутствии тонкодисперсного, частично аморфного, и, следовательно, более активного глауконита и кварца - компонентов, выступающих как активная минеральная добавка, связывающая выделяющийся при гидратации Са(ОН)<sub>2</sub> в гидросиликаты кальция. Исследованиями установлено, что КДГ способствует снижению открытой пористости в 2,1 раза и увеличению условно замкнутых пор бетона в 3,7 раза по сравнению с аналогичным бетоном без добавки. Средний диаметр пор уменьшается с 0,20 до 0,15 мм.

### **Вывод по 1.1**

Анализ различных литературных источников показывает:

- 1) На сегодняшний день мелкозернистые бетоны используются при возведении несущих и ограждающих конструкций, в теплоизоляции и в качестве защитного облицовочного слоя конструкций для защиты от воздействий агрессивных сред.
- 2) Многие ученые показали возможность и экономическую эффективность применения мелкозернистых бетонов для

строительства зданий и сооружений в районах с дефицитом крупного заполнителя.

- 3) Оптимизация структуры мелкозернистых бетонов позволило существенно повысить эксплуатационные характеристики таких бетонов, так как мелкозернистая структура обладает множеством преимуществ.
- 4) Ряд исследований было направлено на получение мелкозернистых бетонов высококачественной структуры, главным способом которого являлось улучшение гранулометрического состава песка и снижение его пустотности.

## **1.2. Теоретические предпосылки создания необходимых показателей свойств мелкозернистых бетонов. Проблемы и пути реализации**

Особенности структуры мелкозернистых бетонов. Более плотные материалы обладают большей прочностью, имеют меньшую проницаемость, чем материалы с крупнозернистой структурой. Наибольшим водопоглощением обладают как раз материалы с крупнозернистой структурой.

Размеры структурных элементов бетона оказывают большое влияние на свойства материала. В зависимости от размеров элементов в бетоне выделяют макро- и микроструктуру. Структуру, видимую невооруженным глазом или при небольшом увеличении, называют макроструктурой. Структуру, которую можно видеть только при большом увеличении с помощью микроскопа называют микроструктурой.

Наибольшее значение для свойств бетона имеет микроструктура цементного камня, которая состоит из гидратных новообразований и микропор различных размеров. Также в ней присутствуют включения непрореагировавших зерен цемента (микробетон Юнга).

Основным компонентом бетона оказывающим влияние на свойства и долговечность является цементный камень. В основном он состоит из гидросиликатов кальция, формирующих определённую структуру в пространстве, которая включает в себя не прореагировавшую часть цементных зерен покрытых оболочкой из гидратных новообразований, а также межзерновое пространство, частично заполненное гидратными новообразованиями.

Гидросиликаты кальция могут быть различны по строению. Различают кристаллическое, полукристаллическое или аморфное строение. Кристаллическое строение имеют в основном гидросиликаты, образовавшиеся при тепловой и автоклавной обработке, а также при кристаллизации новообразований в порах и в межзерновом пространстве. Различия в структуре и свойствах этих зон влияют на качество материала в целом.

Также структура материала зависит от их распределения в бетоне, в том числе, от того как распределены жидкая и воздушная фазы в первично сформированной структуре бетона к моменту окончания схватывания. Если происходит расслоение бетонной смеси при увеличенных значениях водоцементного отношения или бетонная смесь недоуплотнена при пониженных значениях В/Ц, то в затвердевшем бетоне возникают необратимые дефекты, которые почти невозможно устранить в процессе дальнейшей гидратации цемента. Эти дефекты приводят к ухудшению физико-механических характеристик бетона, а именно к снижению прочности бетона, а также его долговечности.

В исследованиях [29], объясняется, что произведение числа контактов на единицу поверхности и средней прочности каждого контакта определяет прочность любых пористых материалов. В сравнении с обычным крупнозернистым бетоном МЗБ имеет большее число таких контактов, из-за уменьшения размера частиц и более плотной их упаковки. Получается, что суммарная сила сцепления зерен заполнителя и

цементного камня, играющая определяющую роль в способности сопротивляться растягивающим напряжениям, также возрастает [30,31,32]. А это, если следовать структурной теории прочности бетона [33], должно положительно влиять на эксплуатационные характеристики мелкозернистых бетонов.

Испытания показывают, что мелкозернистый бетон имеет большую прочность на растяжение в сравнении с обычным бетоном на крупных заполнителях [34,31,33,35,36]. Отношение  $R_{из}/R_{сж}$  мелкозернистых бетонов равно 0,16...0,30, в то время как у щебеночного бетона - 0,10...0,15 [34]. В исследованиях [8] показано, что мелкозернистый бетон на 20-30% лучше сопротивляется растягивающим напряжениям, чем бетон крупнозернистый бетон того же класса по прочности. По мнению автора данной работы, это можно объяснить тем, что из-за отсутствия крупного заполнителя уменьшается вероятность появления микродефектов, вызванных усадочными деформациями и седиментационными явлениями во время твердения цементного камня, а также тем, что бетон становится более однородным по своей структуре.

В работе [8] изучались закономерности изменения прочностных характеристик мелкозернистых бетонов в армоцементных конструкциях. При этом обнаружилось некоторые особенности. Прочность бетона при  $V/C= 0,3$  имеет линейную зависимость от расхода цемента. При уменьшении количества вяжущего прочность бетона резко падает. А при  $V/C= 0,4$  и более наибольшая прочность мелкозернистого бетона достигается при максимальной плотности бетонной смеси, что возможно при наилучшем соотношении между вяжущим и заполнителем. Отсюда следует, что регулируя соотношение количества вяжущего и заполнителя, а также водоцементное отношение, можно получить МЗБ с требуемыми прочностными характеристиками [23,37].

Эти особенности объясняются, при рассмотрении микроструктуры затвердевшего мелкозернистого бетона с различными соотношениями Ц/П

и В/Ц. Количество цемента и В/Ц определяют консистенцию и структуру цементного теста, что, соответственно влияет на качество образовавшегося цементного камня. В бетоне цементное тесто заполняет межзерновые пустоты, а также расходуется на обмазку зёрен заполнителя с некоторой раздвижкой [38,39]. Если цементного теста становится недостаточно, тогда его хватает только для обмазки зерен заполнителя, и при этом межзерновые пустоты не заполняются. В случае избытка цементного теста, оно заполняет все межзерновые пустоты и раздвигает зерна заполнителя на излишнее расстояние. Получается, что если остальные параметры оставить неизменными отношение расхода заполнителя в смеси к расходу цемента определяет структуру мелкозернистого бетона.

Таким образом, можно выделить два основных вида конгломератной структуры мелкозернистого бетона. Согласно исследованиям [40,32], первый вид структуры - плотные МЗБ, которые имеют минимальное количество вовлеченного воздуха ( $V_{\text{возд.}} < 4-5\%$ ).

В таких бетонах объем цементного камня по отношению к объёму межзерновых пустот увеличен, чем обеспечивается полное заполнение объема межзерновых пустот, наряду с обмазкой поверхности заполнителя. При такой структуре МЗБ характеризуется высокой условной толщиной слоя цементного камня на единицу поверхности заполнителя, которая составляет около 25-30 микрон. В этом случае прочность бетона при неизменном В/Ц практически не зависит от концентрации цементного камня. Структура второго вида имеет более высокое содержание вовлеченного воздуха ( $V_{\text{возд.}} > 5\%$ ). Меньшее количество цементного теста в структуре бетонной смеси, может обеспечить только обмазку зёрен заполнителя, и при этом объем межзерновых пустот в заполнителе останется незаполненным. В таком случае толщина условного слоя цементного камня на единицу поверхности заполнителя будет равна 15-20 микрон. Если рассматривать второй вид структуры МЗБ, то можно отметить более четкую зависимость прочности бетона, как на сжатие, так и

на растяжение при изгибе от цементно-песчаного отношения, в силу увеличения роли цементного камня как связующего для зерен заполнителя. Во втором случае большое влияние на прочность оказывают такие факторы, как объем цементного камня и количество вовлеченного воздуха в мелкозернистом бетоне. При более плотной упаковке заполнителя уменьшается толщина слоя цементного камня между зернами заполнителя, и структура бетона значительно упрочняется из-за возникающих взаимодействий в контактных слоях зерен заполнителя [41,32]. Вследствие этого структурообразующая роль песка и относительная доля воздействующих на него напряжений при сопротивлении нагрузке увеличивается. Более плотная упаковка зерен заполнителя позволяет уменьшить количество цементного теста, а также уменьшить усадочные деформации. Кроме того в зоне контакта цементного теста и заполнителя происходят физико-химические взаимодействия с новообразованиями жидкой фазы на разных этапах твердения бетона, которые приводят к образованию в цементном камне диффузных структурированных оболочек вокруг зёрен заполнителя [19,42].

Объем вовлеченного воздуха при переходе к структуре второго вида увеличивается, а также изменяется и характер пористости бетона. Это можно определить по коэффициенту насыщения пор. Если в структуре первого вида он равен 0,7- 0,75, то в структуре второго вида он равен уже 0,6-0,65, что может говорить о наличии в системе условно-замкнутых пор [43,44]. По данным ряда исследований [37,44] повышение относительного объема вовлеченного воздуха при условно-замкнутом характере пор до 5-6% обеспечивает специальным гидротехническим, а также бетонам для дорожных и аэродромных покрытий повышенную морозостойкость и долговечность. При этом предполагается, что размер воздушных пор должен находиться в определенных пределах, которые считаются наиболее эффективными. В различных исследованиях указывается разный размер пор, который считается наиболее эффективным для повышения

морозостойкости. В работе [45] говорится, что оптимальный размер пор находится в пределах от 20 до 500 мкм, тогда как автор работы [29] утверждает, что наиболее эффективные размеры пор колеблются в пределах от 1...2 до 300...500 мкм. В исследовании [46] говорится о наиболее эффективных размерах от 50 до 250 мкм, а в работе [47] до 300 мкм. Автор работы [48] считает, что воздушные пузырьки диаметром более 100 мкм считаются неэффективными, так как снижают прочность бетона. По мнению автора прочность снижается как из-за наличия пор диаметром более 100 мкм, так и за счет слияния мелких пор в более крупные или скопления их вокруг крупных. Самым эффективным считается такое воздухововлечение, когда поры располагаются равномерно в цементном камне вокруг зерен заполнителя и имеют небольшой объем

Формирование структуры бетона. Схватывание бетонной смеси и последующие твердение бетона формируют его структуру. Гидратация цемента и его твердение оказывают наибольшее влияние на образующуюся структуру бетона.

Обобщенная схема процесса гидратации портландцемента и образования структуры цементного камня, предложенная Ф. Лохтером и В. Рихартцем, показывает как изменяется во времени пористость цементного камня и количество различных новообразований. (рис. 1.1). В данной схеме учитывается, что часть некоторая образовавшегося этtringита может переходить в моносulfатную форму сульфогидроалюмината кальция с течением времени, когда весь введенный в портландцемент для регулирования сроков схватывания двуводный гипс свяжется с трёхкальциевым алюминатом.



Рис 1.1. Схемы процесса гидратации цемента (а) и структурообразования (б) цементного камня во времени

1 — образование длинных кристаллов; 2- образование этtringита; 3 – изменение пористости; 4 - образование коротких волокон; 5 - образование моносульфата, 6 - неустойчивая структура цементного камня; 7 -формирование основной структуры; 8-уплотнение структуры; 9 - стабильная структура.

Гидратация клинкера происходит на границах зерен клинкера с образованием цементного геля. Происходит плотная упаковка зерен клинкера в гель, при этом цементный гель одновременно растет как внутрь, так и наружу.

При этом часть гидратированных компонентов клинкера диффундирует в направлении оболочки цементного зерна, а вода при этом проникает в противоположном направлении внутрь. Гидратированные компоненты вяжущего присоединяются к уже образовавшимся кристаллам геля, а также образуют новые. Получается, что около 55% возникающих новообразований оказывается снаружи первоначальной границы зерна клинкера, а оставшиеся 45% остаются внутри [37].

Промежуток времени от момента затворения вяжущего водой до начала быстрого набора прочности образующегося цементного камня называется периодом формирования структуры. Продолжительность этого периода называют сроком схватывания бетонной смеси. Сроки схватывания напрямую зависят от концентрации вяжущего, то есть от водо-цементного отношения (рис. 1.2). Чем ниже В/Ц тем меньше сроки

схватывания цементного теста. Соотношение плотной и пористой составляющей цементного камня к моменту окончания схватывания также зависит от концентрации вяжущего. Эта структура, состоящая из первичных новообразований появившихся в результате гидратации цемента, представляет собой «первоначальную матрицу», по которой можно судить о будущей структуре бетона [37]. Также очень важную роль в образовании структуры бетона играет явление усадки или контракция. Исследования показывают, что объем уложенного бетона заметно уменьшается в начальные сроки схватывания и твердения. Усадку бетона можно объяснить тем, что во время взаимодействия двух основных составляющих бетона цемента и воды общий объем системы «цемент + вода» становится меньше. Н.А. Мощанский в своей работе [49] утверждает, что в течение нескольких часов с момента затворения из-за усадки геометрический объем бетонной конструкции сокращается примерно на 2%, тогда как абсолютный объем уменьшается до 95-96% изначального объема уложенной бетонной смеси.

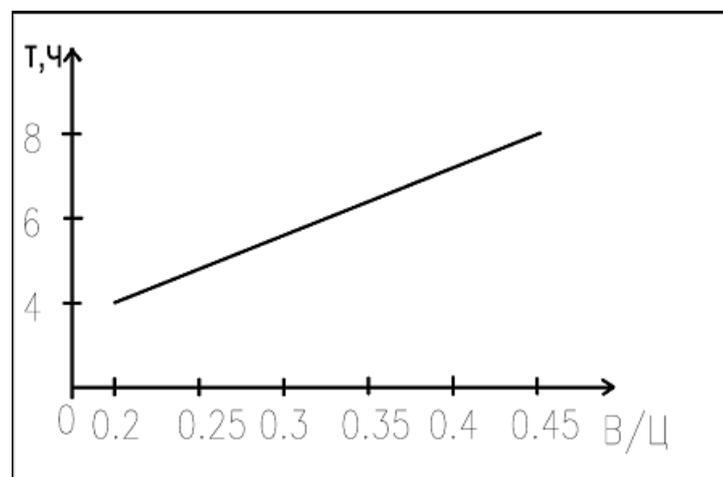


Рис. 1.2. Зависимость периода формирования структуры цементного камня (сроков схватывания) от В/Ц.

В целях оптимизации расчетов и удобства прогнозирования свойств процесс структурообразования бетона условно можно поделить на три этапа: первый этап, в течение которого в бетонной формируется первичная

структура бетона, второй этап, во время которого образовавшаяся структура постепенно разрастается и уплотняется, и третий заключительный, когда изменений в структуре бетона со временем практически не происходит (рис 1.3).

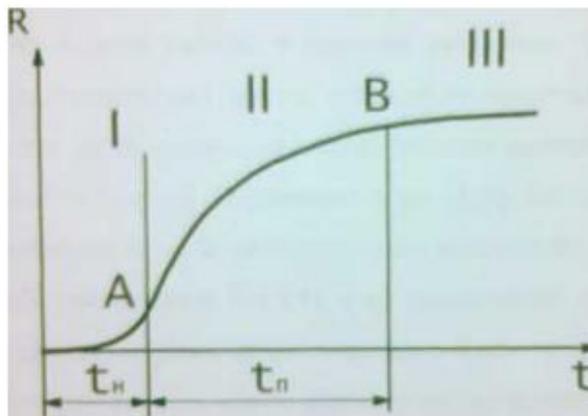


Рис. 1.3. Расчетные периоды структурообразования бетона.

I -период образования первоначальной структуры; II- период упрочнения структуры, III- период стабилизации структуры.

Точкой перехода между первым и вторым этапами является точка А, обозначающая момент времени, когда первичная структура бетона уже образовалась и затем происходит лишь ее дальнейшее уплотнение. В этом случае, увеличение прочности бетона на следующем этапе можно описать логарифмической функцией, что дает возможность точнее прогнозировать изменение параметров бетона с течением времени. Обобщенно прочность бетона на сжатие  $R$  можно описать следующим выражением [37]:

$$R = R_0 + \Delta R, \quad (1.1)$$

где  $R_0$  — прочность первичной структуры бетона;  $\Delta R = f(t, T)$  - последующий набор прочности бетона в результате его упрочнения и зависящий от продолжительности и условий твердения.

В исследованиях [50,51] отмечается, что прочность цементного камня обеспечивается силами поликонденсационного происхождения, в основе которых лежит ковалентная связь типа Si-O-Si, водородных связей, а также связей имеющих донорно-акцепторное происхождение, основывающихся на силе взаимодействия молекул воды с поверхностными ионами кальция и другими положительными ионами. Полные взаимодействия катионов

$\text{Ca}^{2+}$  с атомами кислорода молекул воды обеспечивают объединение тоберморитоподобных кристаллов C-S-H в единое поликристаллическое новообразование. Молекулы воды могут входить в координатную сферу катионов кальция, в результате чего при взаимодействиях внутри кристаллов C-S-H образуется связь O-Ca-O, а на поверхности кристаллов связь Ca-O. В первом варианте происходит сращивание отдельных слоев кристаллов, а второй вариант, в результате ненасыщенности связей приводит к объединению кристаллов в местах их контакта, и образованию крупных поликристаллических сростков. В случае, если непосредственный контакт между отдельными кристаллами C-S-H отсутствует, при взаимодействии с сорбционной влагой происходит образование связей O-Ca-H<sub>2</sub>O-Ca-O. Эти связи в свою очередь тоже оказывают влияние на физико-механические характеристики поликристаллического сростка, потому как могут воспринимать определенные механические напряжения. Данный вид связей образуется только в случае, если расстояние между поверхностями соседних кристаллов не больше 1,3 нм. Стоит заметить, что при этом увеличиваются межслоевые связи и кристаллы становятся шире из-за увеличения координационного числа ионов кальция. Если в цепи количество молекул воды будет расти и дальше, то расстояние между кристаллами будет резко увеличиваться, что в конечном итоге ведет к образованию микротрещин, а следовательно и к падению прочности [52]. Это значит, что с увеличением количества воды в цементной системе ее прочность снижается.

На структурную прочность МЗБ влияет применение высокодисперсных наполнителей [45]. Математические расчеты показали, что при наполнении бетона значительным объемом микрочастиц в кривой прочности появляется экстремум, равный объему пористой структуры бетона без наполнителя. В этой работе [4] указывается, что на повышение прочности значительно влияет способ введение наполнителя. Экспериментальные исследования доказали, что при двухчастотном

режиме виброформования можно достичь наиболее плотной структуры бетона и получить прирост прочности по сравнению с обычным режимом виброформования в районе 35%.

## **Вывод по 1.2**

- 1) Теоретические предпосылки создания необходимых показателей свойств мелкозернистых бетонов исходит из особенностей структуры мелкозернистых бетонов: более плотные материалы обладают большей прочностью, чем материалы с крупнозернистой структурой. Размеры структурных элементов бетона оказывают большое влияние на свойства материала. Наибольшее значение для свойств бетона имеет микроструктура цементного камня, которая состоит из гидратных новообразований и микропор различных размеров.
- 2) Во многих исследованиях изучались закономерности изменения прочностных характеристик мелкозернистых бетонов. При этом обнаружили некоторые особенности: наибольшая прочность мелкозернистого бетона достигается при максимальной плотности бетонной смеси, что возможно при наилучшем соотношении между вяжущим и заполнителем. Отсюда следует, что регулируя соотношение количества вяжущего и заполнителя, а также водоцементное отношение, можно получить МЗБ с требуемыми прочностными характеристиками.

## **1.3 Аналитический обзор выполненных работ. Формирование целей и задач исследований**

Исследованиями Гершберга О.А., Баженова Ю.М., Ахвердова И.Н., Волженского А.В., Саталкина А.В., Кунцевича О.В., Шейкина А.Е., Комохова П.Г., Магдеева У.Х., Федосова С.В., Краснова А.М. и других

ученых установлено, что свойства мелкозернистого и обычного бетонов во многом определяются одними и теми же факторами. Однако мелкозернистые бетоны имеют и свои особенности, обусловленные их составом и структурой, для которой характерны бóльшая однородность и мелкозернистость, высокое содержание цементного камня, отсутствие жесткого скелета, повышенная пустотность, значительная величина контактной зоны заполнителя с цементным камнем и высокая удельная поверхность заполнителя. Эти показатели структуры мелкозернистого бетона обуславливают особенности его физико-механических свойств и основных технологических параметров получения. В частности, качество бетона в известной мере определяется плотностью упаковки зерен песка и прочностью сцепления с цементным камнем. Имеют свою специфику по влиянию на состав, свойства и технологию изготовления песчаных бетонов расход воды затворения, количество и вид вяжущего, качество песка, способы перемешивания, уплотнения и другие факторы.

В работах Михайлова Н.В. [47], Краснова И.М. [25], Львовича К.И. [22] и других ученых, изучавших мелкозернистые бетоны, указывается на применение в качестве заполнителя только крупных песков с  $M_{кр}$  не менее 2,5, так как применение мелкого песка может приводить к ухудшению структуры бетона вследствие повышенной удельной поверхности и менее плотной упаковки зерен.

Исследованиям в области модификации свойств бетона химическими добавками посвящены работы Баженова Ю.М., Батракова В.Г., Вознесенского В.А., Лященко Т.В., Комохова П.Г., Мчедлова-Петросяна О.П., Рамачандрана В.С., Ратинова В.Б., Розенберга Т.И., Ушерова-Маршака А.В. и других ученых. Структуру и свойства бетона изучали Ахвердов И.Н., Баженов Ю.М., Байков А.А., Берг О.Л., Боженков П.И., Бутт Ю.М., Волженский А.В., Горчаков Г.И., Миронов С.А., Мчедлов-Петросян О.П., Плугин А.Н., Плугин А.А., Рояк С.М., Рояк Г.С., Рыбьев И.А., Соломатов В.И., Шейкин А.Е., Юнг В.Н., Пауэрс и другие исследователи.

### **Выводы по главе, цель и задачи исследований.**

Учитывая вышеизложенное, целью настоящей диссертационной работы является разработка мелкозернистых бетонов высококачественной структуры с наименьшим расходом цемента и требуемым показателем свойств. Для достижения намеченной цели необходимо решить следующие задачи:

- анализ мирового опыта по разработке составов и технологии мелкозернистых бетонов;
- проведение комплекса исследований составляющих бетонных смесей, технических и технологических свойств бетонных смесей, физико-механических и эксплуатационных показателей бетонов;
- оптимизация составов бетонов высококачественной структуры;
- разработка рекомендации по использованию предлагаемой технологии.

### **Научная новизна работы:**

- обоснована возможность получения мелкозернистого бетона высококачественной структуры путем оптимального выбора состава песка, позволяющие сократить расход цемента;
- предложена технология изготовления мелкозернистых бетонов высококачественной структуры;
- показана возможность сокращения расхода цемента при оптимальном подборе состава заполнителя.

## Глава II. Характеристика исходных материалов и методы исследования.

### 2.1 Исследование качественных показателей составляющих бетонной смеси оптимального состава

А) Цемент – собирательное название большой группы гидравлических вяжущих веществ, которые обладают способностью твердеть и длительно сохранять свою прочность не только на воздухе, но и в воде. При исследовании цемента определяют такие свойства как:

– плотность – определяют с помощью прибора Ле-Шателье. Прибор наполняют обезвоженным керосином до нижней нулевой метки (по нижнему мениску), после чего верхнюю свободную от керосина часть прибора протирают тампоном из фильтровальной бумаги. Цемент массой около 150 г перед испытанием выдерживают в сушильном шкафу при температуре 105...110°C в течение 2 ч и затем охлаждают в эксикаторе. Для определения плотности от высушенного цемента отбирают пробу массой 65 г. с погрешностью не более 0,01 г. Плотность цемента вычисляют с погрешностью не более 0,1 г/см<sup>3</sup> как среднее арифметическое результатов двух измерений; расхождение между ними должно быть не более 0,02 г/см<sup>3</sup>.

– насыпную плотность цемента определяют с использованием сосуда вместимостью 1000 см<sup>3</sup> (1 л). Пробу цемента массой около 1,5 кг насыпают в стандартную воронку. Предварительно взвешенный мерный сосуд помещают под воронку, открывают задвижку и заполняют мерный сосуд с небольшим избытком. После заполнения сосуда цементом задвижку закрывают и металлической или деревянной линейкой осторожно срезают излишек цемента на уровне с краями сосуда, для чего линейку ставят по диаметру на края сосуда и срезают цемент в обе стороны. Сосуд должен быть неподвижным, так как при толчках цемент может уплотниться и насыпная плотность увеличится.

Затем сосуд с цементом взвешивают и, вычитая из полученного результата массу сосуда, находят массу цемента. Насыпную плотность цемента  $\rho_{\text{нас}}$  (кг/м<sup>3</sup>) вычисляют по формуле  $\rho_{\text{нас}} = (m/V) \cdot 1000$ , где  $m$  — масса цемента, г;  $V$  — объем сосуда, равный 1000 см<sup>3</sup>.

– тонкость помола цемента (ГОСТ 310.2-76\*) определяют по остатку на сите. Определение тонкости помола цемента по остатку на сите выполняют на приборе для механического или пневматического просеивания – ситовом анализаторе; при отсутствии этих приборов допускается производить ручное просеивание.

– нормальная густота цементного теста. Густоту цементного теста (ГОСТ 310.3-76\*) определяют на приборе Вика с пестиком.

– схватывание цемента — процесс загустевания цементного теста вследствие взаимодействия цемента с водой. Сроки схватывания определяют на цементном тесте нормальной густоты с помощью прибора Вика, но вместо пестика на конце стержня закрепляют иглу, а пестик устанавливают сверху; при этом масса подвижной части остается равной  $(300 \pm 2)$  г. Перед началом испытаний проверяют, свободно ли опускается стержень прибора, чистоту поверхности иглы и отсутствие ее искривлений, а также нулевое показание прибора.

Началом схватывания цементного теста считается время, прошедшее от начала затворения теста (момента приливания воды) до момента, когда игла не доходит до пластины на 1...2мм; концом схватывания — время от начала затворения до момента, когда игла опускается в тесто не более чем на 1...2 мм.

Б) Заполнители – составляя основную долю объема бетонов, существенно влияют на их свойства. Поэтому они должны отвечать определенным требованиям. В качестве заполнителя используется песок. При исследовании песка определяют такие свойства как:

- истинная плотность песка (без учета пор) в зависимости от минерального состава обычно находится в пределах 2,0...2,8 г/см<sup>3</sup>. Определение истинной плотности производят пикнометрическим методом или с помощью прибора Ле-Шателье.

- насыпная плотность песка в стандартном неуплотненном состоянии (с учетом пор). Для испытания применяют мерный цилиндрический сосуд внутренним диаметром 108 мм, высотой 108 мм и вместимостью 1 л. Сосуд взвешивают с погрешностью не более 1 г. Пробу песка массой от 5 до 10 кг высушивают до постоянной массы и просеивают сквозь сито с круглыми отверстиями диаметром 5 мм. Количество сухого просеянного песка должно быть не менее 4 кг. Высушенный песок насыпают в мерный сосуд с высоты 10 см до образования над верхом сосуда песчаного конуса. Конус без уплотнения песка срезают вровень с краями сосуда металлической линейкой, после чего сосуд с песком взвешивают.

- влажность - для испытания пробу песка массой 1 кг насыпают в противень (металлический сосуд) и сразу же взвешивают. Затем в этом противне песок высушивают до постоянной массы. Влажность песка W (%) вычисляют по формуле:

$$W = [(m_1 - m_2) / m_2] \cdot 100\%$$

где  $m_1$  – масса материала в естественно-влажном состоянии, г.;  $m_2$  – масса материала, высушенного до постоянной массы, г.

- определение зернового состава. Зерновым составом сыпучего материала называют выраженное в процентах или частях содержание в этом материале зерен определенного размера (фракций). Зерновой состав определяют просеиванием материала через набор сит, установленный стандартом на этот материал. Для испытания песка используют сита с отверстиями размером: 5; 2,5; 1,25; 0,63; 0,315 и 0,16 мм. При

просеивании через такой набор сит песок разделяется на фракции: 5...2,5; 2,5...1,25; 1,25...0,63; 0,63...0,315 и 0,315...0,16 мм. Зная зерновой состав песка, можно определить, к какой группе по крупности зерен относится исследуемый песок, и сделать заключение о его пригодности для бетонов.

– определение модуля крупности. Модуль крупности песка рассчитывают на основании данных его зернового состава по формуле:

$$M_k = (A_{2.5} + A_{1.25} + A_{0.63} + A_{0.315} + A_{0.14}) / 100$$

где  $A_{2.5} \dots A_{0.14}$  — полные остатки на ситах, %.

По модулю крупности и полному остатку на сите №063 определяют группу песка по крупности (ГОСТ 8736-93).

– содержание вредных примесей. К вредным примесям, содержание которых в песке ограничивается стандартами, относятся пылевидные, глинистые, илистые, органические и глина в комках. ГОСТ 8736-93 регламентирует максимально допустимое содержание пылевидных и глинистых примесей в песке в следующих пределах:

| Группа песка                            | Содержание пылевидных и глинистых частиц, % по массе, не более | Содержание глины в комках, % по массе не более |
|---|--|--|
| Повышенной крупности, крупный и средний | 2 (3)  | 0.25 (0.35)                                    |
| Мелкий                                  | 3 (5)  | 0.35 (0.50)                                    |

Примечание: перед скобками данные для природного песка, в скобках – данные для песка из отсевов дробления

В) Вода для приготовления бетонной смеси должна быть чистой, свежей, холодной. Качество используемой для приготовления бетона воды оказывает влияние на быстроту закрепления цемента. При определении качества воды используется органолептический метод, при котором

оценивается ее прозрачность и запах. Немаловажным фактором является температура используемой воды. Если бетон готовят летом, то больше подойдет холодная вода, т.к. при этом бетонная смесь будет лучше застывать. Если же бетон готовят зимой, то при этом рекомендуется использовать теплую воду, которую подогревают до  $38-40^{\circ}$ , чтобы жидкость не успела замерзнуть, пока бетонная масса не схватится. Если состав воды не известен, это может нанести непоправимый вред при приготовлении бетонной смеси. Наличие в воде сульфатов способствует разрушению и разъеданию бетона. Большую опасность при приготовлении бетона играет сернокислая вода.

По указанным стандартным методикам был произведен полный комплекс исследований составляющих проектируемого бетона. Полученные данные исследований отображены в соответствующих разделах диссертации как в табличной форме, так и при расчете составов бетонных смесей требуемых показателей свойств.

### **2.1.1. Подбор состава мелкозернистого бетона.**

Предварительный состав бетона, обеспечивающий получение заданной подвижности цементно-песчаной смеси и прочности бетона, рассчитывают в следующем порядке:

1. Определяют водоцементное отношение, необходимое для получения заданной марки бетона:  $V/C = AR_{ц}/(R_{б} + 0,8AR_{ц})$ ,

где  $V/C$  – водоцементное отношение, доли единицы;  $A$  – коэффициент, равный 0,8 для высококачественных материалов, 0,7 – для материалов среднего качества и 0,65 – для цемента низких марок и мелкого песка;  $R_{ц}$  – марка (активность) цемента, МПа;  $R_{б}$  – марка бетона в возрасте 28 суток, выдержанного в нормальных условиях, МПа.

2. Определяют по графикам (рис. 1) соотношение между цементом и песком, обеспечивающее заданную подвижность ( $R_K$ , мм) или жесткость

(Ж, с) цементно-песчаной смеси при определенном В/Ц. Графики построены для мелкозернистого бетона на песке с модулем крупности 2,5. При использовании песков с модулем крупности менее 2,5 необходимо произвести корректировку соотношения между цементом и песком по графику, приведенному на рис. 2.

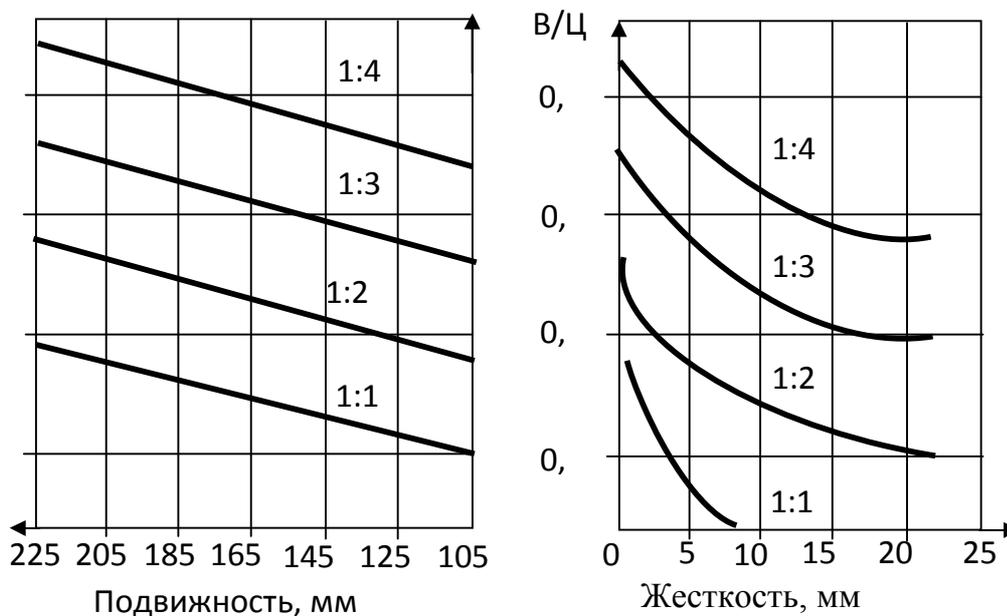


Рис.1. График для выбора соотношения между цементом и песком средней крупности

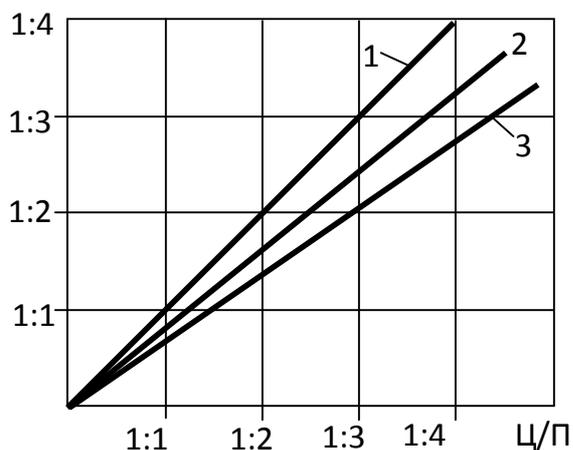


Рис.2. График для корректировки соотношения между цементом и мелким песком: 1 – Мкр = 2,5; 2 – Мкр = 1,5; 3 – Мкр = 0,75

3. Расход цемента определяют по формуле

$$Ц = 1000 / (1/\rho_{ц} = V/C + n/\rho_{п}),$$

где  $\Pi$  – расход цемента, кг на  $\text{м}^3$ ;  $\rho_{\text{ц}}$ ,  $\rho_{\text{п}}$  – истинные плотности цемента и песка, кг/л;  $n$  – доля песка, приходящаяся на долю цемента, определенная и скорректированная при необходимости по графикам.

4. Определяют расход воды.  $В = (В/\Pi)\Pi$ .

5. Рассчитывают расход песка.  $\Pi = n \cdot \Pi$ .

Объем пробного замеса – 2 л. На пробных замесах проверяют подвижность цементно-песчаной смеси по расплыву конуса в мм на встряхивающем столике (методика определения изложена в ГОСТ 310.4-81\*). Если полученная подвижность смеси не соответствует заданной, то вносят поправки в состав бетона. После этого определяют среднюю плотность свежееуложенной бетонной смеси, подсчитывают фактический объем замеса, объем вовлеченного воздуха и устанавливают окончательный расход материалов на  $1 \text{ м}^3$  бетонной смеси. Среднюю плотность бетонной смеси определяют по методике ГОСТ 10181.2-81.

Окончательный расход материалов определяют по формулам

$$W = 1000 \cdot \Pi_3 / V_3, \Pi = 1000 \cdot \Pi_3 / V_3, В = 1000 \cdot В_3 / V_3,$$

где  $\Pi_3$ ,  $\Pi_3$ ,  $В_3$  – расход соответствующего компонента на лабораторный замес, кг;

$V_3$  – фактический объем пробного замеса, л.

Из приготовленной цементно-песчанной смеси формируют образцы кубы  $7 \times 7 \times 7$  см, которые до испытания либо твердеют в естественных условиях, либо подвергаются тепловлажностной обработке. После затвердения образцы взвешивают, измеряют их геометрические размеры, подсчитывают среднюю плотность бетона и испытывают на сжатие. Подсчитав плотность бетона, строят графическую зависимость плотности и прочности бетона от водоцементного отношения и соотношения между цементом и песком, по которым делают соответствующие выводы о качестве подобранных составов мелкозернистого бетона (рис.3).

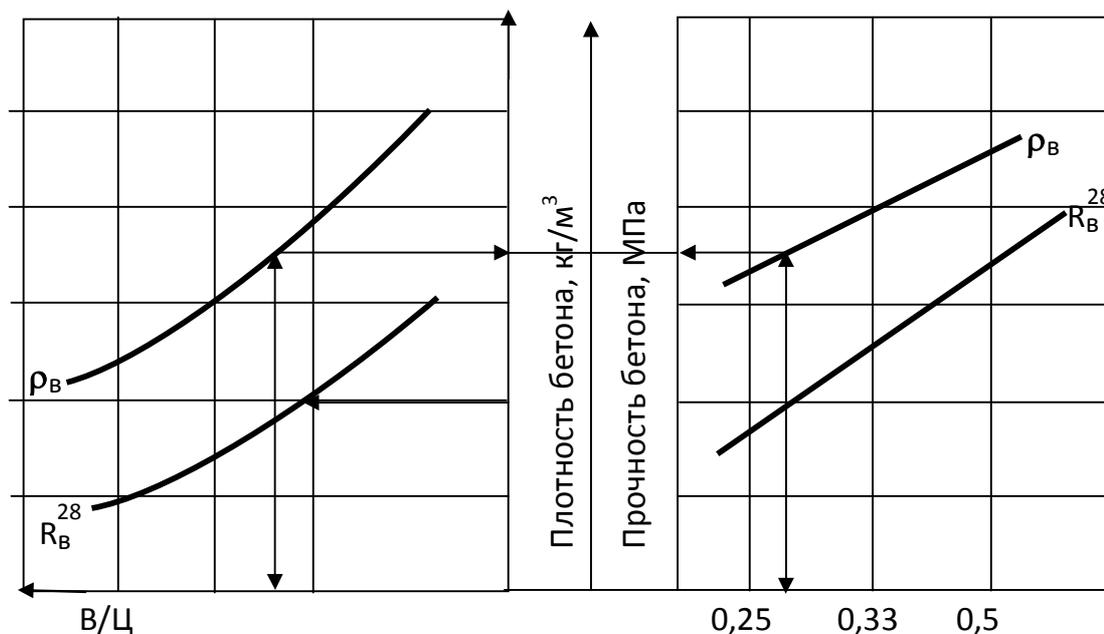


Рис. 3. Зависимость свойств мелкозернистого бетона от состава смеси

После построения сводного графика (рис.3) по нему определяется фактический состав мелкозернистого бетона заданной прочности ( $R_{\text{в}}^{28}$ ) построение на графике показано стрелками, которые начинаются с точки, обозначающей заданную прочность ( $R_{\text{в}}^{28}$ ). Определяется В/Ц и Ц/П отношения и средняя плотность мелкозернистого бетона.

### 2.1.2. Характеристика исходных материалов

Цемент – порошкообразный строительный вяжущий материал, который обладает гидравлическими свойствами, состоит из клинкера и, при необходимости, гипса или его производных добавок ГОСТ 30515-97.

Цемент мелкоизмельченный минеральный порошок, который в соединении с водой образует довольно пластичное вещество, способное впоследствии к затвердеванию в камневидное тело.

В качестве вяжущего был использован рядовой портландцемент марки 400 Ахангаранского цементного комбината. Физико-механические характеристики портландцемента приведены в табл. 2.1

Таблица 2.1

Физико-механические характеристики портландцемента

| №№<br>п/п | Наименование<br>показателей   | Ед.<br>изм.       | Количественное<br>выражение |
|-----------|---|-------------------|-----------------------------|
| 1         | Насыпная плотность  | кг/м <sup>3</sup> | 1230                        |
| 2         | Нормальная густота цементного теста   | %                 | 26,0                        |
| 3         | Сроки схватывания: начало   | мин               | 1ч 10 мин.                  |
|           | Конец   | мин               | 8ч 30 мин.                  |
| 5         | Тонкость помола (прохождение через сито 0,008 м)  | %                 | 85,0                        |
| 8         | Предел прочности через 28 сут. Твердения в нормальных условиях:<br>при сжатии:<br>при изгибе: | МПа               | 41,2                        |
|           |   |                   | 6,3                         |

Физико-механические характеристики определяли согласно действующих ГОСТ. Химический и минералогический состав портландцемента приведены в табл. 2.2 и 2.3.

Таблица 2.2

Химический состав клинкера портландцемента, %

| SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | MgO  | п.п.п. |
|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|--------|
| 22,12            | 4,54                           | 4,17                           | 65,79 | 1,71 | 0,2    |

По своим физическим и физико-механическим показателям свойств Ахангаранский портландцемент использованный в исследованиях удовлетворяет ГОСТ 10178-85 «Портландцемент и шлакопортландцемент». Технические требования и по активности соответствует марке М400.

Таблица 2.3

## Минералогический состав портландцемента, %

| C <sub>3</sub> S | C <sub>2</sub> S | C <sub>3</sub> A | C <sub>4</sub> AF |
|------------------|------------------|------------------|-------------------|
| 57.5%            | 17.8%            | 4.7%             | 12.5%             |

Песок представляет собой рыхлую смесь зерен крупностью до 5 мм, образовавшуюся в результате разрушения горных пород, или полученную в результате дробления горных пород. В качестве заполнителя использовали строительный песок Куйлюкского карьера с модулем крупности  $M_{кр}=2,5$  согласно ГОСТ 8736-85.

Фракционный состав и физические свойства песка Куйлюкского карьера приведены в табл. 2.4.

Таблица 2.4

## Характеристики принятых исследованию песка

| Гранулометрический состав |                    |                    |                   | Модуль крупности | Средняя насыпная плотность г/см <sup>3</sup> | Содержание глинистых и пыл. частиц | Содержание органических примесей                |
|---------------------------|--------------------|--------------------|-------------------|------------------|--|------------------------------------|---|
| Размер                    | Остаток на сите, г | Частный остаток, % | Полный остаток, % |                  |  |                                    |   |
| 2,5                       | 930                | 18,6               | 18,6              | 2,5              | 1,506  | 1,1                                | Жидкость оставшаяся над песком, светлее эталона |
| 1,25                      | 420                | 8,4                | 27                |                  |  |                                    |   |
| 0,63                      | 665                | 13,3               | 40,3              |                  |  |                                    |   |
| 0,315                     | 1420               | 28,4               | 68,7              |                  |  |                                    |   |
| 0,14                      | 1320               | 26,4               | 95,1              |                  |  |                                    |   |
| Прошло сквозь сито 0,14   | 165                | 4,9                | 100               |                  |  |                                    |   |

## Определение пустотности заполнителей

Пустотностью заполнителя называют выраженное в процентах отношение объема межзерновых пустот ко всему объему, занимаемому

заполнителем без его уплотнения. Это важная характеристика заполнителя, так как она влияет на расход цемента в бетоне. Пустотность зависит от формы зерен заполнителя и их размеров и составляет для песка 25 – 40 %.

Пустотность заполнителя  $V_n$ , % можно определить двумя методами:

1. На основании предварительно установленных характеристик

заполнителя:

$$V_n = \left(1 - \frac{\rho_n}{\rho_{ис} \cdot 1000}\right) \cdot 100$$

где  $\rho_n$  — насыпная плотность песка, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{ис}$  — истинная плотность песка, г/см<sup>3</sup>.

2. Заполнитель засыпают в цилиндр (для щебня 2 л, песка 1 л) до верха и заливают водой. После 30 мин выдержки цилиндр накрывают ситом с диаметром отверстий 0,14 мм и опрокидывают для стекания воды. Цилиндр с водонасыщенным заполнителем взвешивают, не снимая с весов доливают водой до самого верха и снова взвешивают. Пустотность заполнителя  $V_n$ , %

$$V_n = \frac{m_2 - m_1}{V} \cdot 100$$

где  $m_1$  — масса цилиндра с водонасыщенным заполнителем, кг;  $m_2$  — масса цилиндра с заполнителем и водой, кг;  $V$  — объем цилиндра, л.

## **2.2 Изучение процесса структурообразования мелкозернистых бетонов оптимальной структуры**

Качество бетона зависит от правильности выбора составляющих бетонной смеси и проектирования состава бетона. Расчет состава бетонной смеси заключается в установлении наиболее рационального соотношения между составляющими бетон материалами (цементом, водой и песком).

Сравнительные исследования на смесях песка различного гранулометрического состава представлены в сериях проведенных нами экспериментов:

Этап 1. Приготовление бетона из песка естественного сложения (эталонный образец).

1) Насыпная плотность:

| Фракции<br>m (гр.)                       | 0.14 | 0.315 | 0.63 | 1.25 | 2.5  |
|--|------|-------|------|------|------|
| m <sub>1</sub>                           | 1490 | 1520  | 1525 | 1470 | 1480 |
| m <sub>2</sub>                           | 1490 | 1525  | 1545 | 1470 | 1495 |
| m <sub>3</sub>                           | 1500 | 1520  | 1540 | 1475 | 1480 |
| m <sub>ср</sub>                          | 1494 | 1522  | 1537 | 1472 | 1485 |
| $\rho_{\text{нас.}}$ , кг/м <sup>3</sup> | 1494 | 1522  | 1537 | 1472 | 1485 |

$$\rho_{\text{нас.}} = m_{\text{ср}} / V, \text{ где } V = 1 \text{ л.}$$

2) Истинная плотность:

| Фракции<br>V                             | 0.14 | 0.315 | 0.63 | 1.25 | 2.5  |
|--|------|-------|------|------|------|
| V, м <sup>3</sup>                        | 320  | 320   | 315  | 320  | 320  |
| $\rho_{\text{ист.}}$ , кг/м <sup>3</sup> | 2500 | 2500  | 2608 | 2500 | 2500 |

$$\rho_{\text{ист}} = m_{\text{пес.}} / (V-200), \text{ где } m_{\text{пес.}} = 300 \text{ гр.}$$

3) Пустотность песка:

$$V_n = \left(1 - \frac{\rho_n}{\rho_{\text{ис}} \cdot 1000}\right) \cdot 100$$

$$V_{0.14} = \left(\frac{2500-1494}{2500}\right) \cdot 100 = 40.24\% ; \quad V_{0.315} = \left(\frac{2500-1522}{2500}\right) \cdot 100 = 39.12\%$$

$$V_{0.63} = \left(\frac{2608-1537}{2608}\right) \cdot 100 = 41.0\% ; \quad V_{1.25} = \left(\frac{2500-1472}{2500}\right) \cdot 100 = 41,12\% ;$$

$$V_{1.25} = \left(\frac{2500-1485}{2500}\right) \cdot 100 = 40,6\% ;$$

$$V_{\text{общ.}} = \left(\frac{2564-1506}{2564}\right) \cdot 100 = 42,0\% ;$$

На основании расчета состава бетонов на  $1\text{ м}^3$  бетонной смеси для проведения экспериментов в лабораторных условиях произвели перерасчет на 1.03 литров для определения предела прочности при сжатии стандартных бетонных кубов разлитом  $7 \times 7 \times 7$  см:

$C=1,305$  кг.

$P=4,569$  кг.

$B=0,750$  л.

Приготовление бетонной смеси осуществляли в следующем порядке:

Шаг 1. Наливаем воды. В зависимости от влажности песка может понадобиться добавить воду дополнительно.

Шаг 2. Засыпаем цемент. Во время засыпки постоянно производим помешивание смеси воды и цемента до получения однородной массы.

Шаг 3. Засыпаем песок и хорошо перемешиваем минимум 3-4 минуты.

Приготовленная бетонная смесь перед уплотнением на вибростолу исследовалась на стандартном конусе с целью определения осадки конуса.

Марку бетона после твердения в нормальных тепловлажностных условиях определяли испытанием на осевое сжатие бетонных образцов-кубов размерами  $7 \times 7 \times 7$  см. Полученный при испытании предел прочности при сжатии, выраженный в  $\text{кгс}/\text{см}^2$ , является численной характеристикой марки. Для нормального твердения бетона необходима положительная температура  $20 (\pm 2)^\circ\text{C}$  с относительной влажностью окружающего воздуха не менее 90%. Методы определения прочности бетона регламентированы ГОСТ 10180-2012.

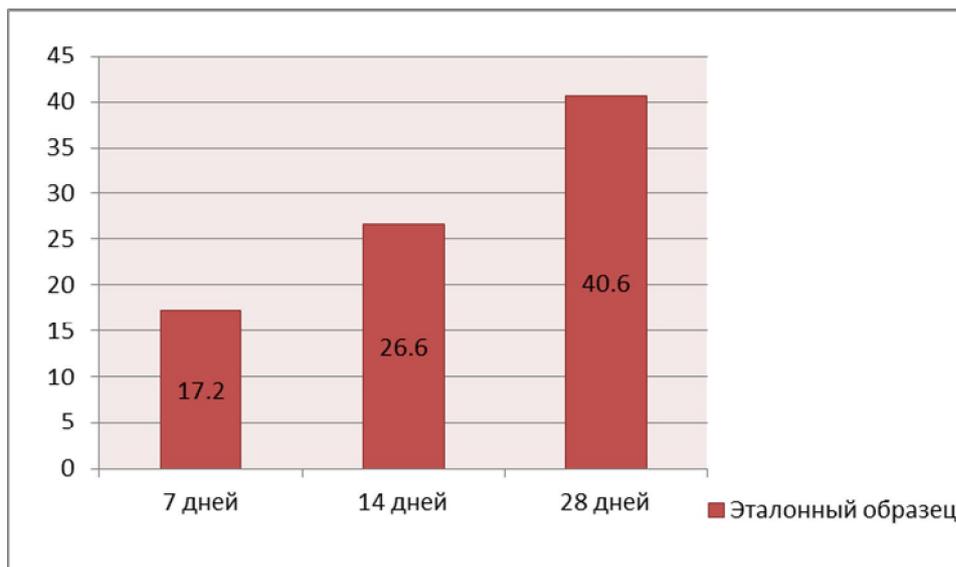
Результаты первого этапа испытаний бетона в возрасте 7, 14 и 28 суток твердения представлены в табл. 2.5 и диаграмме 1:

Таблица 2.5

|      | №№       | a, см | b, см | h, см | m, кг | Вес, Н | R, $\text{кг}/\text{см}^2$ |
|------|----------|-------|-------|-------|-------|--------|----------------------------|
| 7 д. | <u>1</u> | 7     | 7     | 7     | 0,73  | 950    | 19,4                       |
|      | <u>2</u> | 7     | 7     | 6,7   | 0,68  | 700    | 14,3                       |

|       |                                 |     |     |     |       |      |      |
|-------|---------------------------------|-----|-----|-----|-------|------|------|
|       | <u>3</u>                        | 7,1 | 7,1 | 6,8 | 0,7   | 900  | 17,8 |
|       | $R_{cp} = 17,2 \text{ кг/см}^2$ |     |     |     |       |      |      |
| 14 д. | <u>1</u>                        | 7,1 | 6,8 | 6,7 | 0,685 | 1200 | 24,8 |
|       | <u>2</u>                        | 7,0 | 6,9 | 6,9 | 0,71  | 1500 | 31,0 |
|       | <u>3</u>                        | 6,9 | 6,9 | 7,1 | 0,735 | 1150 | 24,1 |
|       | $R_{cp} = 26,6 \text{ кг/см}^2$ |     |     |     |       |      |      |
| 28 д. | <u>1</u>                        | 7   | 6,9 | 7   | 0,695 | 1950 | 40,4 |
|       | <u>2</u>                        | 6,9 | 6,9 | 7,0 | 0,710 | 1900 | 40,0 |
|       | <u>3</u>                        | 6,9 | 7   | 6,9 | 0,715 | 2000 | 41,4 |
|       | $R_{cp} = 40,6 \text{ кг/см}^2$ |     |     |     |       |      |      |

Диаграмма 1



Необходимо добиться наименьшей пустотности песка, так как это важная характеристика заполнителя и она влияет на расход цемента в бетоне. Пустотность зависит от формы зерен заполнителя и их размеров. Путем оптимизации зернового состава песка выберем вариант самой наименьшей пустотности. Образец №1:

| Эталонный образец  | Пробный образец №1              |
|--------------------|---------------------------------|
| $a_{2,5} = 18,6\%$ | $a_{2,5} = 18,6\%$              |
| $a_{1,25} = 8,4\%$ | $a_{1,25} = 23,4\% \quad +15\%$ |

|                      |                                 |
|----------------------|---------------------------------|
| $a_{0,63} = 13,3\%$  | $a_{0,63} = 13,3\%$             |
| $a_{0,315} = 28,4\%$ | $a_{0,315} = 28,4\%$            |
| $a_{0,14} = 26,4\%$  | $a_{0,14} = 11,4\% \quad -15\%$ |

Насыпная плотность:  $\rho_{\text{нас.}} = 1520 \text{ кг/м}^3$ .

Истинная плотность:  $\rho_{\text{ист.}} = 2500 \text{ кг/м}^3$ .

Пустотность песка:  $V = \left( \frac{2500-1520}{2500} \right) \cdot 100\% = 39.2\%$

Образец №2:

| Эталонный образец    | Пробный образец №1               |
|----------------------|----------------------------------|
| $a_{2,5} = 18,6\%$   | $a_{2,5} = 18,6\%$               |
| $a_{1,25} = 8,4\%$   | $a_{1,25} = 28,4\% \quad +20\%$  |
| $a_{0,63} = 13,3\%$  | $a_{0,63} = 13,3\%$              |
| $a_{0,315} = 28,4\%$ | $a_{0,315} = 18,4\% \quad -10\%$ |
| $a_{0,14} = 26,4\%$  | $a_{0,14} = 16,4\% \quad -10\%$  |

Насыпная плотность:  $\rho_{\text{нас.}} = 1485 \text{ кг/м}^3$ .

Истинная плотность:  $\rho_{\text{ист.}} = 2542 \text{ кг/м}^3$ .

Пустотность песка:  $V = \left( \frac{2542-1485}{2542} \right) \cdot 100\% = 41.5\%$

Образец №3:

| Эталонный образец    | Пробный образец №1              |
|----------------------|---------------------------------|
| $a_{2,5} = 18,6\%$   | $a_{2,5} = 18,6\%$              |
| $a_{1,25} = 8,4\%$   | $a_{1,25} = 23,4\% \quad +15\%$ |
| $a_{0,63} = 13,3\%$  | $a_{0,63} = 13,3\%$             |
| $a_{0,315} = 28,4\%$ | $a_{0,315} = 23,4\% \quad -5\%$ |
| $a_{0,14} = 26,4\%$  | $a_{0,14} = 16,4\% \quad -10\%$ |

Насыпная плотность:  $\rho_{\text{нас.}} = 1512 \text{ кг/м}^3$ .

Истинная плотность:  $\rho_{\text{ист.}} = 2542 \text{ кг/м}^3$ .

Пустотность песка:  $V = \left( \frac{2542-1512}{2542} \right) \cdot 100\% = 40.5\%$

Образец №4:

| Эталонный образец    | Пробный образец №1       |
|----------------------|--------------------------|
| $a_{2,5} = 18,6\%$   | $a_{2,5} = 18,6\%$       |
| $a_{1,25} = 8,4\%$   | $a_{1,25} = 28,4\%$ +20% |
| $a_{0,63} = 13,3\%$  | $a_{0,63} = 13,3\%$      |
| $a_{0,315} = 28,4\%$ | $a_{0,315} = 23,4\%$ -5% |
| $a_{0,14} = 26,4\%$  | $a_{0,14} = 11,4\%$ -15% |

Насыпная плотность:  $\rho_{\text{нас.}} = 1500 \text{ кг/м}^3$ .

Истинная плотность:  $\rho_{\text{ист.}} = 2608 \text{ кг/м}^3$ .

Пустотность песка:  $V = \left( \frac{2608 - 1500}{2608} \right) \cdot 100\% = 42.0\%$

Этап 2. Из всех образцов, выбираем образец №1, так как имеет наименьшую пустотность относительно эталонного и других образцов.

| Эталонный образец    | Пробный образец №1       |
|----------------------|--------------------------|
| $a_{2,5} = 18,6\%$   | $a_{2,5} = 18,6\%$       |
| $a_{1,25} = 8,4\%$   | $a_{1,25} = 23,4\%$ +15% |
| $a_{0,63} = 13,3\%$  | $a_{0,63} = 13,3\%$      |
| $a_{0,315} = 28,4\%$ | $a_{0,315} = 28,4\%$     |
| $a_{0,14} = 26,4\%$  | $a_{0,14} = 11,4\%$ -15% |

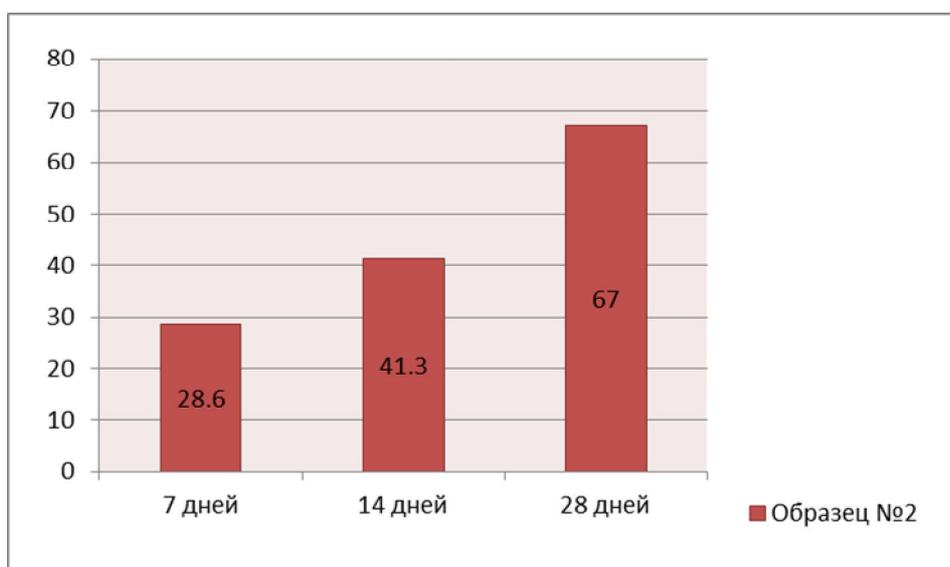
Результаты второй серии испытаний бетона в возрасте 7, 14 и 28 суток твердения представлены в табл. 2.6 и диаграмме 2:

Таблица 2.6

|      | №№                                      | a, см | b, см | h, см | m, кг | Вес, Н | R, кг/см <sup>2</sup> |
|------|---|-------|-------|-------|-------|--------|-----------------------|
| 7 д. | <u>1</u>                                | 7,1   | 6,9   | 6,8   | 0,700 | 1350   | 27,5                  |
|      | <u>2</u>                                | 7,7   | 7     | 7,1   | 0,785 | 1400   | 26,0                  |
|      | <u>3</u>                                | 7,0   | 7,1   | 6,9   | 0,740 | 1600   | 32,2                  |
|      | $R_{\text{ср.}} = 28,6 \text{ кг/см}^2$ |       |       |       |       |        |                       |

|       |                                 |     |     |     |       |      |      |
|-------|---------------------------------|-----|-----|-----|-------|------|------|
| 14 д. | <u>1</u>                        | 7   | 7   | 6,6 | 0,700 | 1900 | 38,8 |
|       | <u>2</u>                        | 7,1 | 7,2 | 6,8 | 0,725 | 2200 | 43,0 |
|       | <u>3</u>                        | 7,0 | 6,6 | 6,9 | 0,685 | 1950 | 42,2 |
|       | $R_{cp} = 41,3 \text{ кг/см}^2$ |     |     |     |       |      |      |
| 28 д. | <u>1</u>                        | 7   | 7   | 6,9 | 0,700 | 3300 | 67,0 |
|       | <u>2</u>                        | 7,0 | 6,9 | 7,0 | 0,715 | 3200 | 66,0 |
|       | <u>3</u>                        | 7   | 6,9 | 7   | 0,710 | 3300 | 68,0 |
|       | $R_{cp} = 67,0 \text{ кг/см}^2$ |     |     |     |       |      |      |

Диаграмма 2



Теперь, когда мы добились увеличения прочности путем оптимизации зернового состава и уменьшения пустотности, необходимо приготовить бетон со сниженным расходом цемента на 10-15%.

Этап 3. Приготовление мелкозернистого бетона оптимального состава со сниженным расходом цемента на 15%. В данном случае, мы оставляем фракционный состав предыдущего этапа, при этом уменьшаем количество цемента на 15%. В итоге получаем расход материалов на замес:

Ц=1,11 кг.

П=4,569 кг.

$V=0,900$  л.

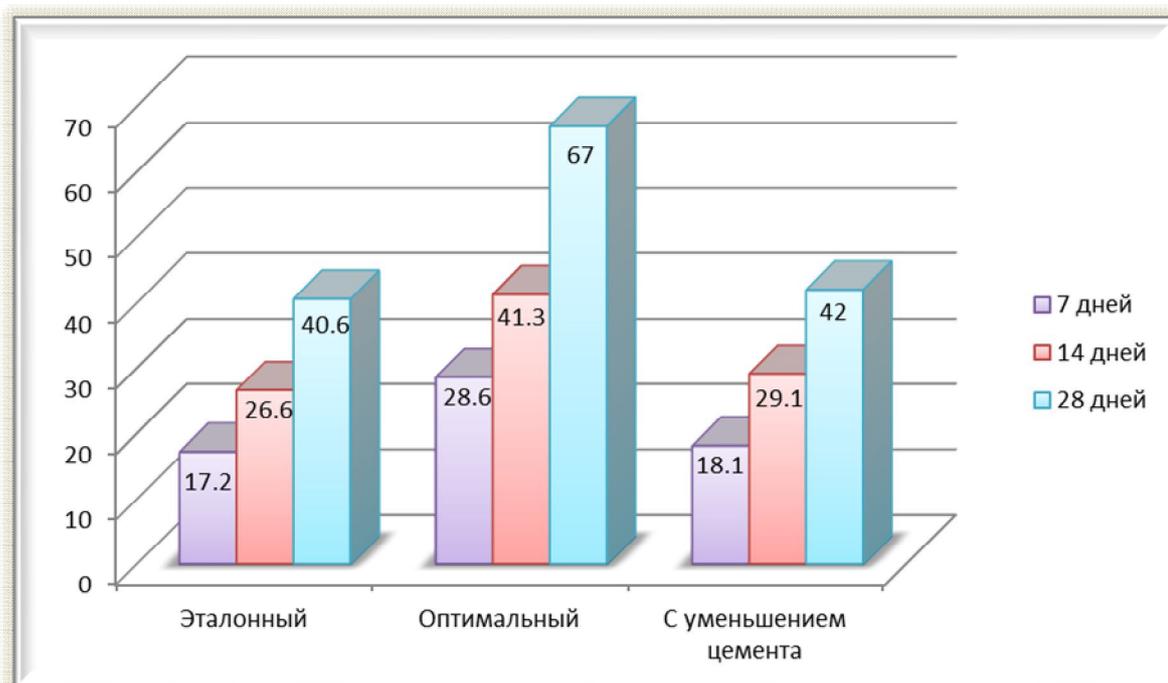
Результаты третьей серии испытаний бетона в возрасте 7, 14 и 28 суток твердения представлены в табл. 2.7:

Таблица 2.7

|       | №№                                 | a, см | b, см | h, см | m, кг | Вес, Н | R, кг/см <sup>2</sup> |
|-------|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|-----------------------|
| 7 д.  | <u>1</u>                           | 7,1   | 6,9   | 7     | 0,710 | 800    | 16,3                  |
|       | <u>2</u>                           | 6,9   | 7,3   | 6,9   | 0,745 | 900    | 17,9                  |
|       | <u>3</u>                           | 7,0   | 7,1   | 7,0   | 0,735 | 1000   | 20,1                  |
|       | $R_{cp} = 18,1$ кг/см <sup>2</sup> |       |       |       |       |        |                       |
| 14 д. | <u>1</u>                           | 7     | 6,8   | 6,9   | 0,725 | 1500   | 31,5                  |
|       | <u>2</u>                           | 7     | 6,9   | 6,9   | 0,715 | 1350   | 28,0                  |
|       | <u>3</u>                           | 7,2   | 7,0   | 7,1   | 0,740 | 1400   | 27,8                  |
|       | $R_{cp} = 29,1$ кг/см <sup>2</sup> |       |       |       |       |        |                       |
| 28 д. | <u>1</u>                           | 7     | 7     | 6,9   | 0,700 | 2000   | 41,0                  |
|       | <u>2</u>                           | 7,0   | 6,9   | 7,0   | 0,715 | 2050   | 42,0                  |
|       | <u>3</u>                           | 7     | 6,9   | 7     | 0,710 | 2100   | 43,0                  |
|       | $R_{cp} = 42,0$ кг/см <sup>2</sup> |       |       |       |       |        |                       |

Анализ таблиц показывает, что в результате оптимизации состава бетона со сниженным на 15% долей цемента удается достичь необходимой прочности проектируемого бетона, что наглядно видно из диаграммы 3:

Диаграмма 3



## Выводы по главе II

1. Разработаны оптимальные составы изготовления мелкозернистых бетонов высококачественной структуры;
2. Оптимизация зернового состава песка обеспечила достижение необходимых прочностных показателей проектируемого бетона.
3. Показана возможность сокращения расхода цемента на 10-15% при оптимальном подборе состава заполнителя.

## Глава III. Техничко-экономическое обоснование предлагаемой разработки

Узбекистан планирует нарастить производство цемента до 8.9 млн. тонн к 2020 году, увеличивая ежегодное производство на 3.5%. По данным официальной статистики, производство цемента в Узбекистане на текущий год составляет 7.8 млн. тонн. Несмотря на то, что в республике наблюдается тенденция к увеличению производства цемента, вопрос

разработки эффективных технологий цементосбережения является актуальным. Ниже приведен расчет экономической эффективности предлагаемой технологии бетона.

#### Расчет экономической эффективности предлагаемой разработки

При выполнении расчета экономической эффективности были использованы сметные, а также среднерыночные цены на материалы и затраты в Узбекистане по региону города Ташкента на апрель 2016 г. Исходные данные для расчета экономической эффективности приведены в табл. 3.1

#### Стоимость сырьевых материалов для приготовления 1м<sup>3</sup> бетона.

Таблица 3.1

| № п/п | Вид материалов | Единица измерения | Стоимость в тыс.суммов |
|-------|----------------|-------------------|------------------------|
| 1     | Песок          | м <sup>3</sup>    | 60,000                 |
| 2     | Цемент         | м <sup>3</sup>    | 400,000                |

Основываясь на стоимостные показатели компонентов бетонной смеси (табл.) произведем расчет экономической эффективности предлагаемых составов бетонов (табл.). В расчетах затрат ориентировались только на рыночную стоимость компонентов без учета расхода воды. Также в расчетах не использовались трудовые, энергетические и др. виды расходов.

#### Расчет затрат для получения 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси (эталонный и оптимальный образцы)

Таблица 3.2

| № п/п | Вид материалов              | Единица измерения | Цена за единицу измерения, тыс.сум. | Расход на 1 м <sup>3</sup> бетонной смеси | Стоимость на 1 м <sup>3</sup> в тыс. сум. |
|-------|-----------------------------|-------------------|-------------------------------------|---|---|
|       | <b>Мелкозернистый бетон</b> |                   |                                     |   | 210,552                                   |
| 1     | Песок                       | кг                | 24                                  | 1523                                      | 36,552                                    |
| 2     | Цемент                      | кг                | 400                                 | 435                                       | 174,000                                   |

Расчет затрат для получения 1м<sup>3</sup> бетонной смеси (с уменьшением цемента на 15%)

Таблица 3.3

| № п/п | Вид материалов              | Единица измерения | Цена за единицу измерения, тыс.сум. | Расход на 1 м <sup>3</sup> бетонной смеси | Стоимость на 1 м <sup>3</sup> в тыс. сум. |
|-------|-----------------------------|-------------------|-------------------------------------|---|---|
|       | <b>Мелкозернистый бетон</b> |                   |                                     |   | 184,452                                   |
| 1     | Песок                       | кг                | 24                                  | 1523                                      | 36,552                                    |
| 2     | Цемент                      | кг                | 400                                 | 369,75                                    | 147,900                                   |

### **Выводы по главе III.**

1. Показано, что оптимизация зернового состава заполнителя позволяет получать равнопрочные бетоны со сниженным на 10-15% расходом цемента.
2. Разработанные оптимальные составы мелкозернистых бетонов высококачественной структуры позволяют экономить порядка 12% тыс. сумм на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси.

#### **Глава IV. Разработка рекомендаций по исследованию предлагаемой технологии мелкозернистого бетона высококачественной структуры**

1. Настоящие “Рекомендации по оптимизации заполнителя в мелкозернистых бетонах высококачественной структуры” разработаны на основании исследовательских работ, выполненных в лаборатории ТашИИТ.

2. В качестве вяжущих для приготовления бетонных смесей рекомендуются портландцементы М400 Ахангаранского цементного комбината, удовлетворяющие требованиям ГОСТ 26633-91.

3. В качестве заполнителя рекомендуется песок с модулем крупности не менее 2,0, удовлетворяющий требованиям ГОСТ 8736-93 и ГОСТ 26633-91.

4. Вода для приготовления бетона должна удовлетворять требованиям ГОСТ 23732-79.

5. Приготовление бетонной смеси осуществляется в бетонном узле предприятия в соответствии с требованиями СНиП 3.09.01-85.

6. Дозирование цемента песка и воды производится в соответствии с существующей на предприятии технологией.

7. Номинальные расходы материалов на приготовление 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси производится в соответствии с ГОСТ 27006-86. Корректировка составов бетонных смесей осуществляется по результатам производственных испытаний.

8. Перемешивание бетонной смеси осуществляется в соответствии с существующей на предприятии технологией.

9. Контроль качества цемента производится по ГОСТ 310.1-76 – ГОСТ 310.3-76 и ГОСТ 310.4-84; определяются сроки схватывания, нормальная густота, активность цемента – от каждой партии.

10. Контроль качества песка осуществляется по ГОСТ 8735-88; определяются зерновой состав, модуль крупности, насыпная и истинная плотности, влажность, содержание пылистых и глинистых примесей – от каждой партии.

11. Контроль качества приготовления бетонной смеси осуществляется лабораторией не менее 2-х раз в смену; проверяются точность дозировки компонентов – визуально по дозаторам или по распечатке на ЭВМ, продолжительность перемешивания – секундомером, удобоукладываемость (подвижность) бетонной смеси – по ГОСТ 10181-2000 – 2 раза в смену.

12. Прочность бетона на сжатие определяется по ГОСТ 10180-90 на образцах-кубах размером 70×70×70 мм. 1 раз в смену.

13. При производстве изделий должны соблюдаться общие правила охраны труда и техники безопасности по приготовлению бетонных смесей.

## Общие выводы

1. В работе обоснована возможность повышения прочности проектируемого бетона относительно аналога, за счет оптимизации состава мелкого заполнителя (песка) с позицией формирования минимальной пустотности.
2. Путем оптимизации в определенных пределах гранулометрического состава песка достигнута минимальная пустотность образуемая мелким заполнителем.
3. Экспериментально установлен номинальный состав бетона, обеспечивающий необходимые физико-механические показатели.
4. Установлено, что за счет варьирования фракционного состава песка появляется возможность экономии цемента на 15% без снижения прочностных показателей против эталонного образца.
5. Проведенными расчетами показана экономическая эффективность предлагаемой разработки. Экономия денежном выражении составляет 20-25 тыс. сум. на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси в зависимости от предлагаемой комбинации состава мелкозернистого бетона.
6. Разработан технический регламент на приготовление бетонных смесей по предлагаемой технологии.

## Список использованной литературы

1. Fr. Coignet. Betón agglomerés appliqués à l'art de construire, 1861 378p
2. Житкевич Н.А. Бетон и бетонные работы. – СПб, 1992, 524с
3. Волженский А.В., Иванов И.А., Виноградов Б.Н. Применение зол и топливных шлаков в производстве строительных материалов. – М.: Стройиздат, 1984. 254с.
4. Волженский А.В., Чистов Ю.Д., Борисюк Е.А. Улучшение поровой структуры песчаного бетона введением тонкодисперсных песков. Строительные материалы-1989, №5, с.27-28.
5. Волженский А.В. Минеральные вяжущие вещества. –М.: Стройиздат, 1986, 464 с.
6. Волженский А.В., Гольденберг Л.Б. Активация отвалных зол для производства золоцементнопесчаных изделий //Строительные материалы -1977.,№4,с.25
7. Баженов Ю.М., Магдеев У.Х., Алимов Л.А., Воронин В.В., Гольденберг Л.Б. Мелкозернистый бетон. – М., 1998,148с.
8. Баженов Ю.М. Высокопрочный бетон для армоцементных конструкций.-М.: Госстройиздат, 1963, 128с.
9. Васильева Н.Ф., Клементьева В.С., Ладыгина И.Р. Материалы и изделия на основе фосфатных связующих // Сб. научных трудов ГИС-ГНЦ «Строительство». – М.:Госстрой России, 1997. – с.40-52.
- 10.Новое в технологии жаростойких бетонов / Под редакцией К.Д. Некрасова. – М.:НИИЖБ, 1981.-123с.
- 11.Огнеупорные бетоны / Под редакцией Замятина С.Р., Пургина А.К., и др. – М: Металлургия, 1982.-177с.
- 12.Тарасова А.П. Жаростойкие вяжущие на жидком стекле и бетоны на их основе. – М.: Стройиздат, 1982. – 131с.
- 13.Черкинский Ю.С. Полимерцементный бетон. – М.: Стройиздат, 1984.-213с.

14. Павленко С.И. Мелкозернистый бетон литой консистенции на основе шлака и золы ТУ ГРЭС. «Наука – строительному производству». Сборник тезисов докладов научно-технической конференции ученых Сибири и Дальнего Востока. Новокузнецк, 1989, 238с.
15. Микульский В.Г., Горчаков Г.И., Козлов В.В., Купричнов В.Н., Орендлихер Л.П., Рахимов р.з., Сахаров Г.П., Хрулев В.М. Строительные материалы. – М.: АСВ, 1996-488с.
16. История строительного материаловедения и развития технологий строительных материалов и изделий / Под редакцией И.А. Рыбьева. – М: МИКХиС, 2001.177с
17. Лесович Р.В. Мелкозернистые бетоны для дорожного строительства с использованием отходов мокрой магнитной сепарации железистых кварцитов : Автореферат диссертации к.т.н.- Белгород, 2002.-26с
18. Салл М., Рыбинцева Е.С., Ткаченко Г.А. Мелкозернистые бетоны с органоминеральной добавкой для дорожного строительства.
19. Любимова Т.Ю., Пинус Э.Р. Процессы кристаллизационного структурообразования в зоне контакта между заполнителем и вяжущем в цементном бетоне. //Коллоидный журнал, 1962, т.24, №5, 89с.
20. Филиппова Н.В. Стеклофибробетон // Строительные материалы XXI века – 1999. - № 4 с. 38-39
21. Патент №2473492 Российская Федерация, МПК С04В28/04 С04В111/20. Мелкозернистый бетон. / Хозин В.Г., Мугинов Х.Г., Морозов Н.М., Степанов С.В. / Опубликовано: 27.01.2013
22. Патент №2165394 Российская Федерация, МПК С04В28/02. Способ приготовления бетонных смесей для получения крупнопористых мелкозернистых бетонов низких марок. / Львович К.И. / Опубликовано: 20.04.2001

- 23.Баженов Ю.М. Способы определения состава бетонов различных видов. М. СИ. 1975 С. 168-172.
- 24.Патент №2039646 Российская Федерация В28В1/08. Техника производства строительных изделий из мелкозернистых жестких бетонов, а также установки для его осуществления. / Баранов В.Н. / Опубликовано: 20.07.1995
- 25.Краснов А.М. Формирование структуры, состава и свойств высокопрочных мелкозернистых бетонов для сборных покрытий автомобильных дорог/А. М. Краснов. – 2010
- 26.Кожиев С. Б. Высококачественный мелкозернистый бетон для дорожных покрытий с органоминеральной добавкой. / Кожиев С. Б. – 2005.
27. Гринев А. П. Мелкозернистые бетоны для монолитного строительства на основе сырья Ханты-Мансийского автономного округа. / Гринев А.П. – 2011.
- 28.Королева Е.Л. Мелкозернистые бетоны на техногенном глауконитовом песке. / Королева Е.Л. – 2008.
- 29.Решетняк И.А. Исследование дорожных мелкозернистых цементных бетонов. диссертация к.т.н. – Харьков, 1968,290
- 30.Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ. – Киев: Выща школа,1989,328с
- 31.Грушко И.М., Ильин А.Г., Рашевский С.Т. Прочность бетонов на растяжение. – Харьков:Изд.ХГУ, 1973, 168с.
- 32.Яковлев Г.И., Первушин Г.Н.,Бурьянов А.Ф. Модификация цементных бетонов многослойными углеродными нанотрубками. // Строительные материалы. – М.:2011 №2 с.47-49
- 33.Десов А.Е. Некоторые вопросы структуры, прочности и деформации бетонов //Сб. докл. НИИЖБ., - М., 1966,321с.

34. Алтунов В.Д. Исследование процесса усталостного разрушения цементных бетонов при разрушении. Диссертация к.т.н., - Харьков, 1973, 156с
35. Киреева Е.В. Исследование процессов разрушения дорожных бетонов при совместном влиянии механических нагрузок и воздействия среды. Диссертация к.т.н., -Харьков, 1978, 179с.
36. Коршунов В.И. Малоцебеночный бетон для строительства дорожных и аэродромных покрытий. // Сб VIII Всесоюзное совещание дорожников -М., 262с.
37. Баженов Ю.М. Технология бетона.,-М.:Изд. АСВ, 2002, 490с.
38. Блэнкс Р., Кеннеди Г. Технология цемента и бетона. \_М.: Промстройиздат 1957, 328с.
39. Горшберг О.А. Технология бетонных и железобетонных изделий. – М.: Стройиздат, 1965.230с.
40. Ширина Н.В., Загороднюк Л.Х. Перлитовая пыль – эффективный наполнитель для сухих строительных смесей // Строительные материалы. – М.:2007 №5 с.44-46
41. Ушакова И.Н., Михайлов Н.В. Структурообразующая роль заполнителей и добавок поверхностно-активных веществ (ССБ) при образовании поровой структуры цементного камня и песчаного бетона и железобетона.
42. Урьев Н.В., Михайлов Н.В. Особенности процессов структурообразования в тонких прослойках цементно-водных суспензий (коллоидного цементного клея). //В кн.: Физико-химическая механика дисперсных структурам.: Наука, 1966, 234с.
43. Кочнев Ю.М. О технологии песчаного бетона. // Применение мелких песков в бетоне и методы подбора состава бетона. -М.: Госстройизд. 1961 . - с . 123-127
44. Кунцевич О.В. Бетоны высокой морозостойкости для сооружений Крайнего Севера. -Л: Стройиздат, 1983, 131с.

- 45.Краснов А.М., Федосов С.В. Влияние высокого наполнения мелкозернистого бетона на структурную прочность. // Строительные материалы. – М.:2009 №1 с.48-49
- 46.Шейнин А.М. Цементобетон для дорожных и аэродромных покрытий. -М.: Транспорт, 1991,151с.
- 47.Михайлова С.И. Влияние основных технологических факторов на прочностные и деформативные свойства песчаного бетона. Дисс.к.т.н.-М., 1976.-140 с.
- 48.Вешоа М. Цементы в строительстве. Пер. с фр. под ред. Б.А. Крылова. -М.: Стройиздат, 1980, 415с.
- 49.Мощанский Н.А. Плотность и стойкость бетонов. Госстройиздат, 1951, 242с.
- 50.Рамачандран В.С., Фельдман Р.Ф, Коллепарди М. и др. Добавки в бетон.//Пер. с англ. Розенберг Т.И., Болдырева С.А. М.: Стройиздат,1988, 575с.
- 51.Сычѳв М.М. Твердение цементов. -Л.: Изд. ЛТИ, 1981,211с.
- 52.Красильников К.Г., Никитина Л.В., Скоблинская Н.Н. Физико-химия собственных деформаций цементного камня. -М.: Стройиздат, 1980, 256с.