

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСЧЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

АО “ЎЗБЕКИСТОН ТЕМИР ЙЎЛЛАРИ”

**ТАШКЕНТСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ
ЖЕЛЕЗНОДОРЖНОГО ТРАНСПОРТА**

На правах рукописи

УДК 624.012.4

САДЫКОВ ТОХИР ХАЛИЛОВИЧ

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СОСТАВА
БЕТОНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ СТРУКТУРНО-
АНАЛИТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

5А340201- Строительство зданий и сооружений

(здания и сооружения транспорта)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание академической степени магистра

Научный консультант:

д.т.н., проф. А.И. Адылхаджаев

Ташкент 2018

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН
АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «УЗБЕКИСТОН ТЕМИР ЙУЛЛАРИ»
ТАШКЕНТСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО
ТРАНСПОРТА

Факультет: Строительный

Студент магистратуры: Садыков Т.Х.

Кафедра: Строительство
зданий и промышленных
сооружений

Научный руководитель: д.т.н., проф.
Адылходжаев А.И.

Год обучения: 2017-2018

Специальность: 5А340201
Строительство зданий и
промышленных сооружений
(здания и сооружения
железнодорожного транспорта)

АННОТАЦИЯ МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

Проведен анализ влияния компонентов бетонной смеси на характеристики бетона. Представлены основные методики расчета состава и прогнозирования прочности бетона. Исследовано влияние различных факторов на свойства тяжелого бетона.

Рассматриваются методологические принципы прогнозирования и управления свойствами цементных композиционных материалов на основе структурно-имитационного моделирования, заключающегося в представлении распределения в объеме, взаимной ориентации и сопряжения отдельных компонентов структуры, а также их совместной работы на различных уровнях с применением численных методов.

Описывается разработанная система автоматизированного проектирования состава тяжелого бетона.

Магистрант:



Садыков Т.Х.

Научный руководитель:



д.т.н., проф. Адылходжаев А.И.

ЎЗБЕКИСТОН РЕСПУБЛИКАСИ

ОЛИЙ ВА ЎРТА МАХСУС ТАЪЛИМ ВАЗИРЛИГИ

“ЎЗБЕКИСТОН ТЕМИР ЙЎЛЛАРИ” АКЦИЯДОРЛИК ЖАМИЯТИ

ТОШКЕНТ ТЕМИР ЙЎЛ МУҲАНДИСЛАРИ ИНСТИТУТИ

Факультет: Строительный

Студент магистратура: Садиков Т.Х.

Кафедра: Строительство
зданий и промышленных
сооружений

Научный руководитель: Алиходжаев А.И.
Кўлёзма хукуқида

Год обучения: 2017-2018

Специальность: Строительство зданий и
промышленных сооружений
УДК 624.012.4

САДИКОВ ТОХИР ХАЛИЛОВИЧ

БЕРИЛГАНКОМПЛЕКС ХОССАГАЭГА БУЛГАН ОГИР БЕТОН

ТАРКИБИНИ ОПТИМАЛЛАШТИРИШ

5A340201 – “Бино ва иншоотлар қурилиши”(транспорт бино ва
иншоотлари)

Магистр академик даражасини олиш учун ёзилган

ДИССЕРТАЦИЯ

Илмий раҳбар: т.ф.д., проф.

А.И. Алиходжаев

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение

1. **АНАЛИЗ МЕТОДИК ПРОЕКТИРОВАНИЯ СОСТАВОВ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ И ОЦЕНКА КАЧЕСТВА БЕТОНОВ.....5**
 - 1.1 Классификация бетонов и основные требования предъявляемые к ним.....5
 - 1.2 Методики проектирования состава бетонных смесей.....13
 - 1.3 Цели и задачи исследования.....20
2. **ФОРМУЛИРОВКА ОСНОВНЫХ ПРИНЦИПОВ СТРУКТУРНО-ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ БЕТОНОВ И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА.....23**
 - 2.1 Основные принципы структурно- имитационного моделирования процесса разрушения бетона.....23
 - 2.2 Разработка алгоритма программного комплекса “Модель-бетон”.....36
3. **РАЗРАБОТКА ИНСТРУКЦИЙ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «МОДЕЛЬ-БЕТОН» И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЕГО В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ.....50**
 - 3.1 Инструкция по использованию программы комплекса “Модель-бетон”.....50
 - 3.2 Использование программы “Модель- бетон” в учебном процессе.....60

Общие выводы

Литература

Приложения

Введение

Актуальность темы диссертационной работы. Бетоны в настоящее время являются наиболее распространенными строительными материалами. Тяжелые бетоны относятся к самым массовым по применению в строительстве вследствие их высокой прочности, надежности и долговечности при работе в конструкциях зданий и сооружений. Поэтому весьма актуально получение бетона с требуемыми физико- механическими свойствами.

Решение данной задачи в значительной степени связано с применением при исследовании бетона современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента, реализацией эффективных численных методов и алгоритмов в виде проблемно- ориентированных программ для оптимизации составов бетонных смесей и прогнозирование их эксплуатационных свойств.

Наиболее ответственным участком технологического приготовления бетонной смеси является проектирование состава бетонной смеси. Проектирование состава бетонной смеси является одной из основных технологических задач. При проектировании состава необходимо выбрать такой метод проектирования, который обеспечит получение оптимальных структуры и свойств бетона.

Традиционные методы проектирования состава бетонной смеси сводится к определению расчетно-экспериментальными методами соотношения исходных компонентов бетонной смеси, обеспечивающих при заданных параметрах (качество цементов, добавок и заполнителей, подвижность бетонной смеси, режим твердения и прочность бетона) минимальный расход цемента, как наиболее дорогостоящего компонента бетонной смеси.

В настоящее время одним из актуальных направлений совершенствования технологического процесса производства бетонов является автоматизация процессов проектирования.

Применение автоматизированных систем на стадии проектирования позволяет обеспечить высокое качество проектных решений, сократить

материальные и трудовые затраты производства, повысить эффективность труда специалистов, так как появляется возможность моделировать составы материалов, имеющие определенные рецептурно-технологические параметры.

Основная сложность автоматизации проектирования состава бетонной смеси заключается в том, что характеристики компонентов, бетонной смеси и бетона, соответствующие удовлетворительному качеству, имеют нечеткий характер, то есть находятся в определенных диапазонах значений.

К настоящему времени, несмотря на имеющиеся достижения, сохраняют свою актуальность проблемы прочности и собственных деформаций бетона. Решение этих проблем невозможно без учета влияния структуры материала.

Таким образом, работа посвящена актуальной теме современного строительного материаловедения - проблеме моделирования структуры и свойств цементных композиционных материалов.

Целью диссертационной работы является создание системы автоматизированного проектирования составов бетонов для повышения их качества; прогнозирования свойств и обеспечения снижения трудоемкости и себестоимости процесса проектирования.

Задачами диссертационной работы являются:

1. Провести анализ существующих методик проектирования состава бетона;
2. Разработать математическую модель для прогнозирования свойств бетона, установить зависимости качественных показателей бетона (прочность при сжатии, плотность, морозостойкость, теплопроводность) от состава бетонной смеси;
3. Разработать математическую модель проектирования оптимальных составов бетонных смесей, позволяющую получать бетон с заданными свойствами при минимальных затратах на основе полученных зависимостей свойств бетона;
4. Создать систему автоматизированного проектирования составов бетонных смесей и прогнозирования свойств бетона.

Научная новизна работы состоит:

Разработана математическая модель прогнозирования свойств бетона, для которой установлены новые зависимости качественных показателей бетона (прочность при сжатии) от состава бетонной смеси.

1. АНАЛИЗ МЕТОДИК ПРОЕКТИРОВАНИЯ СОСТАВОВ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ И ОЦЕНКА КАЧЕСТВА БЕТОНОВ

1.1 Классификация бетонов и основные требования предъявляемые к ним.

Бетоном называется искусственный каменный материал конгломерантного строения, получаемый затвердеванием тщательно перемешанной и должным образом уплотненной смеси, состоящей из крупного и мелкого заполнителей, вяжущего вещества и воды, взятых в оптимальных пропорциях[1-4]. Такая смесь носит название бетонной смеси.

Цемент и вода являются активными составляющими бетона; в результате реакции между ними происходит образование цементного камня, скрепляющего зерна заполнителей в единый монолит. Между заполнителями и цементом обычно не происходит химического взаимодействия, поэтому часто заполнители называют инертными материалами[5]. Однако заполнители оказывают существенное влияние на структуру и свойства бетона, изменяя его пористость, сроки затвердевания, поведение при воздействии нагрузки и внешней среды. Заполнители значительно уменьшают деформации бетона при твердении и тем самым обеспечивают получение большемерных изделий и конструкций. Заполнители и вода составляют около 85–90 %, а цемент – 10–15 % от массы бетона.

Химические добавки вводятся для регулирования свойств бетона и бетонной смеси. Они могут ускорять или замедлять схватывание бетонной смеси, делать ее более пластичной и удобоукладываемой, ускорять твердение бетона, повышать его прочность и морозостойкость, а также при необходимости изменять в требуемом направлении и другие свойства бетона

[6-9]. Бетоны тем и ценны, что им можно придавать самые разнообразные свойства, изменять в широких пределах их прочность, плотность и другие свойства.

Рассмотрим основные свойства бетонов и материалов. К механическим свойствам относятся: прочность, твердость, истираемость, ударная вязкость. Типичными прочностными характеристиками служат предел упругости, предел текучести и предел прочности при воздействии сжимающих, растягивающих или других видов усилий.

К физическим свойствам относятся: средняя плотность, истинная плотность, пористость, теплопроводность, теплоемкость, огнестойкость, температуростойкость (термостойкость), водопоглощаемость, влагоотдача, гигроскопичность, водопроницаемость, паропроницаемость, газопроницаемость, водостойкость, морозостойкость, звукопоглощаемость, поглощаемость ядерных излучений и рентгеновских лучей, электропроводность, светопроницаемость и др.

К технологическим свойствам относятся: формуемость, раскалываемость, шлифуемость, полируемость, дробимость, гвоздимкость и др.

В настоящее время в строительстве используют различные виды бетона. Классифицируют бетоны по средней плотности, виду вяжущего вещества, структуре, технологическим особенностям и назначению[4].

Рассмотрим подробнее классификацию бетонов (рис. 1.1).

К одному из показателей заданных свойств относится средняя плотность бетона. Величина средней плотности бетона зависит от разновидности заполнителя, а отчасти обусловлена пористостью цементного камня. По степени средней плотности бетоны классифицируют следующим образом[9,11]:

- особо тяжелые (средняя плотность свыше 2500 кг/м³);
- тяжелые (средняя плотность 2200–2500 кг/м³);
- облегченные (средняя плотность 1800–2200 кг/м³);
- легкие (средняя плотность 500–2000 кг/м³);
- особо легкие, ячеистые (средняя плотность менее 500 кг/м³).

Или:

- особо тяжелые (средняя плотность более 2500 кг/м³);
- тяжелые (средняя плотность от 1800 до 2500 кг/м³);
- легкие (средняя плотность от 500 до 1800 кг/м³);
- особо легкие (средняя плотность менее 500 кг/м³) [10].

Особо тяжелые бетоны приготавливают на тяжелых заполнителях, таких как стальные опилки или стружки (сталебетон), железные руды (лимонитовый или магнетитовый бетон) или барит (баритовый бетон).

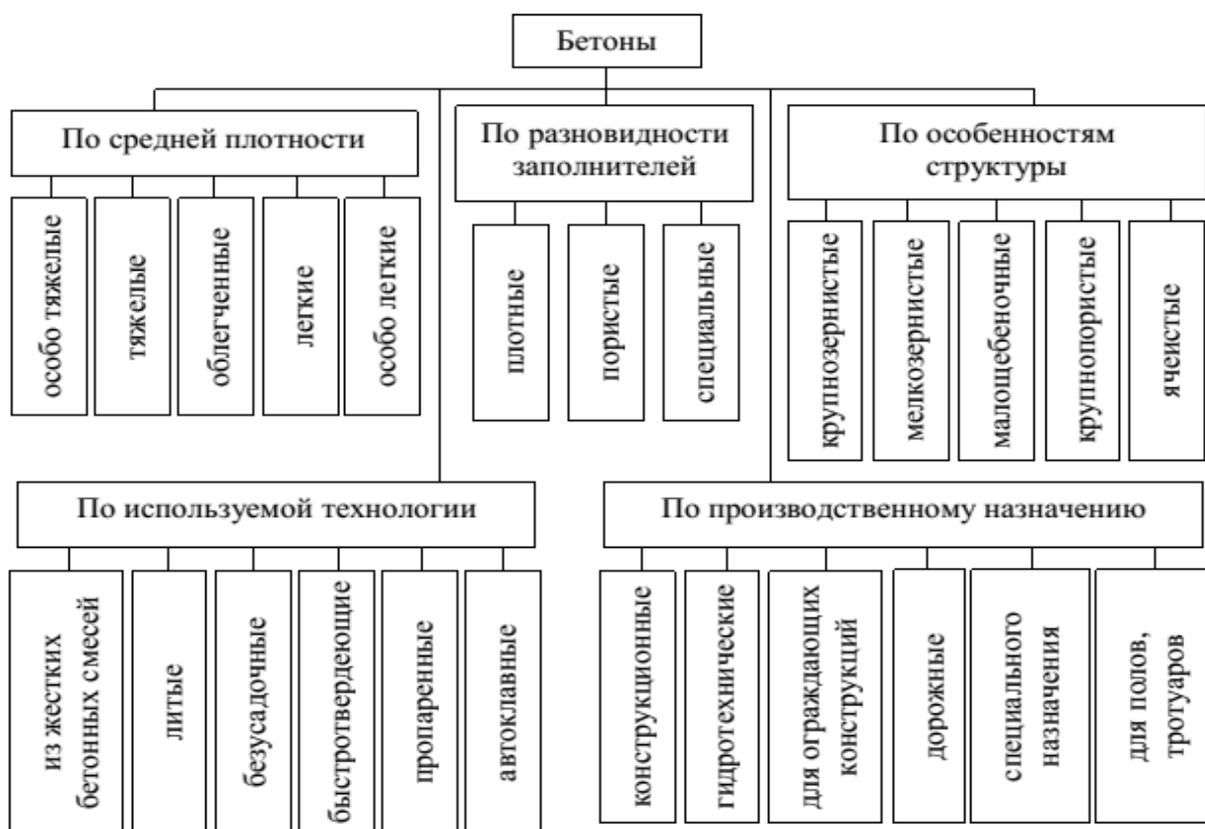


Рис. 1.1 Классификация бетонов.

Наиболее широкое применение в строительстве получили тяжелые бетоны со средней плотностью 2100–2500 кг/м³. Их приготавливают на плотных заполнителях из горных пород (гранит, известняк, диабаз и др.). Облегченный бетон имеет объемную массу 1800–2000 кг/м³. Его получают, применяя щебень из горных пород с объемной массой 1600–1900 кг/м³, или

изготавливают бетон без песка (цементное тесто и крупный заполнитель), который называют крупнопористым.

Легкие бетоны получают, применяя пористые заполнители (керамзит, аглопорит, вспученный шлак, пемза, туф и др.). Применение легких бетонов уменьшает массу строительных конструкций, удешевляет строительство.

Главной составляющей бетона, во многом определяющей его свойства, является вяжущее вещество. Для бетонов применяют почти все разновидности неорганических вяжущих, в соответствии с чем бетоны разделяются: на цементные, гипсовые, силикатные, шлаковые, шлакощелочные, полимербетоны, полимерцементные, специальные (на фосфатных, магнезиальных и других вяжущих)[9]. В своей работе мы будем исследовать только бетоны на основе минеральных цементов.

По разновидности заполнителей бетоны разделяют: на плотные, пористые, специальные.

В зависимости от особенностей структуры различают крупнозернистый бетон слитной структуры, мелкозернистый бетон (без щебня), малощебеночный, в котором уменьшено содержание щебня, крупно-пористый или беспесчаный, ячеистый, в структуре которого имеется большое количество воздушных или газовых пузырьков[12,13].

Технология изготовления изделий и конструкций предъявляет к бетонной смеси и бетону свои требования, для обеспечения которых необходимы соответствующий выбор сырья и состава бетона[14-21].

В зависимости от используемой технологии различают бетоны:

- из жестких бетонных смесей, позволяющие, как правило, немедленную распалубку изделий;
- литые для изготовления изделий и конструкций способом литья в форму;
- автоклавные для зимнего бетонирования, твердеющие при отрицательных температурах;
- безусадочные;
- быстротвердеющие;

– пропаренные и др.

В зависимости от производственного назначения (области применения) бетоны разделяют на следующие виды:

– конструкционные (обычный бетон для железобетонных конструкций: фундаментов, колонн, балок, перекрытий, мостовых и других типов конструкций);

– гидротехнические (для плотин, шлюзов, облицовки каналов, водопроводно-канализационных сооружений и т. д.);

– для ограждающих конструкций (легкий бетон для стен зданий);

– для полов, тротуаров, дорожных и аэродромных покрытий;

– специального назначения (жароупорный, кислотостойкий, для радиационной защиты и др.).

В зависимости от назначения бетоны должны удовлетворять определенным требованиям. Рассмотрим основные из них. Бетоны для железобетонных конструкций должны соответствовать заданной (требуемой) прочности при сжатии (R_b). Для конструкций, находящихся на открытом воздухе важна также морозостойкость (F), т.е. способность материала к воздействию низких температур в зимних условиях.

Бетоны для гидротехнических сооружений должны обладать высокой плотностью, водонепроницаемостью (W), морозостойкостью, малой усадкой, стойкостью против выщелачивающего действия воды, стойкостью по отношению к действию минерализованных вод, незначительным выделением тепла при твердении и соответствовать также требуемой прочности [4,23,24,25].

Бетоны для стен отапливаемых зданий и легких перекрытий должны соответствовать требуемой прочности, плотности и теплопроводности. Бетоны для полов должны обладать малой истираемостью и достаточной прочностью при изгибе, а бетоны для дорожных и аэродромных покрытий еще и соответствующей морозостойкостью. К бетонам специального назначения предъявляются требования, обусловленные особенностью их службы.

Общие требования ко всем видам бетонов и бетонных смесей таковы[12,22,23,24,25]:

– до затвердевания бетонные смеси должны легко перемешиваться, транспортироваться, укладываться (обладать подвижностью и удобоукладываемостью), не расслаиваться;

– бетон должен иметь определенную скорость твердения в соответствии с заданными сроками распалубки и ввода конструкции или сооружения в эксплуатацию;

– расход цемента и стоимость бетона должны быть минимальны.

Получить бетон, удовлетворяющий всем поставленным требованиям, можно при надлежащем приготовлении, укладке и уплотнении бетонной смеси, а также при правильном выдерживании бетона в начальный период его твердения.

При проектировании бетонных и железобетонных конструкций назначают требуемые характеристики бетона: класс (марку) прочности, марки морозостойкости и водонепроницаемости.

За проектную марку бетона по прочности при сжатии принимают сопротивление осевому сжатию (МПа) эталонных образцов-кубов. Проектную марку бетона по прочности при сжатии контролируют путем испытания стандартных бетонных образцов-кубов размером 15×15×15 см. Образцы выдерживаются до испытания: для монолитных конструкций – 28 суток, для сборных – столько, сколько установлено для данного вида изделий стандартом.

Проектные марки тяжелого бетона по прочности на сжатие: М50, М75, М100, М150, М200, М250, М300, М350, М400, М450, М500, М600, М700, М800. Конструкционные легкие бетоны разделяют на марки (МПа): М20; М35 и т. д. до М500. Марки по пределу прочности при сжатии ячеистых бетонов: М15, 25, 35, 50, 75, 100, 150.

В настоящее время вместо понятия марки бетона используют понятие класса бетона.

Класс бетона – это числовая характеристика какого-либо его свойства, принимаемая с гарантированной обеспеченностью 0,95. Это значит, что установленное классом свойство обеспечивается не менее чем в 95 случаях из 100 и лишь в 5-ти случаях можно ожидать его не выполненным.

Например, класс бетона В30 следует понимать так, что с вероятностью 0,95 при определении $R_{сж}$ в любом сечении конструкции будет результат 39,3 МПа и более и только в 5 % случаях можно ожидать менее 39,3 МПа.

Соотношение между классом и марками бетона по прочности при нормативном коэффициенте вариации $v=13,5\%$ следует принять следующим:

$$R_{сж}^{CP} = B/0,778 \quad (1.1)$$

где B – класс бетона.

Например, для класса В5 средняя прочность будет 6,49 МПа. Бетоны подразделяются на классы (МПа): В1; В1,5; В2; В2,5; В3,5; В5; В7,5; В10; В15; В20; В25; В30; В40; В45; В50; В55; В60.

Классы В20–В35 применяют при условии, что это приводит к экономии цемента. Бетон называют высокопрочным, если его класс выше В45. Иногда к высокопрочному относят бетон с прочностью выше стандартной марки цемента, использованного в его составе.

За проектную марку бетона по прочности на осевое растяжение принимают сопротивление осевому растяжению (МПа) контрольных образцов. Эта марка назначается тогда, когда она имеет главенствующее значение. По пределу прочности на осевое растяжение бетоны делятся на марки от 10 до 40, а при изгибе – от 1,5 до 5,5 МПа.

Проектная марка бетона по морозостойкости характеризуется числом циклов попеременного замораживания и оттаивания, которое выдерживают образцы в условиях стандартного испытания. Назначается для бетона, подвергающегося многократному воздействию отрицательных температур (дорожный бетон, жаростойкий бетон). По морозостойкости бетоны маркируют: F15, F25, F50, F75, F100, F150, F200, F300, F400, F500.

Проектная марка бетона по водонепроницаемости характеризуется односторонним гидростатическим давлением (МПа), при котором образцы бетона не пропускают воду в условиях стандартного испытания. Назначается для бетона, к которому предъявляются требования по плотности и водонепроницаемости (гидротехнический бетон). Приняты следующие марки: W2, W4, W6, W8, W10 и W12, которые особенно важно учитывать при проверке качества бетона для труб, гидротехнического и других видов тяжелого бетона.

Особенностью производства бетона в настоящее время является то, что о качестве материала можно судить заранее лишь приблизительно. Необходимые свойства бетон приобретает в процессе изготовления конструкции. Отсюда следует, что важное значение имеет проектирование состава бетонной смеси (бетона) с учетом принятой технологии процесса ее изготовления. Основными показателями качества бетонной смеси являются подвижность (жесткость) и водоцементное отношение B/C , которые зависят от параметров составных компонентов, времени замеса, параметров окружающей среды и т.д.

Материалы для приготовления бетона должны отвечать всем требованиям, изложенным в государственных и отраслевых стандартах на эти материалы. Все виды и марки цемента должны отвечать требованиям стандартов[26,27,28]. Основной характеристикой цемента является его активность (R_{II}), по которой и определяется марка цемента. Также контролируется нормативная густота цементного теста (НГЦТ), срок схватывания. Песок для бетона должен отвечать требованиям ГОСТа[30]. Основными контролируемыми параметрами песка являются: модуль крупности, содержание пылевидных и глинистых частиц, плотность песка[31]. Основными контролируемыми параметрами крупного заполнителя являются: модуль крупности, характеризующий наибольшую крупность зерен заполнителя, плотность[35,36]. Также крупный заполнитель должен отвечать требованиям ГОСТов[32]. Для изготовления бетонной смеси допускается применять любую воду (из хозяйственного водопровода, рек или естественных

водоемов), имеющую водородный показатель рН не менее 4 и содержащую минеральные соли не более 5000 мг/л, в том числе не более 2700 мг/л сульфатов. Не разрешается применять болотные и сточные воды без их очистки[33].

Материалы (цемент, вода, заполнители, добавки) могут поразному влиять на свойства бетонов, различающихся по составу и структуре. Смесь цемента (C) и заполнителя (Z) может связывать и удерживать строго определенное количество воды (B), находящейся на поверхности частиц твердой фазы в ее порах и капиллярах. При недостатке воды смесь становится неудобокладываемой, в бетоне вследствие недоуплотнения и недостатка жидкой фазы увеличивается количество пор и пустот, ухудшается качество сцепления между цементным камнем и заполнителем, прочность бетона (R_b) понижается. При избытке воды начинается расслаивание бетонной смеси, отделение лишней воды вместе с частью цемента, также приводящее к снижению его прочности. Поэтому только при определенных пределах C/B , если $C/Z = \text{const}$, бетонная смесь будет оптимальной по структуре и свойствам, а также будет наилучшим образом укладываться и уплотняться[8,10,23,37]. В связи с этим остро встает вопрос качественного проектирования состава бетонной смеси (бетона), как одного из важнейших этапов технологического процесса производства бетона. Оттого, насколько правильно определен состав бетона, зависят его свойства, долговечность и экономичность, а также качество строительства и его трудоемкость.

1.2. Методики проектирования состава бетонных смесей

Проектирование составов бетона – ключевая технологическая задача, решение которой определяет уровень эксплуатационной надежности конструкций и сооружений и степень рационального использования ресурсов, затраченных на их изготовление и возведение[38].

В современной технологии под проектированием составов бетона понимают обоснование, выбор вида исходных материалов и их соотношений, обеспечивающих при заданном критерии оптимальности нормируемые

проектные требования к бетонной смеси и бетону. При использовании методологии системного подхода проектирование составов бетона может включать ряд дополнительных задач, связанных с оптимизацией технологических параметров производства и проектных требований [39-42].

Актуальными направлениями развития методологии проектирования составов бетона являются:

- увеличение «разрешающей способности» расчетных методик, т.е. возможности более полного учета технологических факторов и проектных требований к бетону;
- повышение эффективности алгоритмов расчетных методик, их точности и быстродействия.

Развитие этих направлений возможно за счет реализации современных представлений бетоноведения о формировании строительно-технических свойств бетона в сочетании с системным анализом.

Наиболее общий подход к проектированию составов бетона основан на количественном учете взаимосвязей типа свойство – структура – состав бетона путем анализа и совместного решения уравнений, связывающих показатели свойств бетона с параметрами его структуры.

Оптимальная структура бетона – это структура, которая обеспечивает комплекс требуемых свойств при выполнении заданных условий оптимальности (минимальный расход цемента, минимальная стоимость бетонной смеси и др.). В соответствии с этим условием составы бетона могут существенно отличаться при различных условиях оптимальности.

В строительно-технологической практике наибольшее распространение получили методы проектирования составов бетона с требуемой прочностью при сжатии. Это обусловлено, во-первых, тем, что при конструктивных расчетах прочность бетона является основным его параметром, и, во-вторых, предположением, что с прочностью однозначно связаны и другие важные свойства бетона [43-45].

В тех случаях когда, кроме прочности при сжатии, возникает необходимость нормирования ряда других его строительно-технических свойств, задача проектирования состава существенно усложняется.

Наиболее широкое применение в строительной промышленности при производстве строительных конструкций и возведении современных зданий и сооружений получили тяжелые бетоны. Их доля в суммарном производстве различных видов бетонов является наибольшей, из них изготавливают железобетонные конструкции (балки, плиты и др.), используют при изготовлении монолитных конструкций зданий, мостов, путепроводов. Именно эти виды строительных объектов и конструкций являются наиболее ответственными, к их производству предъявляются наиболее жесткие требования по таким показателям, как прочность на сжатие, морозостойкость, водонепроницаемость. Следовательно, далее будем говорить о методиках проектирования при производстве тяжелых бетонов как материалов, к которым предъявляются наиболее высокие требования по качеству. Технологический процесс приготовления бетонной смеси представлен на рис. 1.2.



Рис. 1.2. Схема технологического процесса проектирования и приготовления бетонной смеси

По времени технологический процесс приготовления бетонной смеси, включая подбор состава и лабораторные испытания, занимает около 30 суток. Его можно условно разделить на две части (фазы):

- подготовительная;
- основная (технологический процесс).

В случае отрицательного результата испытаний подготовительная фаза повторяется; с учетом полученных данных в количественный или качественный состав смеси вносят изменения и далее образцы вновь испытываются.

Факторы, влияющие на отрицательный результат на первом этапе:

- ошибки при проектировании состава бетонной смеси;
- некорректно проведенные измерения параметров компонентов бетонной смеси.

В случае положительного результата испытаний образцов принимается решение о промышленном производстве бетонной смеси согласно полученной карте подбора, т.е. о переходе к основной фазе технологического процесса.

Наиболее ответственным участком подготовительной фазы и всего технологического процесса является проектирование состава бетонной смеси. Сюда входят этапы: расчет количественного состава бетонной смеси, планирование испытаний, изготовление опытных образцов и их испытания.

Можно выделить четыре основных методики проектирования состава бетонной смеси:

- 1) расчетно-экспериментальный (технологический) метод определения состава бетона;
- 2) ускоренный метод назначения состава бетона с оценкой качества цемента;
- 3) проектирование состава по таблицам, графикам, номограммам;
- 4) проектирование состава бетона с применением математико-статистических методов.

Расчетно-экспериментальный метод является широко используемым методом проектирования на производстве, его еще называют технологическим

методом [46,47]. Основным условием его применения является наличие данных об активности цемента и качестве заполнителей. Согласно этому методу, вначале определяют ориентировочную величину водоцементного отношения. Далее задаются необходимым количеством воды для затворения 1 м^3 смеси, исходя из удобоукладываемости смеси и наибольшей крупности зерен заполнителя.

Количество заполнителей и химической добавки (или добавок в случае применения комплексной химической добавки) определяют исходя из того, что сумма абсолютных объемов компонентов бетона (в литрах) равна 1 м^3 (1000 л) готового бетона. Затем изготавливаются контрольные образцы бетона, по результатам испытаний которых, в случае необходимости, проводят корректировку состава бетонной смеси, и только при получении положительных результатов состав передается в производство.

Ускоренный метод определения состава бетонной смеси используется в том случае, когда отсутствуют данные об активности цемента и качестве заполнителей. Для ускорения оценки качества цемента в бетоне и одновременного назначения состава бетона требуемой марки (класса) используется линейная зависимость прочности бетона (R_b) от водоцементного отношения (B/C). В начале изготавливают контрольные образцы для трех составов бетона с B/C от 0,7 до 0,36. Затем образцы испытывают на сжатие в суточном или ином возрасте и строят график зависимости R_b от B/C . Использование накопленных данных и графика позволяет установить B/C для получения требуемой прочности в заданное время, на основе которого и определяется состав бетона. В зависимости от наибольшей крупности применяемого щебня или гравия и размера контрольных образцов рассчитывают необходимое количество материалов для изготовления контрольных образцов трех разных составов (по три образца для каждого состава) в соответствии с определенными правилами использования диапазонов расхода материалов для каждого состава. Образцы помещают в условиях нормального хранения для испытания в возрасте 28 суток. По результатам

испытания образцов на сжатие выводят среднюю прочность бетона для каждого состава[29]. Далее расчетным методом определяют состав бетонной смеси, с учетом определенного опытным путем V/C . Данный метод требует значительных временных затрат и употребляется в основном в полевых условиях, в случае недостаточной оснащенности лабораторным оборудованием.

Проектирование состава бетона по таблицам, графикам, номограммам производится в следующем порядке. Вначале определяют V/C с учетом коэффициента, который зависит от требуемой подвижности или жесткости бетонной смеси, модуля крупности песка, нормальной густоты цементного теста, крупности щебня (гравия), V/C . Расход воды определяется по графикам, основанным на закономерности постоянной водопотребности в равноподвижных бетонных смесях. Количество каждого материала назначается в соответствии с изменением расхода воды по таблицам и графикам, исходя из того, что фактическая объемная масса должна быть равна или близка к теоретической (расчетной объемной массе).

Состав бетонной смеси с применением математико- статистических методов проектируется одновременно с планированием экспериментов, его рекомендуется осуществлять при использовании на производстве нескольких составов бетона по марке и подвижности (жесткости) бетонной смеси; при построении зависимостей, необходимых для корректировки состава бетона в процессе его приготовления при организации производства изделий по новой технологии, а также в случае применения автоматических систем управления технологическим процессом. При использовании этой методики устанавливается математическая зависимость между заданными свойствами бетона и расходом и свойствами составляющих материалов. Получаемая математическая зависимость используется для назначения и поиска оптимальных составов.

Подбор состава бетона следует проводить в соответствии с требованиями стандартов [25,29]. Процесс подбора состава бетона включает в

себя: определение номинального состава, расчет и корректировку рабочего состава, расчет и передачу в производство рабочих дозировок.

Подбор номинального состава бетона производят при организации производства новых видов конструкций, изменении нормируемых показателей качества бетона или бетонной смеси, технологии производства, поставщиков, вида или марок применяемых материалов, а также при разработке и пересмотре производственных норм расхода материалов. Рабочие составы бетона назначают при переходе на новый номинальный состав и далее при поступлении новых партий материалов тех же видов и марок, которые принимались при подборе номинального состава, с учетом их фактического качества. При назначении рабочих составов их проверяют в лабораторных или производственных условиях.

В дальнейшем по результатам операционного контроля качества материалов данных партий и получаемой из них бетонной смеси, а также приемочного контроля качества бетона корректируются рабочие составы. Рабочую дозировку назначают по рабочему составу бетонной смеси с учетом объема приготавливаемого замеса.

Подбор номинального состава бетона включает следующие этапы:

- выбор и определение характеристик исходных материалов для производства бетона;
- расчет начального состава;
- расчет дополнительных составов с параметрами, отличающимися от принятых в начальном составе в большую и меньшую сторону;
- изготовление пробных замесов начального и дополнительных составов, отбор проб, испытание бетонной смеси, изготовление образцов и их испытание по всем нормируемым показателям качества;
- обработка полученных результатов с установлением зависимостей, отражающих влияние параметров состава на нормируемые показатели качества бетонной смеси и бетона и предназначенных для назначения номинального, а также назначения и корректировки рабочих составов бетона;

– назначение номинального состава бетона, обеспечивающего получение бетонной смеси и бетона требуемого качества при минимальном расходе вяжущего.

В качестве варьируемых параметров состава принимают параметры, оказывающие влияние на свойства бетонной смеси и нормируемые показатели качества бетона в зависимости от вида бетона и принятой методики расчета. Например, для тяжелого бетона в общем случае это цементно-водное отношение, доля песка в смеси заполнителей и расход добавки. При этом для каждого вида бетона устанавливают основной параметр, в большей мере влияющий на его прочность (например, для тяжелого бетона – цементно-водное отношение).

Дополнительные составы рассчитывают аналогично начальному при значениях варьируемых параметров состава, отличающихся от принятых при расчете начального состава в большую и меньшую сторону на 15–30%. Число дополнительных составов по каждому из этих параметров должно быть не менее двух.

Назначение и корректировку рабочих составов производят с учетом зависимостей между параметрами состава бетона и свойствами бетона и бетонной смеси, установленными при подборе номинального состава.

При этом расход заполнителей и воды в рабочем составе определяют с учетом фактической влажности заполнителей и содержания крупного заполнителя в мелком и мелкого заполнителя в крупном.

1.3. Цели и задачи исследования.

В современном строительстве не обойтись без бетонных смесей, их используют при возведении широкого диапазона искусственных сооружений от фундаментов зданий до мостов высокой сложности. Основными критериями, предъявляемыми к производству бетона, являются минимально возможные сроки и качество исполнения [1,3,4]. Время выполнения заказа на производство бетона зависит от уровня технологического процесса, персонала и оборудования. На качество продукта влияют вышеуказанные факторы плюс

качество используемых заполнителей (цемента, песка, щебня и химических добавок)[7,48].

Потребность в бетоне с различными качественными параметрами с течением времени не уменьшается, однако к его качеству предъявляются все более и более жесткие требования. Повышение производительности приготовления бетонных смесей в рамках одного завода связано с автоматизацией измерения параметров исходного сырья (компонентов), устройств, с автоматизацией расчета рецептур, с автоматизацией подачи сырья и формирования смеси, с автоматизацией тракта выдачи готового продукта и его качественных показателей[49].

По времени технологический процесс приготовления бетонной смеси, включая подбор состава и лабораторные испытания, занимает около 30 суток. Одной из самых важных операций технологического процесса производства железобетонных конструкций является подбор (проектирование) состава бетонной смеси. В результате проектирования состава бетонной смеси должно быть определено соотношение между компонентами, при котором будет гарантирована прочность бетона в конструкции, с учетом технологии ее изготовления, необходимая подвижность бетонной смеси и экономичность бетона (минимальный расход цемента).

Проектирование состава бетона включает: назначение требований к бетону; выбор материалов и получение данных, характеризующих их свойства; определение предварительного состава бетона; корректировку состава в пробных замесах. При корректировке проводят предварительные испытания для получения уточненных зависимостей свойств бетона и бетонной смеси, приготовленных на данных компонентах и оборудовании по принятой технологии, от водоцементного отношения и других факторов. При проведении этих испытаний используются математические методы факторного планирования эксперимента и обработки его результатов[6]. Основная сложность автоматизации проектирования состава бетонной смеси заключается в том, что характеристики компонентов, бетонной смеси и бетона,

соответствующие удовлетворительному качеству, имеют нечеткий характер, то есть находятся в определенных диапазонах значений. Как следствие установление связей между параметрами готового изделия (бетона) или прогнозирование его качества представляет собой сложную проблему, решение которой лежит в сфере новых подходов, базирующихся на современных информационных, программных и компьютерных технологиях [50,51].

Объектом исследования является технологический процесс изготовления бетонной смеси для тяжелых бетонов.

Предметом исследования является процесс автоматизированного проектирования составов бетонных смесей.

Целью исследования является разработка системы автоматизированного проектирования составов бетонов для повышения их качества; прогнозирования свойств и обеспечения снижения трудоемкости и себестоимости процесса проектирования.

Исходя из этой цели, в работе поставлены следующие основные задачи:

- Провести анализ существующих методик проектирования состава бетона;
- Провести анализ основных принципов структурно- имитационного моделирования процессов разрушения бетонов;
- Разработать математическую модель для прогнозирования свойств бетона, установить зависимости качественных показателей бетона (прочность при сжатии, плотность) от состава бетонной смеси;
- Разработать математическую модель проектирования оптимальных составов бетонных смесей, позволяющую получить бетон с заданными свойствами при минимальных затратах на основе полученных зависимостей свойств бетона;
- Разработать алгоритм программного комплекса;
- Разработать систему автоматизированного проектирования составов бетонных смесей и прогнозирования свойств бетона.

Выводы по главе 1

1. На основании проведенного литературного анализа многокомпонентных бетонов, и методик проектирования составов бетонной смеси, а так же планирования испытаний, бетона существует необходимость разработки автоматизированного расчета состава бетонной смеси.

2. Анализ литературных источников показал, что подбор состава бетона включает множество факторов и применяемые методики расчета довольно трудоемки и затратны.

В связи с этим представляется научный интерес в разработке автоматизированного программного продукта по расчету и подбору бетонной смеси.

2. ФОРМУЛИРОВКА ОСНОВНЫХ ПРИНЦИПОВ СТРУКТУРНО-ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ БЕТОНОВ И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА

2.1 Основные принципы структурно-имитационного моделирования процесса разрушения бетона

Проблемы, связанные с разрушением конструкционных материалов, были актуальны на всех этапах развития техники. В настоящее время, несмотря на значительные достижения в понимании физических аспектов прочности, в разработке методов расчета и прогнозирования механических свойств, в области создания высокопрочных материалов, актуальность этих проблем еще более возрастает. Важность исследований в области разрушения материалов обусловлена разнообразными факторами. Первая группа факторов связана с увеличением нагрузок, с расширением диапазона рабочих температур, с появлением агрессивных сред, облучения и т.д. Вторая группа факторов связана с возрастанием требований к экономичности конструкций и к их безопасности. И, наконец, третья группа факторов, непосредственно обуславливающих актуальность таких исследований, связана с созданием и

внедрением в технику принципиально новых конструкционных материалов[52,53].

Создание композиционных материалов стимулировало развитие новых подходов к проблемам прочности и исследованию процессов разрушения. Прочностные свойства композиционных материалов формируются на микроструктурном уровне. В силу этого, наряду с необходимостью учета физико-химических аспектов взаимодействия компонентов, изучение-вопросов, связанных с разрушением материалов, требуется уже на стадии их разработки, проектирования, при выборе и оптимизации технологических процессов производства композиционных материалов.

Наличие компонентов с резко различающимися механическими свойствами, упорядоченное расположение и физико-химическое взаимодействие которых образует определенную структуру материала, предопределяет особенности разрушения композитов. Эти особенности развития разрушения композиционных материалов, связанные с многообразием ситуаций, возникающих на микроструктурном уровне (дробление волокон, расслоения по границам компонентов, растрескивание матрицы), требуют создания специализированных структурных моделей материалов. В то же время, имеющиеся математические модели микронеоднородных сред пока не в состоянии достаточно полно учесть многообразие реальных микромеханизмов разрушения. При их применении значительная часть экспериментальной информации об отдельных актах микроразрушения и накоплении повреждений в композитах остается без эффективного использования.

Методологический анализ различных подходов к проблемам прочности и разрушения показывает, что явления разрушения в структурно неоднородных материалах, в ряде случаев, необходимо рассматривать как принципиально сложные процессы: их математическое описание затрудняется тем, что любая попытка построения общей концепции не обеспечивает достаточно адекватного отражения многообразия конкретных реальных механизмов. Использование современной вычислительной техники, развитие методов машинного

моделирования открывает новые возможности в исследовании сложных систем и процессов, позволяет ставить вопрос о создании алгоритмизированной теории разрушения материалов, в которой, наряду с кинетической общей концепцией, учитывались бы конкретные механизмы разрушения на различных структурных уровнях.

В данной главе для исследования процессов разрушения композитов рассматривается метод структурно-имитационного моделирования на ЭВМ. Термины "математическое моделирование" или "моделирование на ЭВМ" используются многими исследователями в весьма разнообразных ситуациях, когда для решения тех или иных задач применяется ЭВМ. Структурно-имитационное моделирование предусматривает формирование в ЭВМ информации об отдельных структурных элементах некоторой системы и условиях взаимодействия, а также воспроизведение на ЭВМ процессов, протекающих в данной системе при изменении внешних параметров. Применительно к исследованию процессов разрушения композитов это означает формирование в памяти ЭВМ информации о локальных прочностных свойствах и взаимном расположении компонентов, разработку и ввод в ЭВМ критериев локальных разрушений, алгоритмов перераспределения напряжений и условий взаимодействия микромеханизмов разрушения и, далее, имитацию на ЭВМ различных ситуаций, связанных с накоплением повреждений в материалах при изменении внешних нагружающих факторов[54].

Моделированием называется как процесс построения модели, так и процесс изучения строения и свойств оригинала с помощью построенной модели. Прежде чем построить модель объекта, необходимо выделить составляющие элементы этого объекта и связи между ними(провести системный анализ) и перевести (отобразить) полученную структуру в какую-либо заранее определенную форму, т.е. формализовать информацию. Модель представляет собой особую форму абстрагирования, т. е. отвлечения тех или иных элементов и связей от множества реально существующих в системе. Вне

зависимости от привлекаемых к решению задачи методов анализа возникает необходимость построения некоторых абстракций[4,12,55,].

Модель необходима для того, чтобы:

- понять, как устроен конкретный объект – каковы его структура, основные свойства, законы развития и взаимодействия с окружающим миром;
- научиться управлять объектом или процессом и определять наилучшие способы управления при заданных целях и критериях (оптимизация);
- прогнозировать прямые и косвенные последствия.

В зависимости от того, какие стороны объекта представлены в модели, различают модели: субстанционные, структурные и функциональные. Материал субстанционных моделей (вещество, субстанция) по некоторым свойствам совпадает с материалом оригинала. Например, контрольный образец – куб бетона, изготовленный параллельно с конструкцией (бетон в образце по своим основным свойствам совпадает с бетоном конструкции). Под структурной моделью понимают модель, имитирующую внутреннюю структуру оригинала (способ организации элементов объекта). При этом может моделироваться как структура процесса, например технологическая система производства бетона, так и статистическая структура, например, способы укладки зерен заполнителя различных фракций в массе бетона. Функциональные модели имитируют способ поведения (функцию) оригинала.

Структурно-имитационное моделирование опирается, с одной стороны, на кинетическую концепцию прочности, согласно которой разрушение материала представляется в виде процесса, развивающегося или с течением времени, или по мере увеличения уровня нагрузки, и, с другой стороны, на определенные представления об элементарных актах разрушения в материале на микроструктурном уровне или на представлении о микромеханизмах разрушения. Информацию об отдельных микромеханизмах разрушения, их последовательности и взаимодействии получают, используя разнообразные экспериментальные методы, например, микроструктурные исследования и фрактографический анализ. В то же время, получение критериев локальных

разрушений и анализ взаимодействия микромеханизмов разрушения проводится на основе исследования перераспределения напряжений в материале, сопутствующего отдельным актам разрушения на микро структурном уровне. При формировании информации о локальных свойствах компонентов и при анализе микромеханизмов разрушения учитывается статистический характер прочностных свойств компонентов.

В настоящее время одним из перспективных путей исследования и оптимизации свойств композиционных строительных материалов является их компьютерное моделирование, что обусловлено интенсивным развитием вычислительной техники. Задачи, решаемые с позиции компьютерного моделирования, сосредоточены в области исследования свойств материалов с композиционной структурой, а также проектирования композитов с заданными свойствами.

Одной из самых актуальных проблем в бетоноведении является проблема моделирования структуры и изучение ее влияния на свойства композиционных материалов, однако она пока находится в начальной стадии разрешения.

Авторы применительно к многокомпонентным высококачественным бетонам с высокими эксплуатационными показателями выделяют несколько базовых задач в этой проблеме [56]:

- в структуре бетона должны быть выявлены характерные элементы, которым придается идеализированная геометрическая форма (сфероиды, цилиндры и т. п.) с заданным законом распределения размеров и которые наделяются комплексом свойств (плотностью, модулем упругости, проводимостью и т. п.) с уровнями, распределенными по известным законам.
- структурные элементы бетона должны быть «расставлены» в пространстве (ограниченная плоскость, куб, сфера, изделие сложной конфигурации и т. п.) по некоторым правилам, в число которых должно входить случайное расположение i -го элемента в незанятой другими элементами области.
- должны быть установлены закономерности взаимодействия элементов

структуры бетона (как между собой, так и со средой, внешней по отношению к материалу) при изменении напряжений и деформаций, при тепломассообмене и пр.

– необходимо составить алгоритмы пошагового изменения структурных элементов бетона и характера взаимосвязей между ними при пошаговом изменении внешней среды. Все эти задачи, особенно третьей и четвертой групп, очень сложны и пока еще не сформулированы и не разрешены достаточно полно и корректно.

Многие исследователи рассматривают бетон как многофазный композиционный материал [57,58,59]. В данном случае под фазой понимается однородная по химическому составу и физическим свойствам часть термодинамической системы, отделенная от других частей (фаз), имеющие иные свойства, границами раздела, на которых происходит изменение свойств [60].

В.И.Калашникова в своих работах [60,61] путем анализа и обобщения существующего объёма экспериментальных данных предложил решение, обеспечивающее повышение показателей эксплуатационных свойств многокомпонентных композитов типа бетонов за счёт формирования оптимальной топологической структуры многокомпонентного материала путем оптимизации размеров зерен дисперсной фазы определенной химической природы совместно с гиперпластификаторами. Эмпирические данные полученные В.И.Калашниковым, могут быть положены в основу методики проектирования оптимальных составов композиционных материалов с повышенным содержанием дисперсной фазы. Однако, предлагаемая им топологическая «двухструктурная модель» композита для практического применения в технологии бетонов сопряжено с определенными трудностями, связанными со сложностями экспериментального определения отдельных величин модели.

В связи с этим исследователями-бетоноведами предложены некоторые другие представления, связанные с моделированием макроструктуры тяжёлого бетона, которые приведены в работах [59,62].

Согласно одной из них в плоский контейнер размером $A \times A$ (без потери общности $A = 1$), у которого левая стенка и дно совпадают с осями координат, в случайном порядке «упаковываются» элементы структуры.

Для круглого зерна 1 (пора, наполнитель и т. п.) задаются три случайных числа, которые определяют случайный выбор одного из возможных радиусов $R^{(1)}$, расстояние центра зерна от левой стенки $x_1^{(1)}$ и от дна $x_2^{(1)}$. Поскольку контейнер пока пустой, то все эти числа запоминаются ЭВМ. Следующее зерно 2 считается неупакованным и не запоминается, поскольку оно пересеклось со стенкой (нарушено условие $R^{(2)} \leq x_1^{(2)} \leq 1 - R^{(2)}$). Зерно 3 укладывается в контейнер, так как оно попало на пустое место (выполнено условие $|x_i^{(3)} - x_i^{(1)}| \geq R^{(1)} + R^{(3)}$), а вот информация о зерне 4 не запоминается в ЭВМ, так как оно пересекает уже уложенное зерно 1 . Повторяя процедуру n раз, можно «заполнить» контейнер, промоделировав случайную укладку зерен, радиусы которых подчиняются заданному закону распределения, и тем самым оценить, в частности, пустотность (пористость, проницаемость и т. п.) материала. Следует отметить, что существуют алгоритмы, «сдвигающие» зерно, попавшее на занятое место, до тех пор, пока оно не упакуется. Кроме того, у каждого зерна $1, 2, 3, \dots$ может быть свой случайно распределенный или связанный с размером зерна уровень физического свойства (модуль упругости, электропроводность, плотность и др.), что расширяет круг решаемых с помощью такого «контейнера» инженерных задач.

При этом структурные элементы могут иметь форму, отличную от сферической. Для фиксации прямоугольника 5 (кристалл, волокно и т. п.) кроме координат центра x_i нужно задать еще три случайные величины: размер одной из сторон L , соотношение между сторонами $L:b$, угол наклона φ к оси координат. Для фиксации многоугольника 6 (крупный наполнитель и т. п.) дополнительно задаются радиус описанной окружности $R^{(6)}$ и n координат (четыре угла φ_i) его вершин.

Важнейшими структурными элементами, особенно в задачах моделирования деформации и прочности материалов типа МВБ методами ме-

ханики разрушения, являются дефекты — трещины в матрицах разного структурного уровня [62].

В подавляющем большинстве случаев процесс разрушения бетона происходит в результате прорастания одной из трещин или семейства разветвленных трещин через его сечение. Такие трещины часто называют магистральными. После нагружения бетонного образца магистральная трещина в течение долгого времени не наблюдается, а затем, появившись и с большой скоростью “пробега” через образец быстро его разрушает.

Как показывает анализ сложившихся к настоящему времени представлений о закономерностях хрупкого разрушения, в материалах типа бетона протекают следующие физические процессы:

- образование зародышевых микротрещин;
- стагнация микротрещин (нестабильный рост);
- распространение или блокировка (торможение) трещин в достаточно характерном для данного материала объеме, содержащем такие структурные элементы (границы заполнителей, поры и полости различного происхождения), которые могут быть препятствиями для микротрещин, а также при попадании трещины в зону действия сжимающих напряжений [63,64].

Трещины на контактах матрицы и включений (зерно 7 на рис.2.1, а) распределяются в случайном порядке сначала по зернам, а потом на одну из граней выбранного зерна. Если имитируются трещины, возникающие от седиментационного расслоения смеси, то они располагаются всегда на нижней части зерна (8 на рис.2.1, а). Трещины около отверстий (пор) моделируются структурным элементом 9, для которого обычно задается случайный угол наклона φ , а также, при необходимости, случайные радиусы поры R и длина трещины l . Допустимо такое расположение двух пор, при котором трещины пересекаются, образуя непрерывную слившуюся трещину.

В зависимости от постановки задач моделирования структуры и свойств композиционных строительных материалов типа МВБ могут быть распределены и другие элементы: ленты разной длины и конфигурации,

каналы с узлами запираания, сети и т. п., а сам контейнер может быть объемным.

Алгоритм, описывающий закономерности поведения структуры при изменении условий внешней среды, строится, как правило, прежде всего как пошаговый процесс поведения каждого типа элементов структуры (с учетом возможного взаимодействия с контактирующими соседними элементами). Поскольку единичный элемент достаточно сильно упрощен, то для описания происходящих с ним изменений построить математическую модель не так сложно, как для структуры в целом. При этом можно использовать любые модели, но наиболее удачными, как правило, являются модели концептуальные, в которых четко прослеживаются физические особенности процесса. Например [59,62], пора I в нагруженном материале описывается формулами технической механики как круговой концентратор напряжений. После того как пиковые напряжения превысят некоторый уровень и появится радиальная трещина, произойдет переход к другим формулам технической механики, описывающим деформации элемента 9. Когда длина трещины значительно превысит радиус отверстия или две соседние трещины сольются в элемент 10, то для описания процесса деформации потребуется третий комплекс формул (таблиц, графиков и т. п.).

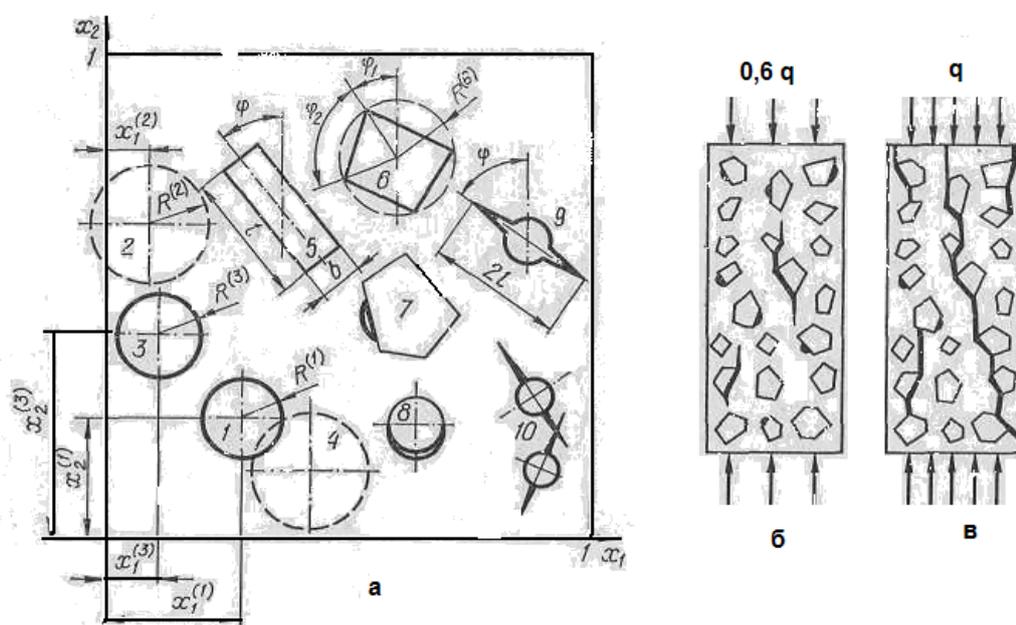


Рис.2.1 Имитационная структура КСМ типа бетона

a — упаковка контейнера элементами структуры; *б, в* — «изменения в структуре КСМ» при изменении внешней нагрузки

После того как произошедшие со всеми индивидуальными элементами изменения зафиксированы в ЭВМ, они могут быть тем или иным образом интегрированы (или усреднены, или представлены, мажорантами и т. п.) и переданы для обсуждения оператору-исследователю. Если после данного шага никаких существенных перемен (границы которых заранее определены исследователем) не произошло, то будет автоматически совершен следующий шаг в изменении условий внешней среды и так последовательно (рис.2.1, *б, в*) до наступления критического состояния в структуре (разрушение, электрический пробой, сквозной проход жидкости и др.).

Уровень влияния внешней среды (нагрузка, электрическое напряжение, давление жидкости и др.), при котором достигается критическое состояние, а также общий характер процесса поведения материала при воздействии внешней среды сравниваются с результатами натурального эксперимента. На основе такого сравнения и принимается решение об адекватности модели.

Преимущества вышеизложенного принципиально нового подхода к анализу и моделированию структуры и свойств композиционных строительных материалов типа многокомпонентных бетонов очевидны. Однако, необходимо подчеркнуть две особенности такого моделирования: во-первых, на любом этапе исследования в связи с появлением более сильных физических гипотез или точных формул можно некоторую часть имитационной модели заменить; во-вторых, в ходе реализаций статистических испытаний можно выявить те сочетания структурных элементов и влияния внешней среды, при которых моделируемое свойство или явление идет по неизвестному направлению, что открывает возможности целенаправленного создания качественно новых материалов и технологий.

Исследование бетонов с высокими эксплуатационными показателями (БВЭП), которые по сути являются высокопрочными бетонами, содержащими в своем составе модифицирующие добавки и минеральные наполнители требуют

нового подхода при рассмотрении вопроса моделирования их структуры и свойств.

Как показывает анализ данных литературных источников [58,65] в ранее выполненных научных исследованиях в рамках полиструктурной теории композиционных строительных материалов (ПТ КСМ) академика Соломатова В.И.(Россия), в том числе и по исследованию модифицированных наполненных бетонов, наименьшее внимание уделялось вопросам прогнозирования их прочностных свойств, которые в свою очередь являются основой для прогнозирования срока службы изготовленных из этого бетона конструктивных элементов зданий и сооружений. Практически во всех ранее выполненных научных исследованиях в рамках ПТ КСМ, при решении вопросов оптимизации структуры и свойств композиционных материалов на различных структурных уровнях основное внимание уделялось применению математических методов моделирования, и как правило с использованием метода математического планирования экспериментов. При этом целесообразность применения математических моделей диктовалась возможностью определения (аналитическим или графоаналитическим методом) оптимальных значений основных структурообразующих параметров наполнителей, таких как: удельная поверхность и степень наполнения. Однако практика показывает, что применение математических методов моделирования для модифицированных наполненных бетонов на различных структурных уровнях приводит к излишнему увеличению экспериментальных исследований, а также некоторому дублированию полученных результатов. Кроме того, использование математических моделей правомерно лишь в строго определенном интервале варьирования переменных факторов, поэтому математические модели различных свойств модифицированного наполненного бетона на мезо- и макро-уровнях не могут быть одинаково успешно (как и при решении оптимизационных задач) использованы для решения вопроса прогнозирования их прочностных свойств. В связи с этим применяются методы структурно-

имитационного моделирования, получающее успешное развитие на базе современной отрасли науки – механики разрушения [62].

Для разработки математического описания процесса развития трещин в бетоне было создано исходная модель материала. Анализ и обобщение существующего объёма экспериментальных данных, проведенных исследователями-бетоноведами дает возможность сформулировать такую модель. Модель основана на ряде упрощающих гипотез и сводится к следующему [62]:

1) рассматривается твердое тело в виде матрицы с включениями (зернами заполнителя) различного размера, с дефектами первого (поры) и второго (трещины) рода на различных уровнях структуры материала;

2) дефекты первого рода имеют различное очертание, но один и тот же характерный размер и рассматриваются на одном лишь микроуровне;

3) дефекты второго рода могут иметь различные очертания и размеры; они подлежат рассмотрению на микро- и макроуровне;

4) материал матрицы между дефектами и включениями является однородным;

5) материал матрицы между дефектами и включениями является изотропным;

6) размер дефектов и включений – величина малая по сравнению с размерами тела;

7) деформации являются малыми;

8) трехосное напряженное состояние может быть заменено двухосным – плоским напряженным состоянием;

9) при кратковременном действии нагрузки считается возможным пренебречь явлением ползучести и полагать, что материал в основном своей массе (кроме зоны, непосредственно примыкающей к трещинам) работает упруго; одновременно учитывается влияние возможной физической нелинейности материала;

10) при длительном действии нагрузки считается допустимым переход от решений упругомгновенной задачи путем использования оператора $1/\tilde{E}$;

здесь также учитывается влияние физической нелинейности материала как для упругомгновенных, так и для длительных деформаций.

Метод структурно-имитационного моделирования (СИМ) отражает развитие системного подхода в материаловедении, открывает принципиально новые возможности в использовании ЭВМ для прогнозирования свойств и оптимизации структуры создаваемых материалов, включает в себя обобщение и систематизацию разнообразной информации, полученной на основе микроструктурных исследований, фрактографического анализа, регистрации сигналов акустической эмиссии и других экспериментальных методов.

Методы, опирающиеся на широкое применение ЭВМ, в настоящее время используются и при непосредственной разработке технологических процессов получения новых материалов, и при автоматическом проектировании конструкций из них. Структурно-имитационное моделирование процессов разрушения материалов может рассматриваться как отдельное звено в цепи автоматического проектирования, начинающейся с выбора и оптимизации технологических режимов и заканчивающейся прогнозированием эксплуатационных характеристик создаваемых конструкций. В настоящее время рядом организаций начаты работы по стыковке этих подходов, при этом включение СИМ в цепь автоматического проектирования не встречает принципиальных трудностей, в силу достаточно строгой формализации входных и выходных параметров.

Другой аспект развития и применения метода СИМ состоит в исследовании фундаментальных проблем разрушения материалов. В силу того, что процессы разрушения развиваются на различных структурных уровнях материала, построение алгоритмизированной теории разрушения, основанной на дальнейшем развитии метода структурно-имитационного моделирования, должно предусматривать многомасштабное моделирование процессов разрушения. Многомасштабное структурно-имитационное моделирование (МОИМ) включает в себя: выделение структурных уровней в материале, имитацию на ЭВМ механизмов разрушения и процессов накопления

повреждений, характерных для этих уровней; воспроизведение на ЭВМ качественных переходов от процессов на более глубоких структурных уровнях к процессам на последующих уровнях [56].

2.2 Разработка алгоритма программного комплекса “Модель-бетон”

Эффективность научных исследований в области оптимизации состава бетона, помимо прочих равных факторов, зависит от максимального сокращения сроков перехода от лабораторных исследований к промышленным реализации. Здесь решающую роль играют методы математического моделирования, позволяющие ускорить этапы и процесс исследования в целом.

Внедрение в практику промышленного производства строительных материалов систем автоматизированного проектирования позволяет сократить время, так как появляется возможность моделировать составы материалов, имеющие определенные рецептурно-технологические параметры [66].

Рассмотрим общую схему процесса проектирования состава бетонной смеси (рис.2.2).

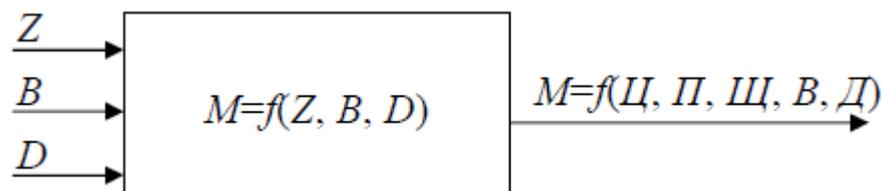


Рис.2.2. Схема процесса проектирования состава бетонной смеси

На данной схеме выделены входные и выходные параметры. На входе функции характеристик заполнителей (Z), требуемых характеристик бетонной смеси и бетона (B), а также характеристик химических добавок (D). На выходе будут массовые показатели компонентов готовой бетонной смеси: цемента (Ц), песка (П), крупного заполнителя (Щ), воды (В), химических добавок (Д). На основании представленной схемы и изложенной в литературе и СНиПе методики расчета состава бетонной смеси [46] построим математическую

модель расчета составов тяжелых бетонов расчетно-экспериментальным методом.

Выходная функция конечного состава бетонной смеси, согласно требованиям СНиП [68], определяется как:

$$M=f(Z, B, D), \quad (2.1)$$

каждая из входных функций определяется следующим образом:

$$Z=f(R_{ц}, \rho_{ц}, \rho_{п}, \rho_{кр}, M_{кр}, W_{п}, W_{кр}, r); \quad (2.2)$$

$$B=f(R_{б}, B/Ц, ПЖ); \quad (2.3)$$

$$D=f(K_{д}, \rho_{д}, C_{д}, \rho_{рд}), \quad (2.4)$$

где $R_{ц}$ – активность цемента, МПа; $\rho_{ц}$ – плотность цемента, г/см³; $\rho_{п}$ – плотность песка, г/см³; $\rho_{кр}$ – плотность крупного заполнителя, г/см³; $M_{кр}$ – наибольший размер зерен крупного заполнителя, мм; $W_{п}$ – влажность песка, %, $W_{кр}$ – влажность крупного заполнителя, %; r – требуемое соотношение между песком и крупным заполнителем по массе; $R_{б}$ – требуемое значение прочности бетона на 28 суток после изготовления бетонной смеси, МПа; $B/Ц$ – водоцементное отношение; $ПЖ$ – требуемое значение подвижности, см, или жесткости, с, бетонной смеси; $K_{д}$ – количество сухого вещества добавки, % от массы цемента; $\rho_{д}$ – плотность добавки, г/см³; $C_{д}$ – концентрация раствора добавки, %; $\rho_{рд}$ – плотность раствора добавки, г/см³.

Все параметры функций Z и D измеряются специальными приборами. В качестве параметров функции B берутся требуемые значения прочности бетонной смеси, водоцементного отношения и подвижности (жесткости) бетонной смеси.

За основу расчета состава тяжелого бетона была выбрана методика, описанная в СНиПе [67], а также соответствующие нормативные документы [29,69].

Первоначально определяют ориентировочное значение водо-цементного отношения. В литературе и нормативных документах предлагаются различные зависимости:

а) СНиП [67]:

$$B/\Omega = f(R_{\Omega}, R_{\beta}) = \frac{0,45R_{\Omega}}{R_{\beta}+0,18R_{\Omega}} \quad (2.5)$$

б) ГОСТ [29]:

- при использовании добавки-пластификатора

$$B/\Omega = f(R_{\Omega}, R_{\beta}) = \frac{0,48R_{\Omega}}{R_{\beta}+0,39R_{\Omega}} \quad (2.6)$$

-при использовании добавки-суперпластификатора

$$B/\Omega = f(R_{\Omega}, R_{\beta}) = \frac{0,68R_{\Omega}}{R_{\beta}+R_{\Omega}} \quad (2.7)$$

в) Б.Г. Скрамтаев, Ю.М. Баженов [4,12,22]:

$$B/\Omega = f(R_{\Omega}, R_{\beta}, A) = \frac{A \times R_{\Omega}}{R_{\beta}+0,5A \times R_{\Omega}} \quad (2.8)$$

где A – коэффициент качества заполнителей.

На основе экспериментальных данных была получена следующая зависимость:

$$B/\Omega = f(R_{\Omega}, R_{\beta}) = \frac{0,35R_{\Omega}}{R_{\beta}+0,03R_{\Omega}} \quad (2.9)$$

По значениям наибольшей крупности зерен крупного заполнителя и требуемой подвижности или жесткости смеси определяется количество воды для затворения 1 м³ бетонной смеси, необходимой для получения требуемой удобоукладываемости.

Количество воды зависит от удобоукладываемости бетонной смеси (подвижности или жесткости) и модуля крупности гравия (щебня):

$$B=f(\text{ПЖ}, M_{\text{кр}}). \quad (2.10)$$

Для определения количества воды были получены зависимости(2.11)–(2.20).

Для подвижных смесей:

$$B = 0,032 * u^2 - 1,966 * u + 189,52 \text{ при } M_{\text{кр}}=10; \quad (2.11)$$

$$V = 0,027 \cdot u^2 - 1,798 \cdot u + 173,37 \text{ при } M_{кр}=20; \quad (2.12)$$

$$V = 0,023 \cdot u^2 - 1,581 \cdot u + 157,58 \text{ при } M_{кр}=40; \quad (2.13)$$

$$V = 0,018 \cdot u^2 - 1,413 \cdot u + 141,43 \text{ при } M_{кр}=80 \quad (2.14)$$

$$\text{или } V = -0,09 \cdot u^2 + 4,68 \cdot u + 0,01 \cdot M_{кр}^2 - 1,48 \cdot M_{кр} + 190,81, \quad (2.15)$$

где $M_{кр}$ – наибольший размер зерен гравия, мм; u – подвижность бетонной смеси, см.

Для жестких смесей:

$$V = -0,071 \cdot u^2 + 4,481 \cdot u + 178,38 \text{ при } M_{кр}=10; \quad (2.16)$$

$$V = -0,079 \cdot u^2 + 4,492 \cdot u + 163,68 \text{ при } M_{кр}=20; \quad (2.17)$$

$$V = -0,105 \cdot u^2 + 4,869 \cdot u + 147,68 \text{ при } M_{кр}=40; \quad (2.18)$$

$$V = -0,099 \cdot u^2 + 4,877 \cdot u + 132,31 \text{ при } M_{кр}=80 \quad (2.19)$$

$$\text{или } V = 0,03 \cdot u^2 - 1,79 \cdot u + 0,02 \cdot M_{кр}^2 - 1,89 \cdot M_{кр} + 204,57, \quad (2.20)$$

где $M_{кр}$ – наибольший размер зерен гравия, мм; u – жесткость бетонной смеси.

При использовании щебня расход воды увеличивается на 10л. При использовании песка с водопотребностью более (менее) 7% расход воды увеличивают (уменьшают) на 5л на каждый процент увеличения (уменьшения) водопотребности.

Производят корректировку количества воды с учетом введения добавки. При использовании добавки-пластификатора количество воды уменьшают на 10л, при использовании суперпластификатора – на 20л, при использовании гиперпластификатора – на 30л.

По водоцементному отношению и количеству воды определяют расход цемента на 1 м³ бетонной смеси:

$$Ц = f\left(\frac{V}{Ц}, V\right) = \frac{V}{V/Ц} = \frac{f(PЖ, M_{кр})}{f(RЦ, RБ)} \quad (2.21)$$

При использовании добавки-пластификатора расход цемента корректируется следующим образом [69]:

$$Ц = k \cdot Ц, \quad (2.22)$$

где k – поправочный коэффициент (табл. 2.1).

Затем сравнивают найденное количество цемента с соответствующими нормами расхода цемента и производят корректировку.

Таблица 2.1

Значение поправочного коэффициента

Вид добавки	Коэффициент
Пластификатор	0,9
Суперпластификатор	0,8
Гиперпластификатор	0,7

На основании требований СНиПа [69] была получена регрессионная зависимость для определения нормы расхода цемента марки М400 для тяжелого бетона с маркой по удобоукладываемости П1 на заполнителе с наибольшей крупностью 20 мм:

$$HЦ=f(Rб)=0,079* Rб^2 + 4,116*Rб + 135,93. \quad (2.23)$$

Далее расход цемента корректируется с учетом марки цемента, наибольшей крупности зерен крупного заполнителя (далее щебня) и удобоукладываемости бетонной смеси с помощью соответствующих поправочных коэффициентов (табл. 2.2-2.4):

$$Ц=Ц*К, \quad (2.24)$$

где К – поправочный коэффициент.

Таблица 2.2

Значение поправочного коэффициента

Наибольшая крупность зерен заполнителя, мм	Класс бетона по прочности на сжатие	
	До В24 включительно	В30 и выше
10	1,1	1,07
40	0,93	0,95
70	0,9	0,92

Таблица 2.3

Значение поправочного коэффициента

Удобоукладываемость			Коэффициент
Марка бетона по удобоукладываемости	Подвижность, см	Жесткость, см	
П2	5-9	-	1,07
Ж1	-	5-10	0,93
Ж2	-	11-20	0,88

Таблица 2.4

Значение поправочного коэффициента

Марка цемента	Коэффициент
М500	1,13
М300	0,88

Дальнейший расчет ведется исходя из того, что сумма абсолютных объемов составляющих материалов равна 1 м³ плотно уложенной бетонной смеси. Определяют абсолютный объем цементного теста и абсолютный объем смеси заполнителей, а также массу каждого заполнителя и химических добавок в 1 м³ [4,12,22,23,46,47,67,70,].

Абсолютный объем цементного теста вычисляется по формуле:

$$V_T = f(C, D, B, \rho_c, \rho_d) = \frac{C}{\rho_c} + \frac{D}{\rho_d} + B = \frac{f(PЖ, Mкр)}{f(R_c, R_b) \times \rho_c} + \frac{D}{\rho_d} + f(PЖ, Mкр) \quad (2.25)$$

Абсолютный объем смеси заполнителей вычисляется по формуле:

$$V_3 = f(V_T) = 1000 - V_T = 1000 - \frac{f(PЖ, Mкр)}{f(R_c, R_b) \times \rho_c} - \frac{D}{\rho_d} - f(PЖ, Mкр) \quad (2.26)$$

Затем определяют массу заполнителей по формуле:

$$З = f(V_3, \rho_3) = V_3 \times \rho_3 = \left(1000 - \frac{f(\text{ПЖ, Мкр})}{f(R_{ц, Rб}) \times \rho_{ц}} - \frac{Д}{\rho_{д}} - f(\text{ПЖ, Мкр})\right) \times \rho_3 \quad (2.27)$$

где ρ_3 – приведенная плотность смеси заполнителей, равная

$$\rho_3 = \frac{\rho_{кр+r\rho n}}{1+r} \quad (2.28)$$

здесь r – заданное соотношение по массе между песком и щебнем.

Таким образом, масса заполнителей определяется по формуле:

$$З = \left(1000 - \frac{f(\text{ПЖ, Мкр})}{f(R_{ц, Rб}) \times \rho_{ц}} - \frac{Д}{\rho_{д}} - f(\text{ПЖ, Мкр})\right) \times \frac{\rho_{кр+r\rho n}}{1+r} \quad (2.29)$$

Количество щебня вычисляется по формуле:

$$\text{Щ} = f(З, r) = \frac{З}{1+r} = \left(1000 - \frac{f(\text{ПЖ, Мкр})}{f(R_{ц, Rб}) \times \rho_{ц}} - \frac{Д}{\rho_{д}} - f(\text{ПЖ, Мкр})\right) \times \frac{\rho_{кр+r\rho n}}{(1+r)^2} \quad (2.30)$$

Количество песка определяется как разница между массой заполнителей (З) и массой щебня (Щ):

$$\begin{aligned} \text{П} &= f(З, \text{Щ}) = З - \text{Щ} = \left(1000 - \frac{f(\text{ПЖ, Мкр})}{f(R_{ц, Rб}) \times \rho_{ц}} - \frac{Д}{\rho_{д}} - f(\text{ПЖ, Мкр})\right) \times \\ &\times \frac{\rho_{кр+r\rho n}}{(1+r)^2} - \left(1000 - \frac{f(\text{ПЖ, Мкр})}{f(R_{ц, Rб}) \times \rho_{ц}} - \frac{Д}{\rho_{д}} - f(\text{ПЖ, Мкр})\right) \times \frac{\rho_{кр+r\rho n}}{(1+r)^2} = \\ &= \left(1000 - \frac{f(\text{ПЖ, Мкр})}{f(R_{ц, Rб}) \times \rho_{ц}} - \frac{Д}{\rho_{д}} - f(\text{ПЖ, Мкр})\right) \times \frac{(\rho_{кр+r\rho n})r}{(1+r)^2} \quad (2.31) \end{aligned}$$

или как произведение значения соотношения по массе между песком и щебнем (r) на массу щебня (Щ):

$$\begin{aligned} \text{П} &= r * \text{Щ} = r * \left(1000 - \frac{f(\text{ПЖ, Мкр})}{f(R_{ц, Rб}) \times \rho_{ц}} - \frac{Д}{\rho_{д}} - f(\text{ПЖ, Мкр})\right) \times \frac{\rho_{кр+r\rho n}}{(1+r)^2} = \\ &= \left(1000 - \frac{f(\text{ПЖ, Мкр})}{f(R_{ц, Rб}) \times \rho_{ц}} - \frac{Д}{\rho_{д}} - f(\text{ПЖ, Мкр})\right) \times \frac{(\rho_{кр+r\rho n})r}{(1+r)^2} \quad (2.32) \end{aligned}$$

Методика проектирования состава тяжелого бетона без добавок расчетно-экспериментальным методом аналогична приведенной методике, из формул (2.25)–(2.32) следует исключить величину $\frac{D}{\rho_d}$.

Далее производят перерасчет количества заполнителей с учетом их влажности, свойств вводимой химической добавки и передают состав на производство [6,71,72].

Для успешного применения математических методов и управления технологией бетона и железобетона большое значение имеют правильная оценка технологических факторов и выбор соответствующих критериев. В ряде случаев это требует совершенствования существующих методов определения свойств материалов и параметров технологических процессов, разработки таких методов испытаний и выбора параметров и характеристик материалов, которые отвечают по точности и достоверности, применяемым методам математических исследований и анализу технологических систем.

Системы можно разделить на два класса: детерминированные и стохастические, хотя в практике производства исследуемые системы часто не делятся столь четко [73].

К детерминированным относят системы, в которых составные части взаимодействуют точно предвидимым образом. При исследовании детерминированной системы не возникает никакой неопределенности. Изменение одного из элементов системы на некоторую величину всегда вызывает изменение другого или других на строго определенную величину.

В терминах технологии бетона это соответствует следующему: если величина какого-то технологического фактора X_i изменится на ΔX , то свойство Y_i всегда изменится на ΔY . Отдельные подсистемы технологии бетона можно отнести к детерминированным, например, уменьшение диаметра шариковидных зерен приводит к увеличению их удельной поверхности.

Для стохастической (вероятностной) системы нельзя сделать точного детального предсказания. Такую систему можно тщательно исследовать и установить с большой степенью вероятности, как она будет себя вести в любых

заданных условиях. Однако система все-таки остается неопределенной и любое предсказание относительно ее поведения никогда не может выйти из логических рамок вероятностных категорий, с помощью которых это поведение описывается. В стохастических системах изменение одного из элементов не всегда вызывает изменение другого (связанного с ним), а только в некоторых случаях. Если X_i изменился на ΔX , то R_K изменится на $\Delta R + \varphi$, где φ – случайная величина.

Если под действием случайности $\varphi = -\Delta R$, то влияние X_i на R_K вообще в данном наблюдении обнаружено не будет.

В технологии бетона и железобетона стохастические системы имеют большое распространение. Например, распределение составляющих и элементов структуры подчиняется вероятностно-статистическим закономерностям, роль случайного эффекта возрастает при увеличении объемов (при переходе от лабораторных образцов к изделиям), а также при переходе от единичной к массовой продукции.

В технологической системе действует большое число взаимосвязанных факторов X_i . Из них только часть можно детерминированно учесть, а остальные факторы всегда создадут случайный эффект, поэтому использование стохастических систем в технологии сборного железобетона позволяет успешно решать многие задачи управления качеством и производством.

При этом вопрос формулировки цели решается в каждом отдельном случае на основе технологических и экономических условий. Целью может быть, например, достижение железобетоном оптимального качества и поддержание его на этом уровне с максимальной стабильностью. Средством к достижению цели является управление технологическими факторами X_i , действующими в технологии как в сложной стохастической системе.

Необходимо прийти к цели, например, получению заданной прочности R , выбирая вид основных компонентов бетона, его рецептуры, тип оборудования и режимы работы.

Степень достижения цели характеризует показатель, который называют критерием эффективности или оптимальности. В качестве критерия могут быть выбраны различные показатели: прочность или другие свойства бетона, производительность завода или цеха, себестоимость продукции и др. Выбор критерия определяется назначением рассматриваемой системы. Каждому варианту решения соответствует определенное значение выбранного критерия, и задача оптимального управления состоит в том, чтобы выбрать и реализовать такой вариант, при котором критерий имеет экстремальное (максимальное или минимальное) значение при данных условиях производства.

Для определения критерия эффективности используют функцию:

$$I=f(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

где x_i – все факторы, существенным образом влияющие на исследуемый процесс. Эту функцию обычно называют целевой, а в математической теории эксперимента – функцией отклика.

Задается лишь один критерий эффективности, ибо при определенном варианте решения можно добиться экстремума лишь одного критерия и невозможно, чтобы два произвольно заданных критерия достигали экстремума одновременно, если нет случайного совпадения. В некоторых случаях могут приниматься компромиссные решения, расположенные в зоне Δx , когда за счет некоторого снижения критерия I_1 достигается рост I_2 (рис.2.3).

Неверны требования такого типа: «достигнуть максимальной прочности бетона при минимальном расходе цемента». Корректной является постановка задачи например в такой формулировке: «достигнуть максимальной прочности бетона при условии, если расход цемента C не превысит $C_{кр}$, а технологический параметр S не выйдет за пределы $S_{кр}$ ». В такой формулировке указан не только критерий эффективности, но и пределы, в которых могут изменяться управляемые факторы, т. е. даны их ограничения.

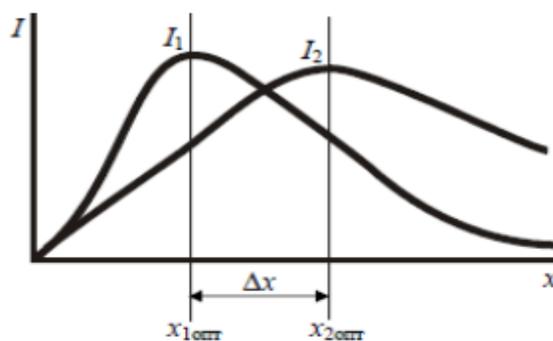


Рис. 2.3. Критерии эффективности и зона оптимальных решений

Во всех реальных ситуациях на технологические факторы наложены определенные ограничения, т. е. $(x_i)_{\min} < x_i < (x_i)_{\max}$. Например, подвижность бетонной смеси должна быть в пределах, обеспечивающих ее плотную укладку без расслоения, температура тепловлажностной обработки бетона при атмосферном давлении не должна быть более 100°C и т.д. Кроме того, обычно имеют место ограничения материальных ресурсов (количество и качество сырья, типы оборудования, финансовые и трудовые возможности и т.д.) и времени для достижения цели [12,74-77].

К критериям эффективности, предназначенным для технологических решений, предъявляется ряд требований:

1) критерий должен характеризовать эффективность технологии с учетом конечной цели производства, а не отдельных его этапов, однако в сложных системах при использовании ступенчатой оптимизации допускается применение разных критериев на каждом этапе;

2) критерий должен быть количественным и однозначным, причем желательно, чтобы он имел физический смысл и легко вычислялся (если у критерия нет числовой оценки, то, как исключение, допустимо применение рангов 1, 2, ... по некоторым формализованным шкалам);

3) критерий должен обладать статистической эффективностью, которая характеризуется нечувствительностью критерия к малым случайным воздействиям и минимальной (в пределах метрологической точности) ошибкой воспроизводимости для параллельных опытов в одной серии;

4) критерий по возможности должен обладать универсальностью, т.е. учитывать и экономическую, и техническую стороны технологии (например, относительная прочность бетона на единицу расхода цемента, более универсальный критерий, чем абсолютная прочность бетона).

Правильный выбор критерия эффективности – необходимое условие успешного принятия оптимального решения.

Наличие ограничений позволяет сформулировать два типа задач оптимизации [78]:

1) достижение заданного уровня критерия эффективности при минимальном расходе ресурсов или получение технических характеристик не хуже заданных при минимизации стоимости (например, подбор состава заданной марки бетона при минимальном расходе цемента);

2) достижение максимального уровня критерия эффективности при полном расходе выделенных для достижения цели ресурсов или обеспечение при стоимости, не превышающей заданную, максимизацию технических характеристик (например, достижение заводом максимального выпуска бетона при определенных запасах цемента).

Таким образом, задачу оптимального проектирования можно представить в виде целевой функции и системы ограничений:

$$\left. \begin{array}{l} 1) \\ F_1 = C(\bar{x}) \rightarrow \min, \\ C(\bar{x}) = f_1(T(\bar{x})), \\ \min \bar{x} \leq \bar{x} \leq \max \bar{x}, \\ T(\bar{x}) \geq T_{\text{зад}}, \end{array} \right\} \quad \left. \begin{array}{l} 2) \\ F_2 = T(\bar{x}) \rightarrow \max, \\ T(\bar{x}) = f_2(C(\bar{x})), \\ \min \bar{x} \leq \bar{x} \leq \max \bar{x}, \\ C(\bar{x}) \leq C_{\text{зад}}, \end{array} \right\}$$

где \bar{x} – параметры объекта проектирования; $C(\bar{x})$ – экономические характеристики; $T(\bar{x})$ – технические характеристики.

В своем исследовании мы будем решать задачу оптимизации первого типа.

При оптимальном проектировании важными элементами математической модели являются зависимости между параметрами объекта проектирования как в форме ограничений, так и целевой функции. Такие

зависимости могут быть теоретическими и статистическими[78,79,81]. Если теоретические зависимости отсутствуют, то необходимые соотношения можно определить на основании имеющихся статистических данных. Для этого определяют вид аналитической зависимости и с помощью метода наименьших квадратов определяют конкретный вид принятых зависимостей.

Полученные аналитические зависимости называются уравнениями регрессии и в общем случае имеют вид $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

В качестве параметров объекта проектирования для тяжелого бетона выберем следующие данные (расход материалов указан для приготовления 1 м^3 бетонной смеси):

- 1) удобоукладываемость бетонной смеси (ОК), см;
- 2) соотношение по массе между мелким и крупным заполнителем (П/Щ);
- 3) водоцементное отношение (В/Ц);
- 4) водопотребность бетонной смеси (В), л;
- 5) расход песка (П), кг;
- 6) расход цемента (Ц), кг;
- 7) расход крупного заполнителя (Щ), кг;
- 8) расход добавки (Д), кг;
- 9) плотность песка ($\rho_{\text{п}}$), кг/м³;
- 10) плотность цемента ($\rho_{\text{ц}}$), кг/м³;
- 11) плотность крупного заполнителя ($\rho_{\text{щ}}$), кг/м³;
- 12) плотность добавки ($\rho_{\text{д}}$), кг/м³.

В качестве экономических характеристик бетонной смеси выберем себестоимость бетонной смеси:

-бетон без добавки:

$$C(x) = f(C, П, Щ, В) = C_{\text{ц}}C + C_{\text{п}}П + C_{\text{щ}}Щ + C_{\text{в}}В;$$

-бетон с добавкой:

$$C(x) = f(C, П, Щ, В, Д) = C_{\text{ц}}C + C_{\text{п}}П + C_{\text{щ}}Щ + C_{\text{в}}В + C_{\text{д}}Д,$$

где Сц, Сп, Сщ, Св, Сд – стоимость цемента, песка, щебня, воды и добавки соответственно, сум/кг.

В качестве технических характеристик бетонной смеси можно выбрать прочность бетона при сжатии (Rсж), плотность бетона (ρб), морозостойкость (F) или другое свойство бетона.

Между объемом бетонной смеси и параметрами объекта проектирования существует теоретическая зависимость [4,9,12,22,23,46,47]

$$V = \frac{Ц}{\rho_{ц}} + \frac{П}{\rho_{п}} + \frac{Щ}{\rho_{щ}} + \frac{Д}{\rho_{д}} + В$$

Для определения зависимости между свойствами бетона и параметрами объекта проектирования была произведена обработка статистических данных, в результате которой были получены уравнения регрессии.

Таким образом, математическая модель проектирования оптимального состава бетонной смеси будет иметь следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} f = C(\bar{x}) &= C_в B + C_ц Ц + C_п П + C_щ Щ + C_д Д \rightarrow \min; \\ \min_{OK} &\leq OK \leq \max_{OK}; \\ \min_B &\leq B \leq \max_B; \\ \min_{Ц} &\leq Ц \leq \max_{Ц}; \\ \min_{П/Щ} &\leq П/Щ \leq \max_{П/Щ}; \\ \min_D &\leq Д \leq \max_D; \\ B/Ц &= B/Ц_{зад}; \\ V &= \frac{Ц}{\rho_{ц}} + \frac{П}{\rho_{п}} + \frac{Щ}{\rho_{щ}} + \frac{Д}{\rho_{д}} + B = 1000; \\ T(\bar{x}) &= f(Ц, B/Ц, П/Щ, Д) \geq T_{зад}. \end{aligned} \right\}$$

Минимальный и максимальный расход воды и цемента определяются с учетом требований СНиПов и ГОСТов по подбору состава бетонной смеси- формулы (2.11)-(2.24), в зависимости от крупности зерен заполнителя, удобоукладываемости бетонной смеси, требуемой прочности бетона и активности цемента. Значение водоцементного отношения определяется по формуле (4.9). Диапазон значений для добавки определяется с учетом рекомендуемых дозировок [24,34,69].

Диапазон значений удобоукладываемости задается в соответствии с требованиями по удобоукладываемости проектируемой бетонной смеси.

Выводы по главе 2.

1. Проведен анализ основных принципов структурно- имитационного моделирования процессов разрушения бетонов;
2. Разработана математическая модель для прогнозирования свойств бетона, установлены зависимости качественных показателей бетона (прочность при сжатии, плотность) от состава бетонной смеси;
3. Разработана математическая модель проектирования оптимальных составов бетонных смесей, позволяющая получить бетон с заданными свойствами при минимальных затратах на основе полученных зависимостей свойств бетона;
4. Разработан алгоритм программного комплекса;
5. Разработана система автоматизированного проектирования составов бетонных смесей и прогнозирования свойств бетона.

3. РАЗРАБОТКА ИНСТРУКЦИЙ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «МОДЕЛЬ- БЕТОН» И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЕГО В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

3.1 Инструкция по использованию программного комплекса «модель- бетон»

Проектирование состава бетонной смеси и планирование испытаний являются достаточно трудоемкими и наиболее уязвимыми с точки зрения возникновения ошибок этапами технологического процесса приготовления бетонной смеси. Ошибки при осуществлении расчетов могут привести к появлению брака, а значит, увеличению времени изготовления бетона, дополнительной амортизации оборудования, перерасходу материалов и денежных средств, тем более что стоимость железобетонных конструкций достаточно высока. Автоматизация процесса проектирования состава бетонной смеси позволит исключить ошибки при расчете, снизить вероятность

осуществления корректировки расчетов и сократить время всего проектирования в целом[81,82,83].

Система автоматизированного проектирования состава тяжелого бетона разработана в среде программирования MS Visual c#.

MS Visual Studio – линейка продуктов компании Microsoft, включающих интегрированную среду разработки программного обеспечения и ряд других инструментальных средств. Данные продукты позволяют разрабатывать как консольные приложения, так и приложения с графическим интерфейсом, в том числе с поддержкой технологии Windows Form, а также веб- сайты, веб-приложения, веб- службы как в родном, так и в управляемых кодах для всех платформ, поддерживаемых Windows, Windows Mobile, Windows CE, NET Framework и др.

Работа с модулем осуществляется в диалоговом режиме, реализованном в виде мастера, объединяющего в себе ряд шагов и позволяющего по введенным пользователем данным проектировать и корректировать состав, прогнозировать характеристики получившейся бетонной смеси.

Разработанная программа позволяет подбирать требуемые составы с заданными характеристиками. С ее помощью можно подобрать состав тяжелого бетона с добавками или без них. За основу расчета количественного состава бетонной смеси были выбраны методики, описанные в [70,82], в СНиПах [69].

Блок-схема алгоритма работы данного модуля показан на рис. 3.1.

При проектировании состава тяжелого бетона следует задать вид бетонной смеси (подвижная или жесткая), соответствующее значение удобоукладываемости бетонной смеси (подвижность или жесткость), требуемую прочность бетона, активность и плотность цемента, плотность и водопотребность песка, вид крупного заполнителя, его плотность и наибольшую крупность зерен, соотношение по массе мелкого и крупного заполнителей.



Рис.3.1. Алгоритм подбора состава бетона

Прочность бетона- определяет свойства и эксплуатационные качества бетонных конструкций и элементов строительных сооружений.

Вид бетонной смеси (подвижная, жесткая) и степень ее подвижности, жесткости. Подвижность, жесткость бетонной смеси - способность смеси растекаться только за счет веса материала. Подвижность бетонной смеси обозначается буквой «П», который в зависимости от градаций подвижности имеет соответствующий цифровой показатель (П1, П2, П3, П4 и П5).

Окно подбора состава тяжелого бетона без добавок показано на рис.3.2. Для подбора состава тяжелого бетона с добавкой необходимо дополнительно указать вид, дозировку и плотность добавки.

Вид бетонной смеси
 Подвижная См

Требуемая прочность бетона
 МПа

Цемент
 Активность цемента МПа
 Плотность цемента Г/см³

Песок
 Плотность песка Г/см³

Крупный заполнитель
 Наибольшая крупность мм
 Плотность крупного заполнителя Г/см³

Отношение мелкого и крупного заполнителя

Добавки
 без добавки D Плотность добавки

Расчет

Вода	166,6
Щебень	1326,1
Песок	530,4
Цемент	366,8

Рис.3.2 Окно подбора состава тяжелого бетона

После задания указанных параметров рассчитывается состав тяжелого бетона. Полученный состав выводится на форму, а также может быть сохранен в файле с помощью соответствующего пункта меню.

Далее производим расчет. При расчете состава тяжелого бетона на итоговый результат могут повлиять множество различных факторов.

Наиболее существенное влияние на прочность тяжелого бетона без добавок оказывают следующие факторы:

Водоцементное отношение смеси (В/Ц), количество цемента (Ц) и соотношение по массе между песком и щебнем (П/Щ).

При проведении расчета в целях уменьшения числа выходных параметров математической модели используется корреляционный анализ [84,85]. Для этого измеряются все параметры, затем оценивается корреляция, отсеивается часть параметров и строится модель для минимально возможного их числа.

Коэффициент парной корреляции является общепринятой в математической статистике характеристикой связи между двумя случайными величинами. Для проверки значимости коэффициента парной корреляции

пользуются таблицей критических значений. После реализации эксперимента по выбранному плану проводят обработку результатов эксперимента с построением математических зависимостей свойств бетонной смеси от выбранных факторов.

Затем производят проверку отличия коэффициентов уравнений b_i от нуля и пригодности уравнений для описания исследуемых зависимостей. Выбор схемы статистического анализа и расчетных формул зависит от типа использованного плана и вида получаемых уравнений. Статистический анализ линейных зависимостей производится следующим образом.

Средние значения параметра оптимизации в различных опытах, но при неизменных значениях факторов, то есть когда все факторы удерживаются на одних и тех же уровнях, имеют различные величины в силу статистической обусловленности эксперимента. Суммарная погрешность параметра оптимизации в этом случае составляет ошибку воспроизводимости одного из опытов плана. Пусть по какой-то строке матрицы планирования проводится n повторных опытов, тогда по результатам таких опытов вычисляется ошибка воспроизводимости.

По результатам опытов в нулевых (основных) точках определяют:

а) среднее арифметическое значение

$$\bar{y}_0 = \frac{\sum_{1}^{n_0} y_{0u}}{n_0};$$

б) дисперсию ошибки

$$S_y^2 = S_0^2 = \frac{\sum_{1}^{n_0} (\bar{y}_0 - y_{0u})^2}{n_0 - 1};$$

в) среднее квадратическое отклонение, характеризующее ошибку опыта

$$S_y = S_0 = \sqrt{S_0^2} = \sqrt{\frac{\sum_{1}^{n_0} (\bar{y}_0 - y_{0u})^2}{n_0 - 1}};$$

г) среднюю квадратическую ошибку коэффициентов

$$S\{b_i\} = \frac{S_y}{\sqrt{N}},$$

где y_{0u} – значение исследуемого свойства бетона в нулевой точке в u -м опыте; n_0 – число опытов в нулевой точке (число повторных опытов одной строки плана); N – число опытов в плане, за исключением опытов в нулевых точках (повторных опытов).

Далее определяют расчетное значение критерия Стьюдента t_p по формуле:

$$t_p = \frac{|b_i|}{S\{b_i\}}$$

и сравнивают для каждого b_i полученное значение t_p с табличным t , при числе степеней свободы n_0-1 .

Если $t_p < t$, то при заданном уровне значимости α коэффициент считают равным нулю, а соответствующий ему член уравнения отбрасывают. Начинать проверку следует с наименьшего по абсолютному значению коэффициента, так как в случае его значимости надобность в проверке остальных величин отпадет. После отбрасывания незначимых членов получают уточненное уравнение, выражающее зависимость искомого параметра от факторов, характеризующих состав и свойства бетонной смеси.

Проверку значимости коэффициентов регрессии можно осуществить и с помощью доверительного интервала, который вычисляется по формуле

$$\Delta b_i = \pm t \cdot S\{b_i\},$$

где t – табличное значение критерия Стьюдента.

Коэффициент регрессии значим, если его абсолютная величина больше доверительного интервала.

Затем полученное уравнение подвергается проверке на пригодность (адекватность). Для этого вычисляют дисперсию адекватности (или остаточную дисперсию) по формуле

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_{u=1}^N (y_u - \hat{y}_u)^2}{N - m},$$

где y_u – значение исследуемого свойства бетона в u -м опыте; \hat{y}_u – значение исследуемого свойства бетона в u -м опыте, вычисленное по уточненному уравнению; m – число значимых коэффициентов, включая b_0 .

Определяют расчетное значение критерия Фишера F_p :

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2}$$

и сравнивают его с табличным значением критерия F для степеней свободы, с которыми определялись S_{ad}^2 и S_y^2 , т.е. $N-m$ и n_0-1 соответственно. Уравнение признается пригодным, если $F_p < F$.

С помощью математических методов можно исследовать и анализировать определенные сложные системы, включающие много элементов и связей, и на основе подобного анализа отыскивать решения, наилучшим образом удовлетворяющие поставленным целям. Получение бетона с определенным комплексом свойств будет зависеть от многих технологических факторов.

Общее число технологических факторов, оказывающих влияние на свойства бетона, может быть очень большим. В этом случае успешное управление технологией, подразумевающее влияние наиболее существенных факторов и целенаправленное воздействие на них с целью достижения заданных свойств бетона или решения других задач, без анализа данной системы с помощью математических методов практически невозможно, тем более что при исследовании и анализе системы приходится учитывать не только прямое влияние технологических факторов на свойства бетона, но и обратное – влияние проектируемых свойств на значение того или иного технологического параметра, а также взаимодействие факторов друг с другом.

При рассмотрении объекта исследования как системы «черный ящик» фактором называют независимую величину, влияющую на поведение исследуемого объекта. Сложность любого исследования определяется

количеством одновременно контролируемых факторов и параметров. Часто приходится изучать влияние нескольких факторов, по очереди или одновременно, т.е. проводить многофакторный эксперимент.

Фактор может иметь непрерывную или дискретную область изменения. Для непрерывных факторов, таких как температура, время, масса и т.д., всегда выбираются дискретные множества уровней. Это соглашение существенно облегчает построение эксперимента и упрощает оценку его сложности [86-89].

Области определения факторов, как правило, ограничены. Ограничения носят либо принципиальный, либо технический характер. Число возможных уровней для большинства факторов ограничено:

- точностью измерений;
- техническими возможностями измерительной техники;
- естественными колебаниями измеряемой величины в ходе единичного опыта;
- областью допустимых значений этой величины [90].

Любой эксперимент начинается с отбора исследуемых факторов. В рассмотрение нужно включить все существенные факторы, которые могут влиять на процесс. Если какой-либо существенный фактор окажется неучтённым, то это может привести к ошибочным заключениям, а при физическом эксперименте и к неприятным последствиям. Существенный неучтенный фактор повышает ошибку опыта.

В то же время увеличение числа факторов увеличивает размерность факторного пространства, а увеличение размерности пространства в степенной зависимости влечёт увеличение числа опытов. О такой ситуации образно говорят как о «проклятии размерности». Если число факторов больше пятнадцати, нужно обратиться к методам отсеивания несущественных факторов [90,91]. Требования, предъявляемые к факторам при планировании эксперимента:

- фактор должен быть управляемым, т.е. нужное значение фактора поддерживается постоянным в статистическом смысле;

- фактор должен быть операциональным, т.е. может быть указана последовательность действий (операций), с помощью которых устанавливаются его конкретные уровни;
- фактор не должен зависеть от других факторов;
- фактор должен быть однозначным, т.е. должен прямо указывать на способ воздействия на исследуемый объект и иметь ясный физический смысл;
- факторы должны быть совместимы, т.е. все комбинации факторов внутри их областей допустимых значений осуществимы, безопасны и не приведут к изменению характера процесса;
- множество факторов должно быть достаточно полным. Если какой-либо существенный фактор пропущен, это приведёт к неправильному определению оптимальных условий и большой ошибке опыта.

В качестве факторов (варьируемых в экспериментах величин) в зависимости от условий конкретной задачи могут назначаться В/Ц(Ц/В) смеси, расход воды (или цемента), расход крупного или мелкого заполнителей, соотношение между ними (g), показатели качества составляющих материалов, расход химических добавок и т.п.

Сущность планирования экспериментов и выбора составов бетонов с применением математико-статистических методов заключается в установлении математической зависимости между заданными свойствами бетона и расходом и свойствами составляющих материалов. Получаемая математическая зависимость используется для назначения и поиска оптимальных составов бетонных смесей [46].

Общие требования к параметрам (откликам) при планировании эксперимента следующие:

- параметр должен быть количественным, т.е. задаваться числом;
- параметр нужно уметь измерять, т.е. располагать подходящим прибором для прямого измерения или располагать методикой косвенных измерений;

- параметр должен быть однозначным в статистическом смысле, т.е. заданному набору значений факторов должно соответствовать одно с точностью до ошибки эксперимента значение параметра;

- параметр должен удовлетворять условию корректности, т.е. он должен действительно оценивать эффективность функционирования системы в заранее выбранном смысле;

- параметр должен удовлетворять требованию универсальности или полноты; под универсальностью параметра понимается его способность всесторонне характеризовать объект;

- параметр должен иметь физический смысл, быть простым и легко вычисляемым;

- параметр должен быть эффективен в статистическом смысле.

Из нескольких параметров оптимизации наиболее эффективен тот, который определяется с возможной наибольшей точностью. Если эта точность недостаточна, приходится обращаться к увеличению числа опытов.

Выбрать параметр, удовлетворяющий всем требованиям, практически невозможно. Требования чаще используются для сравнения нескольких возможных параметров и выбора, наиболее отвечающего данным требованиям. При описании прочностных характеристик бетона рекомендуется использовать планы первого порядка. В случае, когда вид искомой зависимости неизвестен, а также при описании таких характеристик, как жесткость (подвижность) бетонной смеси, следует применять планы второго порядка. Построение математических зависимостей производится на основе специальных лабораторных экспериментов с последующим их уточнением в производственных условиях. Проведению лабораторных экспериментов должны предшествовать следующие этапы:

- уточнение оптимизируемых параметров (класс бетона, заданные значения удобоукладываемости и т.д.);

- выбор факторов, определяющих изменчивость оптимизируемых параметров;

- расчет основного исходного состава бетонной смеси;
- выбор интервалов варьирования факторов;
- выбор плана и условий проведения эксперимента;
- расчет всех составов бетонной смеси в соответствии с выбранным планом;
- реализация самого эксперимента;
- обработка результатов эксперимента с построением математических зависимостей свойств бетонной смеси от выбранных факторов.

Приготовление бетонной смеси, формование образцов, испытание смеси и образцов производится в соответствии с положениями стандартов. При проведении опытных замесов в соответствии с выбранным планом целесообразно опыты в нулевых точках (когда все факторы находятся на основном уровне) равномерно распределять между всеми остальными, дублируя их через каждые 3–5 замесов.

Результаты опытов обрабатываются с использованием аппарата математической статистики, при этом получают алгебраические уравнения, выражающие зависимости исследуемых свойств бетона от исходных факторов.

Полученный состав выводится на форму, а также может быть сохранен в файле с помощью соответствующего пункта меню.

Созданная система автоматизированного проектирования состава тяжелого бетона обеспечивает: возможность прогнозирования требуемых параметров качества бетона и их высокую степень однородности уже на стадии проектирования его состава; сокращает время расчета и повышает эффективность процесса проектирования и, как следствие, упрощает проведение лабораторных исследований; позволяет более точно определить оптимальные параметры состава бетонной смеси.

3.2 Использование программы “Модель- бетон” в учебном процессе.

Полученные в рамках выполнения диссертационной работы результаты исследований были апробированы и внедрены в Ташкентском институте инженеров ж/д транспорта на кафедре строительство зданий и промышленных

сооружений. С помощью созданной системы автоматизированного проектирования составов бетонов «Модель- бетон» производился расчет и корректировка составов тяжелых бетонов, планирование лабораторных испытаний и обработка полученных экспериментальных данных.

Разработанная компьютерная программа рекомендуется к использованию при проведении практических и лабораторных работах по дисциплине «Строительные материалы и «инновационные технологии строительных материалов », предназначенных для обучения бакалавров и магистров по специальности 5А340200 «Строительство зданий и промышленных сооружений».

Применение программы предусмотрено в работах, которые посвящены подбору состава тяжелого бетона, т.е. установлению оптимальных пропорций компонентов бетонной смеси для получения заданных свойств смеси и бетона.

Рационально подобранная бетонная смесь должна отвечать требованиям по удобоукладываемости и обеспечивать получение бетона заданных свойств при минимально возможном расходе цемента.

Состав бетона определяется расчетно-экспериментальным методом. Чем больше предъявляется требований к свойствам бетона, тем сложнее экспериментальная часть работы, так как требуются изготовление большого числа образцов и их длительные испытания.

Работы выполняются в следующей последовательности:

1. Составление задания на подбор и расчет начального и дополнительных составов тяжелого бетона.
2. Приготовление опытных замесов и корректировка номинального состава.
3. Определение средней плотности и расчет окончательного состава бетонной смеси.
4. Формование стандартных образцов и их испытание.
5. Составление заключения по работе.

Данные лабораторные работы рассчитана на три занятия.

Далее приведены примеры расчета составов бетона методом абсолютных объемов вручную и на автоматизированном программном продукте «Модель бетон».

Состав № 1

Исходные данные:

Тяжелый бетон класса В25 для изготовления многопустотных плит перекрытия, ребристых плит покрытия

Осадка конуса ОК 1-4 см.

Материалы:

1. Портландцемент М400, $\rho = 3,1$ кг/л; $\rho_n = 1,3$ кг/л;
2. Щебень диоритовый – $\rho = 2,62$ кг/л; $\rho_n = 1,53$ кг/л; фракция 5-10 мм, среднего качества.
3. Песок речной кварцевый - $M_{кр} = 1,9$; $\rho = 2,61$ кг/л; $\rho_n = 1,49$ кг/л.

Расчет состава бетона

1. Определяем В/Ц:

$$B/C = AR_c / (R_b + A \cdot 0,5R_c)$$

$$B/C = 0,6 \cdot 400 / (300 + 0,6 \cdot 0,5 \cdot 400) = 240/420 = 0,57$$

$$R_b = 25/0,78 = 32,05 \text{ Мпа};$$

2. Определяем ориентировочный расход воды:

$$\text{По табл. (справоч. Михайлов): } V = 185 \text{ л/м}^3 ;$$

3. Определяем расход цемента:

$$C = V/(B/C) = 185/0,57 = 324 \text{ кг/м}^3 ;$$

4. Определяем пустотность щебня:

$$P_{щ} = 1 - (\rho_0 / \rho) = 1 - (1,53/2,62) = 0,42;$$

5. Определяем расход щебня:

$$\Psi = [1000 / (\alpha \Pi / \rho_{\text{н}} + 1 / \rho)]$$

$\alpha = 1,34$ по табл.9.18 (справоч. Михайлов)

$$\Psi = [1000 / (0,42 \cdot 1,34 / 1,53 + 1 / 2,62)] = 1333 \text{ кг/м}^3;$$

6. Определяем расход песка:

$$\Pi = [(1000 - (\Psi / \rho_{\text{ц}} + V + \Psi / \rho_{\text{щ}})) \rho_{\text{п}}] = [(1000 - (324 / 3,1 + 185 + 1333 / 2,62)) \cdot 2,61] = 531 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_{\text{б}} = 2373 \text{ кг/м}^3$$

$\text{Ц} = 324 \text{ кг}$; $\text{Щ} = 1333 \text{ кг}$; $V = 185 \text{ л}$; $\Pi = 531 \text{ кг}$.

Расчет на программе «Модель бетон»

Вид бетонной смеси
Подвижная 4 См

Требуемая прочность бетона
32,11 МПа

Цемент
Активность цемента 43 МПа
Плотность цемента 3,1 Г/см3

Песок
Плотность песка 2,6 Г/см3

Крупный заполнитель
Наибольшая крупность 20 мм
Плотность крупного заполнителя 2,6 Г/см3

Отношение мелкого и крупного заполнителя
0,4

Добавки
без добавки D Плотность добавки 1 1

Расчет

Вода	185,4
Щебень	1336,3
Песок	528,9
Цемент	323,7

Состав № 2

Исходные данные:

Тяжелый бетон класса В25 для изготовления водопроводных колодцев

Осадка конуса ОК 6-9 см.

Материалы:

1. Портландцемент М400, $\rho = 3,1$ кг/л; $\rho_n = 1,3$ кг/л;
2. Щебень диоритовый – $\rho = 2,62$ кг/л; $\rho_n = 1,53$ кг/л; фракция 10-20 мм, среднего качества.
3. Песок речной кварцевый - $M_{кр} = 1,9$; $\rho = 2,61$ кг/л; $\rho_n = 1,49$ кг/л.

Расчет состава бетона

1. Определяем В/Ц:

$$B/C = AR_c / (R_b + A \cdot 0,5R_c)$$

$$B/C = 0,6 \cdot 400 / (300 + 0,6 \cdot 0,5 \cdot 400) = 240/420 = 0,57$$

$$R_b = 25/0,78 = 32,05 \text{ Мпа};$$

2. Определяем ориентировочный расход воды:

По табл. (справоч. Михайлов): $V=200 \text{ л/м}^3$;

3. Определяем расход цемента:

$$C = B/(B/C) = 200/0,57 = 350 \text{ кг/м}^3 ;$$

4. Определяем пустотность щебня:

$$P_{щ} = 1 - (\rho_0 / \rho) = 1 - (1,53/2,62) = 0,42;$$

5. Определяем расход щебня:

$$Щ = [1000 / (\alpha P / \rho_n + 1 / \rho)]$$

$\alpha = 1,34$ по табл.9.18 (справоч. Михайлов)

$$Щ = [1000 / (0,42 \cdot 1,34 / 1,53 + 1 / 2,62)] = 1333 \text{ кг/м}^3;$$

6. Определяем расход песка:

$$P = [(1000 - (C/\rho_c + B + Щ/\rho_{щ}))\rho_n] = [(1000 - (350/3,1 + 200 + 1333/2,62)) \cdot 2,61] = 451 \text{ кг/м}^3$$

$$P_b = 2334 \text{ кг/м}^3$$

$C=350 \text{ кг}$; $Щ=1333 \text{ кг}$; $B=200 \text{ л}$; $P=451 \text{ кг}$.

Расчет на программе «Модель бетон»

Form1

Вид бетонной смеси
 Подвижная 9 См

Требуемая прочность бетона
 32,11 МПа

Цемент
 Активность цемента 43 МПа
 Плотность цемента 3,1 Г/см³

Песок
 Плотность песка 2,6 Г/см³

Крупный заполнитель
 Наибольшая крупность 20 мм
 Плотность крупного заполнителя 2,6 Г/см³

Отношение мелкого и крупного заполнителя
 0,35

Добавки
 без добавки D Плотность добавки 1 1

Расчет

Вода	201,2
Щебень	1336,3
Песок	447,9
Цемент	348,4

Состав № 3

Исходные данные:

Бетон класса В30 для производства лестничных маршей.

Осадка конуса ОК 9-14 см.

Супер пластифицирующая добавка СП-3

Материалы:

1. Портландцемент М400, $\rho = 3,1$ кг/л; $\rho_n = 1,3$ кг/л;
2. Щебень диоритовый – $\rho = 2,62$ кг/л; $\rho_n = 1,53$ кг/л; фракция 5-10 мм, среднего качества.
3. Песок речной кварцевый - $M_{кр} = 1,9$; $\rho = 2,61$ кг/л; $\rho_n = 1,49$ кг/л.
4. Супер пластифицирующая добавка СП-3

Расход воды снижается на 20%

Добавка СП-3 - 1,5% от массы цемента

Расчет состава бетона

1. Определяем в/ц:

$$B/C = AR_c / (R_b + A \cdot 0,5R_c)$$

$$B/C = 0,6 \cdot 400 / (384 + 0,6 \cdot 0,5 \cdot 400) = 240/504 = 0,47$$

$$R_b = 30/0,78 = 38,4 \text{ Мпа}$$

2. Определяем ориентировочный расход воды:

По табл. (справоч. Михайлов): $V=225 \text{ л/м}^3$;

Окончательный расход воды:

$$V' = V - (V \cdot 0,2) = 225 - (225 \cdot 0,2) = 180 \text{ л/м}^3$$

3. Определяем расход цемента:

$$C = V / (B/C) = 180 / 0,47 = 382,9 \text{ кг/м}^3 ;$$

4. Определяем пустотность щебня:

$$P_{щ} = 1 - (\rho_0 / \rho) = 1 - (1,53 / 2,62) = 0,42 ;$$

5. Определяем расход щебня:

$$Щ = [1000 / (\alpha P_{щ} / \rho_{щ} + 1 / \rho)]$$

$\alpha = 1,44$ по табл. (справоч. Михайлов)

$$Щ = [1000 / (0,42 \cdot 1,44 / 1,53 + 1 / 2,62)] = 1298,7 \text{ кг/м}^3 ;$$

6. Определяем расход песка:

$$P = [(1000 - (C / \rho_c + V + Щ / \rho_{щ})) \rho_p] = [(1000 - (382,9 / 3,1 + 180 + 1298,7 / 2,62)) \cdot 2,61 = 524,3 \text{ кг/м}^3$$

$$P_b = 2385,9 \text{ кг/м}^3$$

$$C = 382,9 \text{ кг}; \quad Щ = 1312,7 \text{ кг}; \quad V = 180 \text{ л}; \quad P = 524,3 \text{ кг}.$$

7. Расход добавки на 1 м^3

$$D = 382,9 \cdot 0,15 = 5,7 \text{ л/м}^3$$

Расчет на программе «Модель бетон»

Form1

Вид бетонной смеси

Подвижная См

Требуемая прочность бетона

МПа

Цемент

Активность цемента МПа

Плотность цемента Г/см³

Песок

Плотность песка Г/см³

Крупный заполнитель

Наибольшая крупность мм

Плотность крупного заполнителя Г/см³

Отношение мелкого и крупного заполнителя

Добавки D Плотность добавки

Вода	<input type="text" value="174,3"/>
Щебень	<input type="text" value="1318,0"/>
Песок	<input type="text" value="527,2"/>
Цемент	<input type="text" value="378,5"/>

Состав № 4

Исходные данные:

Тяжелый бетон класса В20 для производства балконных плит

Осадка конуса ОК 5-9 см.

Материалы:

1. Портландцемент М400, $\rho = 3,1$ кг/л; $\rho_n = 1,3$ кг/л;
2. Щебень диоритовый – $\rho = 2,62$ кг/л; $\rho_n = 1,53$ кг/л; фракция 10-20мм, среднего качества.
3. Песок речной кварцевый - $M_{кр} = 1,9$; $\rho = 2,61$ кг/л; $\rho_n = 1,49$ кг/л.

Расчет состава бетона

1. Определяем В/Ц:

$$В/Ц = AR_{ц} / (R_{б} + A \cdot 0,5R_{ц})$$

$$В/Ц = 0,6 \cdot 400 / (250 + 0,6 \cdot 0,5 \cdot 400) = 240 / 370 = 0,64$$

$$R_{б} = 20 / 0,78 = 25,6 \text{ Мпа};$$

2. Определяем ориентировочный расход воды:

По табл.9.2 (справоч. Михайлов): $V=195\text{л/м}^3$;

3. Определяем расход цемента:

$$Ц = V/(V/Ц) = 195/0,64=305 \text{ кг/м}^3 ;$$

4. Определяем пустотность щебня:

$$П_{щ} = 1 - (\rho_0 / \rho) = 1 - (1,53/2,62) = 0,42;$$

5. Определяем расход щебня:

$$Щ = [1000 / (\alpha П / \rho_{н} + 1 / \rho)]$$

$\alpha=1,39$ по табл.9.20 (справоч. Михайлов)

$$Щ = [1000 / (0,42 \cdot 1,33 / 1,53 + 1 / 2,62)] = 1340,5 \text{ кг/м}^3;$$

6. Определяем расход песка:

$$П = [(1000 - (Ц/\rho_{ц} + V + Щ/\rho_{щ}))\rho_{п}] = [(1000 - 305/3,1 + 195 + 1340,5/2,62)] \cdot 2,61 = 509 \text{ кг/м}^3$$

$$P_6 = 2349 \text{ кг/м}^3$$

$Ц=305\text{кг}$; $Щ=1340\text{кг}$; $V=195\text{л}$; $П=509\text{кг}$.

Расчет на программе «Модель бетон»

Вид бетонной смеси	Требуемая прочность бетона	Вода	Щебень	Песок	Цемент
Подвижная 9 См	26,19 МПа	196,4	1343	517,5	302,5

Состав № 5

Исходные данные:

Тяжелый бетон класса В15 для изготовления плит ленточного фундамента

Осадка конуса ОК 1-4 см.

Материалы:

1. Портландцемент М400, $\rho = 3,1$ кг/л; $\rho_n = 1,3$ кг/л;
2. Щебень диоритовый – $\rho = 2,62$ кг/л; $\rho_n = 1,53$ кг/л; фракция 10-20 мм, среднего качества.
3. Песок речной кварцевый - $M_{кр} = 1,9$; $\rho = 2,61$ кг/л; $\rho_n = 1,49$ кг/л

Расчет состава бетона

1. Определяем В/Ц:

$$B/C = AR_{\text{ц}} / (R_{\text{б}} + A \cdot 0,5R_{\text{ц}})$$

$$B/C = 0,6 \cdot 400 / (300 + 0,6 \cdot 0,5 \cdot 400) = 240/420 = 0,76$$

$$R_{\text{б}} = 15/0,78 = 19,2 \text{ Мпа};$$

2. Определяем ориентировочный расход воды:

По табл.9.2 (справоч. Михайлов): $V=190 \text{ л/м}^3$;

3. Определяем расход цемента:

$$Ц = V/(B/C) = 190/0,76 = 250 \text{ кг/м}^3 ;$$

4. Определяем пустотность щебня:

$$П_{\text{щ}} = 1 - (\rho_0 / \rho) = 1 - (1,53/2,62) = 0,42;$$

5. Определяем расход щебня:

$$\text{Щ} = [1000 / (\alpha П / \rho_n + 1 / \rho)]$$

$\alpha = 1,35$ по табл.9.18 (справоч. Михайлов)

$$\text{Щ} = [1000 / (0,42 \cdot 1,35 / 1,53 + 1 / 2,62)] = 1333,3 \text{ кг/м}^3 ;$$

6. Определяем расход песка:

$$\Pi = [(1000 - (\frac{Ц}{\rho_{ц}} + B + \frac{Щ}{\rho_{щ}}))] \rho_{\Pi} = [(1000 - (\frac{250}{3,1} + 190 + \frac{1333}{2,62}))] \cdot 2,61 = 579,4 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_0 = 2352,7 \text{ кг/м}^3$$

Ц=250кг; Щ=1333,3кг; В=190л; П=579,4кг.

Расчет на программе «Модель бетон»

Состав № 6

Исходные данные:

Тяжелый бетон класса В25 для изготовления лестничных площадок

Осадка конуса ОК 4-6 см.

Материалы:

1. Портландцемент М400, $\rho = 3,1 \text{ кг/л}$; $\rho_n = 1,3 \text{ кг/л}$;
2. Щебень диоритовый – $\rho = 2,62 \text{ кг/л}$; $\rho_n = 1,53 \text{ кг/л}$; фракция 10-20 мм, среднего качества.
3. Песок речной кварцевый - $M_{кр} = 1,9$; $\rho = 2,61 \text{ кг/л}$; $\rho_n = 1,49 \text{ кг/л}$.

Расчет состава бетона

1. Определяем В/Ц:

$$B/C = AR_c / (R_b + A \cdot 0,5R_c)$$

$$B/C = 0,6 \cdot 400 / (300 + 0,6 \cdot 0,5 \cdot 400) = 240/420 = 0,57$$

$$R_b = 25/0,78 = 32,05 \text{ Мпа};$$

2. Определяем ориентировочный расход воды:

$$\text{По табл.9.2 (справоч. Михайлов): } V=195 \text{ л/м}^3 ;$$

3. Определяем расход цемента:

$$C = B/(B/C) = 195/0,57=342 \text{ кг/м}^3 ;$$

4. Определяем пустотность щебня:

$$P_{щ} = 1 - (\rho_0 / \rho) = 1 - (1,53/2,62) = 0,42;$$

5. Определяем расход щебня:

$$Щ = [1000 / (\alpha P / \rho_n + 1 / \rho)]$$

$$\alpha = 1,34 \text{ по табл.9.18 (справоч. Михайлов)}$$

$$Щ = [1000 / (0,42 \cdot 1,34 / 1,53 + 1 / 2,62)] = 1333 \text{ кг/м}^3;$$

6. Определяем расход песка:

$$П = [(1000 - (C/\rho_c + V + Щ/\rho_{щ}))\rho_n] = [(1000 - (342/3,1 + 195 + 1333,3/2,62)) \cdot 2,61 = 488,1 \text{ кг/м}^3$$

$$P_b = 2358,4 \text{ кг/м}^3$$

$$C=342 \text{ кг}; Щ=1333,3 \text{ кг}; V=195 \text{ л}; П=488,1 \text{ кг}.$$

Расчет на программе «Модель бетон»

Form1

Вид бетонной смеси
Подвижная См

Требуемая прочность бетона МПа

Расчет

Цемент
Активность цемента МПа
Плотность цемента Г/см³

Песок
Плотность песка Г/см³

Крупный заполнитель
Наибольшая крупность мм
Плотность крупного заполнителя Г/см³

Отношение мелкого и крупного заполнителя

Добавки
без добавки D Плотность добавки

Вода
Щебень
Песок
Цемент

Применение программного комплекса позволяет:

- сократить время расчетов по подбору состава бетона с 30-60 до 1-2 минут и тем самым освободить студентов для решения более сложных производственных задач;
- отображать прогнозируемое значение прочности бетона для спроектированного состава бетонной смеси;
- корректировать состав бетонной смеси в зависимости от результатов прогноза качества при неизменном составе заполнителей смеси за счет их количественного перераспределения задолго до изготовления опытных образцов;
- повысить качество бетонной смеси за счет более высокой точности расчетов;
- повысить эффективность работы студентов на лабораторных занятиях;
- более гибко подходить к процессу подбора состава бетонной смеси в вопросе введения новых химических добавок и их характеристик;
- сократить расход материалов на стадии проектирования.

Программа обеспечивает выполнение следующих функций:

- проектирование состава бетонных смесей для тяжелого бетона;

- корректировку состава бетонной смеси;
- прогнозирование свойств бетона с заданными характеристиками;
- планирование эксперимента для лабораторных испытаний бетона.

В приложении приведены примеры расчета составов бетона методом абсолютных объемов вручную и в программе.

Исследования на раскалывание образцов проводились для определения параметра прочности на сжатие в соответствии с ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». Для проведения исследований использовался гидравлический пресс.

Проведенное опытно-промышленное апробирование образцов из спроектированного бетона показало возможность получать изделия с требуемыми свойствами, отвечающими требованиям ГОСТов, и позволяет рекомендовать данный программный продукт к использованию в лабораторных занятиях при проектировании бетона.

Выводы по главе 3.

1. Разработанная программа по проектированию и оптимизации составов бетона позволяет сократить время расчета состава бетонной смеси;
2. Дает возможность повысить эффективность процесса проектирования и, как следствие, улучшить качество бетона;
3. Разработанная программа по проектированию и оптимизации составов бетона позволяет получить бетон заданной прочности при меньших затратах цемента за счет более точного расчета компонентов бетона.

Заключение

1. Проведен анализ существующих методик расчета и проектирования состава бетона, и на их основе предложен подход к проектированию состава бетонной смеси с прогнозированием качества, основанный на представлении параметров бетонной смеси, параметров ее компонентов, параметров технологического процесса, параметров химической добавки, и параметров

готового бетона, позволивший разработать математическую модель САПР составов бетонных смесей с прогнозированием прочности бетона.

2. Разработана математическая модель прогнозирования свойств бетона, для которой установлены новые зависимости качественных показателей бетона (прочность при сжатии) от состава бетонной смеси.

3. Разработана математическая модель автоматизированного прогнозирования качества бетонной смеси по параметрам компонентов, добавок и требованиям к конечному продукту, позволяющей при частой смене сырья и предъявляемых требований к качеству бетона сократить время на подготовку к производству, материальные затраты, использование труда специалистов и стабилизировать параметры готовых изделий.

4. Разработана математическая модель автоматизированного подбора состава бетонной смеси, позволяющая сократить время расчетов по подбору состава бетонной смеси, повысить эффективность работы сотрудников строительных лабораторий, повысить качество бетонной смеси за счет более высокой точности расчетов, более гибко подходить к процессу подбора состава бетона в вопросе введения новых химических добавок и их характеристик.

Разработаны алгоритмы и создана система автоматизированного проектирования составов бетонных смесей и прогнозирования свойств бетона, позволяющая:

4. проектировать составы тяжелого бетона;

5. прогнозировать требуемые параметры качества бетона на стадии проектирования его состава;

6. осуществлять коррекцию состава бетонной смеси в зависимости от результатов прогноза качества при неизменном составе заполнителей смеси за счет их количественного перераспределения задолго до изготовления опытных образцов;

7. сократить брак на производстве бетона за счет прогнозирования качества на стадии проектирования.

8. сократить сроки и повысить эффективность процесса проектирования и, как следствие, улучшить качество бетона при его промышленном производстве на предприятиях строительной индустрии.

Все эти преимущества значительно повышают эффективность использования программы, что в свою очередь ведет к сокращению времени технологического процесса производства бетона.

Литература

1. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона / И.Н. Ахвердов. – М.: Стройиздат, 1981. – 464 с.
2. Ахвердов И.Н. Теоретические основы бетоноведения / И.Н. Ахвердов. – Минск.: Вища школа, 1991. – 188 с.
3. Гусев Б.В. Бетон и железобетон: справочники / Б.В. Гусев. – М.: Стройиздат, 1998. – 250 с.
4. Баженов М.Ю. Технология бетона: учебник. Ю.М. Баженов. – М.: Изд-во АСВ, 2003. – 500 с.
5. V.S. Ramachandran, J.J. Beaudoin. Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology: Principles, Techniques and Applications/ V.S. Ramachandran, J.J. Beaudoin. – Elsevier, 2000 г. – 1003 с.
6. Бетон и железобетонные изделия. Материалы для изготовления бетона. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 231 с.
7. Гордон С.С. Прогноз долговечности железобетонных конструкций / С.С.Гордон // Бетон и железобетон. – 1992. – № 6. – С. 23-25.
8. Бетон и железобетонные изделия. Материалы для изготовления бетона. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 231 с.
9. Рыбьев И.А. Строительное материаловедение / И.А. Рыбьев. – М.: Высшая школа, 2002. – 701 с.
10. Попов Л.Н. Строительные материалы и детали / Л.Н. Попов. – М.:Стройиздат, 1973. – 392 с.
11. В. М. Бондаренко, Д. Г. Суворкин. Железобетонные и каменные конструкции / В. М. Бондаренко, Д. Г. Суворкин – М.: Выс-шая школа, 1987.
12. Баженов Ю.М. Технология бетона: учеб. для вузов / Ю.М. Баженов. –М.: Высшая школа, 1978. – 455 с.
13. Комисаренко Б.С. Керамзит и керамзитобетон / Б.С. Комисаренко, А.Г.Чикноворьян. – М.: АСВ, 1993. – 284 с
14. Комисаренко Б.С. Керамзит и керамзитобетон / Б.С. Комисаренко, А.Г.Чикноворьян. – М.: АСВ, 1993. – 284 с

15. Гершберг О.А. Технология бетонных и железобетонных изделий / О.А.Гершберг. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1971. – 360 с.
16. Довжик В.Г. Технология высокопрочного керамзитобетона / В.Г. Довжик, В.А. Дорф, В. П. Петров. – М.: Стройиздат, 1976. – 136 с
17. Javed B Malik. Designing to Minimum Concrete Dimensions: Focusing on member size can defeat the purpose / Concrete International. Farmington Hills: Jul2007. pg. 44, 4 pgs.
18. Санькова Т.А. Влияние различных факторов на характеристики высокопрочного бетона / Т.А.Санькова, И.Л. Чулкова // Новые энерго- и ресурсосберегающие наукоемкие технологии в производстве строительных материалов, де-кабрь 2007: сб. ст. Международной научно-технической конференции. – Пенза,2007. – С. 258-260.
19. Aci Committee. Silica fume in concrete. ACI Materials Journal, v. 84, n.02,1987, p. 158-166.
20. Concrete Admixture Handbook / Properties, Science and Tecnology. V.S.Ramachandran, Noyes Publications, New Jersey, USA, 1984. – 340 p
21. Esfahani, M. R., and Rangan, B. V., "Reinforcing Steel-Concrete Bond in Normal and High Strength Concrete," International Conference on High Performance High Strength Concrete, Perth, Australia, 1998, pp. 367-378.
22. Сулименко Л.М. Технология минеральных вяжущих материалов и изделий на их основе: учеб. для вузов / Л.М. Сулименко. – 4-е изд., перераб. и доп.– М.: Высшая школа, 2005. – 334 с.
23. Шестоперов С.В. Технология бетона: учебное пособие для вузов / С.В.Шестоперов. – М.: Высшая школа, 1977. – 432 с.
24. ГОСТ 7473-94. Смеси бетонные. Технические условия. – М.: ГУП ЦПП,2003. – 18 с.
25. ГОСТ 13015.0-83. Конструкции и изделия бетонные и железобетонные сборные. Общие технические требования. – М.: Издво стандартов, 1986. – 13 с.

26. ГОСТ 10178-85. Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 7 с.
27. ГОСТ 310.6-85. Цементы. Методы испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 39 с.
28. ГОСТ 310.4-81. Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 14 с.
29. ГОСТ 27006-86. Бетоны. Правила подбора состава. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 12 с.
30. ГОСТ 8736-93. Песок для строительных работ. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1995. – 13 с.
31. ГОСТ 8735-88. Песок для строительных работ. Методы испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 32 с.
32. ГОСТ 8267-93. Щебень и гравий из плотных пород для строительных работ. Технические условия. – М.: ГУП ЦПП, 2001. – 20 с.
33. ГОСТ 23732-79. Вода для бетонов и растворов. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1998. – 5 с.
34. ГОСТ 7473-94. Смеси бетонные. Технические условия. – М.: ИПКИ Изд-во стандартов, 1996. – 11 с.
35. Ицкович С.М. Технология заполнителей бетона / С.М. Ицкович, Л.Д. Чумаков, Ю.М. Баженов. – М.: Высшая школа, 1991. – 272 с.
36. Онацкий С.П. Производство керамзита / С.П. Онацкий. – М.: Госстройиздат, 1971. – 311 с.
37. Буров Ю.С. Технология строительных материалов и изделий / Ю.С. Буров. – М.: Высшая школа, 1971. – 265 с.
38. Дворкин Л.И. Основы бетоноведения / Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин. – СПб.: Строй-бетон, 2006. – 692 с.
39. Cement Chemistry/ H. F. W. Taylor. – ed. 2. – Thomas Telford, 1997 p: 459
40. Cement and Concrete Chemistry/Wieslaw Kurdowski – Springer Science & Business, 2014, - p: 700

41. Белов В.В., Петропавловская В.Б., Храмцов Н.В. Строительные материалы/ Белов В.В., Петропавловская В.Б., Храмцов Н.В. – И.: АСВ -2014г. – 272с.
42. Design and Control of Concrete Mixture. Portland Cement Association, Ottawa,1984. – 120 p.
43. Батищев Д.И. Методы оптимизированного проектирования / Д.И. Батищев. – М.: Радио и связь, 1984.
44. Королев И.В. Пути экономии цемента / И.В. Королев. – М.: Транспорт,1986. – 313 с.
45. Шмигальский В.Н. Оптимизация составов цементобетонов / В.Н. Шмигальский. – Кишинев: Мир, 1981. – 123 с.
46. Руководство по подбору составов тяжелого бетона / НИИ бетона и железобетона Госстроя СССР. – М.: Стройиздат, 1979. – 103 с.
47. Сизов В.П. Проектирование составов тяжелого бетона / В.П. Сизов. – М.:Стройиздат, 1980. – 144 с.
48. Гордон С.С. Производство морозостойких железобетонных конструкций. Механизация строительства, 2001, №7, с.22-26.
49. Ken W. Day. Concrete mix design, quality control and specification // Academic Press, Boston, MA, 2000. p.:432
50. Хокс Б. Автоматизированное проектирование и производство / Б. Хокс.– М.: Мир, 1991. – 269 с.
51. Чулкова И.Л. Автоматизированный расчет состава бетона и прогнозирование его свойств / И.Л. Чулкова, Т.А. Санькова // Вестник СибАДИ. – 2008. –№ 1 (7). – С. 42-46.
52. Болотин В.В. Объединенная модель разрушения композиционных материалов при длительно действующих нагрузках. Мех.композиц. матер., 1981, 16 3, с.405-420.
53. Болотин В.В. К механике разрушения композиционных материалов. - Пробл.прочн., 1981, №7.

54. Бузинов С.В., Овчинский А.С. Применение метода моделирования процессов разрушения на ЭВМ к решению технологических задач обработки композиционных материалов давлением. Физ. и хим. обраб.матер., 1984, №2, с.87-95.

55. Калихман И.Л. Сборник задач по математическому программированию /И.Л. Калихман. – М.: Высшая школа, 1975. – 311 с.

56. Адылходжаев А.И., Махаматалиев И.М., Тургунбаев У.Ж., Цой В.М. Интенсивные технологии строительства/ Адылходжаев А.И., Махаматалиев И.М., Тургунбаев У.Ж., Цой В.М. – И. “Fan va texnologiya” 2016г. – 227с.

57. М.К.Тахиров. О природе межфазных взаимодействий в структурообразовании композиционных строительных материалов. В кн. Успехи строительного материаловедения. М. Российская академия архитектуры и строительных наук, 2001, с. 85-88.

58. Адылходжаев А.И., Соломатов В.И. Основы интенсивной раздельной технологии бетона.- М.: Стройиздат, 1993 г.

59. А. А. Ашрабов, Ю. В. Зайцев. Элементы механики разрушения бетонов. Ташкент, « Мехнат»,1984, 232 с.

60. Калашников В.И. Основные принципы создания высокопрочных и особовысокопрочных бетонов // Популярное бетоноведение.- 2008.-№3.- 102-107

61. Калашников В.И. Терминология науки о бетоне нового поколения // Строительные материалы.- 2011.-№3.- 103-106.

62. Вознесенский В.А. и др. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ. – Киев, Выща школа, 1989г.

63. Ansari F. Analysis of Micro-Cracked Zone in Concrete/ Fract. Toughness and Fract. Energy Concr. Proc. Int. Conf.- Amsterdam.- 1985- p.229-240.

64. Price Walter H. Control of Cracking of Concrete during Construction/ Coner. Int. Des. and Constr.- 1982.- Vol. 1.- p.40-43

65. Соломатов В.И. Развитие полиструктурной теории композиционных строительных материалов «Известие ВУЗов. Строительство и архитектура. 1985. №8. с. 58-64.

66. Санькова Т.А. Проблемы автоматизированного проектирования строительных конгломератов / Т.А. Санькова, И.Л. Чулкова // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2007. – Вып. 5. – С. 117-120.

67. ШНК 2.05.03-12. Мосты и трубы. Утвержден Приказом Госархитектстроя РУз. от 23.05.2012 №53. Взамен КМК 2.05.03-97

68. КМК 3.03.04-98/ Производство сборных железобетонных конструкций и изделий.

69. ШНК 5.01.23-08 «Типовые нормы расхода цемента для приготовления бетонов сборных и монолитных бетонных, железобетонных изделий и конструкций»

70. Дворкин Л.И. Проектирование составов бетона с заданными свойствами /Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин. –Ровно: РГТУ, 1999. – 202с.

71. Касторных Л.И. Добавки в бетоны и строительные растворы: учебно-справочное пособие / Л.И. Касторных. – Ростов н/Д.: Феникс, 2005. – 221 с.

72. Ратинов В.Б. Добавки в бетон / В.Б. Ратинов, Т.И. Розенберг. – М.:Стройиздат, 1989. – 186 с.

73. Острейковский В.А. Теория систем / В.А. Острейковский. – М.: Высшаяшкола, 1997. – 240 с.

74. Бахвалов Н.С. Численные методы / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М.Кобельков. – М.: Наука, 1987. – 600 с.

75. Гаас С. Линейное программирование / С. Гаас. – М.: Изд-во физ-мат. литературы, 1961. – 270 с.

76. Глаголев А.А. Введение в линейное программирование / А.А. Глаголев. – М.: МИНХ им. Плеханова, 1961. – 280 с.

77. Еремин И.И. Теория линейной оптимизации / И.И. Еремин. – Екатеринбург: Изд-во «Екатеринбург», 1999. – 312 с.

78. Курицкий Б.Я. Поиск оптимальных решений средствами Excel 7.0 / Б.Я.Курицкий. – СПб.: ВHV-Санкт-Петербург, 1997. – 384 с.
79. Вознесенский В.А. Современные методы оптимизации композиционных материалов / В.А. Вознесенский и др. – Киев: Будівельник, 1983. – 144 с
80. Дворкин Л.И. Оптимальное проектирование составов бетона / Л.И.Дворкин. – Львов: Вища школа, 1981. – 159 с.
81. Вермишев Ю.Х. Основы автоматизации проектирования Ю.Х. Вермишев. – М.: Радио и связь, 1988. – 279 с.
82. Санькова Т.А. Автоматизированное проектирование состава бетона /Т.А. Санькова, И.Л. Чулкова // Актуальные проблемы строительной отрасли: тезисы докладов 65-й Всероссийской научно-технической конференции НГАСУ(Сибстрин), 8-10 апреля 2008 г. – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2008. – С.173-174.
83. Цой В.М. Об автоматизации решения оптимизационных задач в технологии бетона методом математического планирования экспериментов [текст]/ В.М. Цой, А.И. Адылходжаев, И.М. Махаматалиев// Материалы научно- практического семинара «Курилиш ашёларининг тузилиши ва хоссаларини яхшилаш усуллари» -Ташкент, 2015. С. 8-14
84. Джонсон Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке/ Н. Джонсон, Ф. Лион. – М.: Мир, 1980. – Т.1. – 610 с.
85. McCall, Robert B. Fundamental Statistics for the Behavioral Sciences. 5thed. New York: Harcourt Brace Jovanovich, 1990. – 440 p.
86. Маркова Е.В. Комбинаторные планы в задачах многофакторного эксперимента / Е.В. Маркова, А.Н. Лисенков. – М.: Наука, 1979. – 348 с.
87. Красовский Г.И. Планирование эксперимента / Г.И. Красовский, Г.Ф.Филаретов. – Минск: Изд-во БГУ, 1982. – 302 с.
88. Dewar J.D. Computer Modelling of Concrete Mixture. – London, New York:E&FN Spon, 1999. – 256 p.

89. Айвазян С.А. Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных: справочное изд. / С.А. Айвазян, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 471 с.

90. Вершинин В.И. Планирование и математическая обработка результатов химического эксперимента: учебное пособие / В.И. Вершинин, Н.В. Перцев. – Омск: Изд-во ОмГУ, 2005. – 216 с.

91. Монтгомери Д.К. Планирование эксперимента и анализ данных / Д.К. Монтгомери. – Л.: Судостроение, 1980. – 384 с.