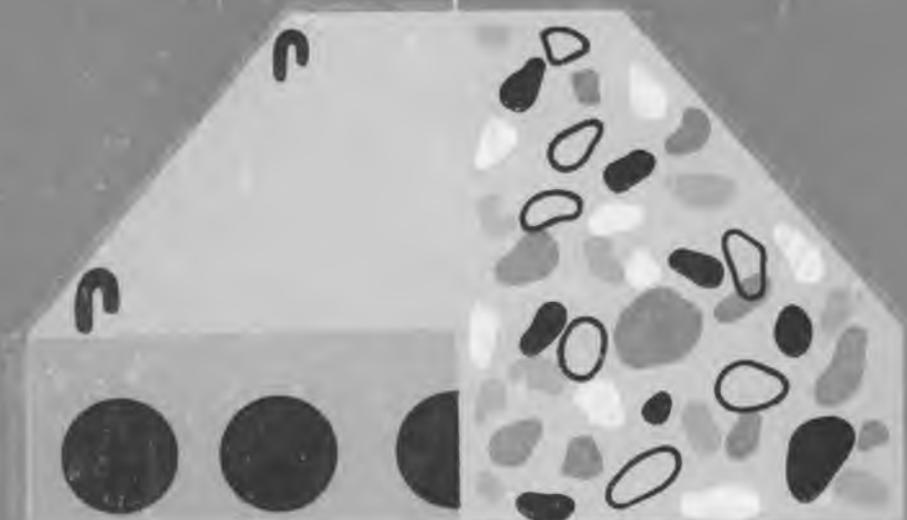


66
Д, 24

Л. И. ДВОРКИН

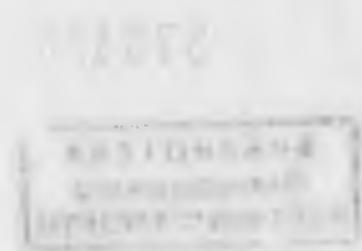
ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВОВ БЕТОНА



Q24

Л. И. ДВОРКИН

ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВОВ БЕТОНА



ЛЬВОВ

ИЗДАТЕЛЬСТВО ПРИ ЛЬВОВСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ
ИЗДАТЕЛЬСКОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ «ВИЦА ШКОЛА»

1981

ББК 38.626.1

6С3

Д24

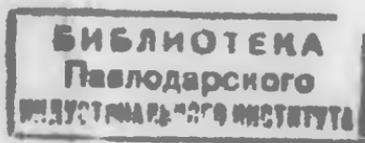
УДК 666.972.7.031.1

Дворкин Л. И. Оптимальное проектирование составов бетона. — Львов: Вища школа. Изд-во при Львов. ун-те, 1981. — с. 160.

В монографии рассмотрены структурно-критериальный и кибернетический методы проектирования составов бетона с комплексом строительно-технических свойств. На основе системного анализа решены задачи проектирования составов с выбором оптимальных исходных параметров: качественных показателей материалов, продолжительности тепловой обработки, удобоукладываемости смеси, проектных марок (оптимальное проектирование составов). Приведены номограммы и примеры практической реализации разработанных методик. Для инженеров-технологов, научных работников и аспирантов соответствующего профиля, может быть использована также студентами старших курсов строительно-технологических специальностей. Табл. 52. Ил. 51. Библиогр.: 115 назв.

Рецензент проф. П. Ф. Шубенкии

370129



Редакция научно-технической литературы

Д $\frac{30203-073}{M225(04)-81}$ БЗ-38-10-80 3203000000

© Издательское объединение
«Вища школа», 1981

ПРЕДИСЛОВИЕ

Одной из основных задач народного хозяйства нашей страны, поставленной XXV съездом КПСС, является всемерное повышение качества продукции и эффективности общественного производства.

Применительно к строительной индустрии повышению качества продукции и эффективности производства в значительной мере способствуют: развитие общей теории бетона и создание на ее основе системы технологических расчетов с широким применением ЭВМ для прогнозирования свойств бетона и управления качеством при производстве железобетонных конструкций; разработка критериев и методов оценки технико-экономической эффективности бетонов и способов производства конструкций.

Успешное развитие этих направлений должно базироваться как на физических исследованиях структуры бетона, так и на кибернетических представлениях, позволяющих создать математические модели, описывающие внешние функциональные зависимости бетона как сложной, многофакторной системы. Целесообразность объединения названных методов применительно к таким сложным объектам исследования, как бетон и его технология, следует из сущности диалектико-материалистической гносеологии, предполагающей эффективное использование различных способов научного познания.

Мы рассмотрим решение задач нового направления в технологии бетона — оптимального проектирования составов, представляющего собой систему расчетов, которые позволяют не только определить оптимальные составы бетонной смеси, обеспечивающие комплекс нормируемых показателей, но и оптимизировать исходные параметры (вид цемента и его свойства, особенности заполнителей, вид добавок, подвижность и жесткость бетонной смеси, режим тепловой обработки, проектные марки бетона). Основные особенности нашей работы: сочетание теоретических и экспериментальных исследований технологического характера с технико-экономическими обоснованиями; широкое применение математического моделирования.

Мы выражаем благодарность профессорам Ю. М. Баженову, В. А. Вознесенскому, Г. И. Горчакову, П. Ф. Шубенкину за ценные советы и критические замечания, а также за помощь при подготовке этой работы инженерам В. А. Шушпанову, М. Ш. Файнеру, Н. Б. Шамбану.

ЗАДАЧИ И МЕТОДОЛОГИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СОСТАВОВ БЕТОНА

От традиционных задач подбора составов бетона оптимальное проектирование отличается более широкой постановкой и диалектическая взаимосвязь с другими задачами оптимизации технологических процессов. Оптимальное проектирование составов бетона стало возможным вследствие развития теоретических представлений о структурообразовании бетона и разработки методологии системного анализа.

1.1. Основные задачи оптимального проектирования составов

Качество бетона определяется совокупностью его строительно-технических свойств. Оперативное управление им возможно при создании системы научно обоснованных надежных методов прогноза. Известны две группы таких методов: экспериментальные и аналитические.

При помощи экспериментальных свойства бетона устанавливают уже после изготовления материала. Аналитические же позволяют прогнозировать их на стадии проектирования, учитывать возможные изменения качественных показателей конечного продукта при изменении свойств исходных материалов и параметров технологических режимов. Это дает возможность повысить эффективность производства за счет экономии материальных и трудовых ресурсов, поднять значение научных основ технологии. Развитие аналитических методов прогноза свойств бетона приобретает особое значение при внедрении автоматических систем управления производством с помощью ЭВМ, когда необходимы строгие количественные зависимости, позволяющие рассчитывать оптимальные решения в условиях сложной многофакторной системы.

Уже первые аналитические зависимости, предложенные в 1892 г. Фере, устанавливали связь между прочностью бетона и его структурой. Однако длительное время их недооценивали и на практике использовали зависимости, установленные на основе правила водоцементного отношения. Главное преимущество таких зависимостей — однозначная связь прочности бетона с легко измеряемым технологическим фактором (водоцементным или цементно-водным отношением). Несложными преобразованиями можно показать [86], что все эти многочисленные формулы являются частными случаями общей формулы Фере, установившего связь между прочностью и плотностью

цементного камня в бетоне. Поэтому, когда потребовалось уточнить известные аналитические зависимости и создать новые, исследователи снова обратились к углубленному изучению структуры бетона и ее влиянию на свойства последнего.

Можно выделить ряд достаточно плодотворных направлений в теоретических исследованиях взаимосвязей структура—свойства бетона, основанных на закономерностях реологии и теории упругости, физики твердого тела, физико-химической механики систем, атомно-молекулярной теории и теории искусственных конгломератов. Так, в результате приложения и развития основных положений реологии описаны структурно-механические свойства бетонных смесей [9, 66, 107]; рассмотрение бетона как упруговязкого материала позволило предложить структурные модели и гипотезы механизма деформирования, разрушения и выражения для соответствующих свойств [6, 49, 101]; принципы физико-химической механики дисперсных систем, сформулированные П. А. Ребиндером, легли в основу теорий твердения и управляемого структурообразования, а также многих теоретических расчетных формул [72, 76, 77]; теория искусственных конгломератов [79] дает возможность формировать бетоны оптимальных структур и прогнозировать их свойства.

Основополагающими при изучении влияния структуры на свойства бетона являются представления о бетоне как о капиллярно-пористом композиционном материале. Это основа, на которой построены известные и развиваются новые структурные теории бетона. Изучение структуры порового пространства и его взаимосвязей с прочностью, морозостойкостью, проницаемостью и рядом других свойств — один из наиболее перспективных путей создания системы аналитических зависимостей для прогноза свойств бетона.

Наряду с углублением физических и физико-химических исследований макро-, мезо- и микроструктуры бетона при изменении его свойств все более актуальными становятся обоснование интегральных структурных параметров бетона и получение на их основе расчетных формул типа свойство—структура—состав. Наиболее значительные работы в этом плане выполнены в нашей стране научными коллективами, руководимыми И. Н. Ахвердовым, Ю. М. Баженовым, Г. И. Горчаковым, И. М. Грушко, И. А. Рыбевым, А. Е. Шейкиным, а за рубежом Р. Боггом, Т. Браунярдом, М. Джулинским, Т. Пауэрсом, Х. Стейнором, В. Лерчем, Ф. Ли, Д. Таплином и др.

Соотношения структурных параметров, позволяющие однозначно характеризовать свойства бетона, можно рассматривать как структурные критерии его свойств. Исследованиями в области структурной теории бетона выявлен ряд критериев свойств, подробный анализ которых приведен далее. Однако известные структурные критерии представляют в основном лишь

теоретический интерес. Многие критериальные зависимости предложены для цементного камня, поэтому они не отражают особенностей такой гетерогенной системы, как бетон. Естественно, что применение структурных критериев должно быть направлено прежде всего на прогноз свойств в зависимости от факторов состава и проектирование составов оптимальных структур при заданных показателях свойств.

На VIII Всесоюзной конференции по бетону и железобетону указывалось на необходимость совершенствовать структурно-технологическую теорию бетона с тем, чтобы иметь количественные характеристики и зависимости, которые позволяли бы управлять качеством изготовления конструкций, более точно прогнозировать их свойства, определять технико-экономическую эффективность [2]. Решение этой задачи можно реализовать лишь после создания сопоставимых критериев свойств бетонной смеси и бетона, основанных на общих теоретических предпосылках и единых, доступных для измерения и расчета, количественных показателях структуры.

Значительную часть нашей работы составляют исследования, выполненные с целью разработки системы структурных критериев основных свойств бетонной смеси и бетона, а также их практического использования для прогноза свойств и проектирования составов.

Структурообразование и «синтез свойств» бетона — это комплекс сложнейших процессов, происходящих начиная от атомно-молекулярного уровня компонентов, которые входят в бетон, и кончая его макроструктурой. На современном этапе исследований этой проблемы неизбежны допущения и приближения, оправданные из технологических соображений, однако вносящие определенные погрешности в расчеты. Для ряда свойств бетона при воздействии большого числа факторов состава и режимов структурный метод прогноза пока не представляется возможным. В условиях, когда конкретизируется совокупность управляемых факторов и область их возможного изменения, эффективно применение кибернетического метода прогноза и управления свойствами бетона с помощью математических моделей.

Известно, что кибернетику можно рассматривать как науку об управлении сложными системами. К таким сложным стохастическим системам относится и технология бетона [3], задача которой в конечном счете заключается в том, чтобы, регулируя факторы на «входе», оптимальным образом обеспечить качество материала на «выходе».

Главное и практически наиболее ценное в кибернетическом подходе — возможность с его помощью прогнозировать поведение объекта управления, абстрагируясь от вещественно-энергетических и структурных характеристик, т. е. так называемое функциональное подобие. Кибернетическим инструментарием

являются математические модели, раскрывающие прежде всего внешние функциональные зависимости системы без анализа внутренних причинных связей. Вместе с тем возможность получения конкретной информации о поведении системы в большой мере способствует и теоретическим исследованиям ее внутренней организации.

Накопленный опыт применения кибернетического метода и математического моделирования в технологии бетона показывает, что они должны быть эффективны, главным образом, в сложных оптимизационных задачах, где другие методы исследования или невозможны, или требуют неоправданно больших затрат времени и труда.

Структурно-критериальный и кибернетический методы прогнозирования свойств бетона с успехом могут быть использованы и для решения задач оптимального проектирования составов бетонной смеси.

При традиционной постановке проектирование составов сводится к определению расчетно-экспериментальными методами соотношения исходных компонентов бетонной смеси, обеспечивающих при заданных исходных параметрах (качество цемента, добавок и заполнителей, режим твердения, подвижность бетонной смеси и прочность бетона) минимальный расход цемента. Эффективность проектирования составов зависит от оптимальности указанных исходных параметров с учетом назначения бетона, вида конструкций, способа их производства. Конечная цель оптимального проектирования составов бетона — определение наилучшего соотношения компонентов бетонной смеси при оптимальных исходных параметрах. Оно включает ряд технологических и технико-экономических задач: проектирование составов бетона, обеспечивающих комплекс требуемых свойств (подвижность смеси, прочность, морозостойкость, водонепроницаемость бетона и др.), анализ эффективности и выбор оптимальных исходных компонентов, определение оптимальных режима твердения, удобоукладываемости смеси и, наконец, проектных марок бетона. Решение этих задач требует формулирования на каждом этапе критериев оптимальности, построения математических моделей и применения принципов системного анализа.

Главное условие оптимального проектирования составов бетона — создание необходимых количественных зависимостей, позволяющих прогнозировать свойства бетонной смеси и бетона при изменении основных технологических факторов. Переход к оптимальному проектированию возможен при увязке этих технологических зависимостей с технико-экономическими критериями оптимальности и выполнении системного анализа. Построение количественных зависимостей, необходимых для оптимального проектирования составов бетона и управления технологией, требует применения современных математических

методов и ЭВМ. Ю. М. Баженов отмечает [2], что для более успешного управления технологией бетона и производством сборного железобетона необходимы дальнейшее внедрение математики в эту область, разработка системы управляющих зависимостей и способов технологических расчетов, создание надежных методов прогнозирования свойств бетона и конструкций.

Ни одна из проблем технологии бетона не привлекала к себе большего внимания исследователей, чем проблема разработки методов выбора составов смеси, обеспечивающих при наименьшем расходе цемента требуемое качество бетона. Столь большой интерес к вопросам проектирования составов вполне понятен, так как они являются ключевыми в технологии и неразрывно связаны с теорией бетона и формированием его свойств.

Благодаря многочисленным исследованиям современная технология бетона располагает комплексом расчетно-экспериментальных методов проектирования составов, с успехом используемых на практике. Вместе с тем проблема проектирования составов бетона далека от завершения. Важнейшим направлением ее развития, реализуемым при оптимальном проектировании, является увеличение «разрешающей способности» методов проектирования составов, т. е. количества обеспечиваемых параметров на «выходе» и числа учитываемых факторов на «входе» в бетонную смесь. Так, для гидротехнического и других специальных бетонов актуальна разработка аналитических методов проектирования составов, обеспечивающие не только прочностные, но и другие требуемые технические свойства бетонов (морозостойкость, водонепроницаемость и т. д.).

Практический интерес представляет включение в задачу проектирования составов наряду с определением требуемого расхода основных компонентов на 1 м^3 бетона назначение необходимого количества воздуха, добавок-регуляторов свойств, выбора оптимального вида и активности цемента, назначения наилучшего фракционного состава смеси и т. д. Разумеется, увеличение числа выходных и входных параметров при проектировании составов бетона должно неизбежно вести к усложнению расчетов, поэтому их следует выполнять с помощью ЭВМ.

Оптимальные составы бетонной смеси зависят не только от особенностей исходных материалов, но и от технологических режимов производства изделий и конструкций, где определяющим является режим твердения. В современных условиях заводской технологии изготовления сборных бетонных и железобетонных изделий твердение осуществляется при тепловой обработке. П. И. Боженковым, А. В. Волженским, К. Э. Горяиновым, Б. А. Крыловым, Л. А. Малининой, С. А. Мироновым,

О. П. Мчедловым-Петросяном и другими советскими и зарубежными учеными разработаны теоретические основы ускоренного твердения бетонов и установлены технологические принципы получения бетона заданных свойств в условиях тепловой обработки. В значительно меньшей степени изучены вопросы назначения оптимальных с технико-экономических позиций режимов тепловой обработки и анализа их эффективности для бетонов.

На практике задачи проектирования составов и проектных показателей свойств бетона решаются отдельно конструкторами и технологами, часто независимо друг от друга. При проектировании конструкций назначаются проектные марки бетона, а затем при разработке технологии производства конструкций — составы бетона и технологические режимы, обеспечивающие проектные параметры. Поэтому все усилия технологов, направленные на оптимизацию составов бетона, оказываются в конечном счете неэффективными, если нормируемые показатели свойств бетона запрокированы неоптимально.

Составной частью оптимального проектирования составов бетона является проектирование показателей его свойств. При одних и тех же воздействиях окружающей среды показатели свойств бетона могут быть различны в зависимости от геометрических параметров, характера армирования и других особенностей конструкций. Например, марки бетона по прочности и водонепроницаемости облицовок каналов при одних и тех же нагрузках неодинаковы при различной толщине облицовок. Конструктивные особенности, способ армирования существенно влияют на характер напряженного состояния и как следствие — на морозостойкость, трещиностойкость и другие свойства бетона. Свойства бетона нельзя рассматривать в отрыве как от особенностей работы конструкции в условиях окружающей среды, так и от параметров самой конструкции. Оптимальными следует считать те показатели свойств бетона, которые обеспечивают необходимый уровень качества конструкций при минимально возможных затратах в условиях заданных ограничений на эти конструкции в сооружениях.

При постоянных исходных условиях (неизменном составе и технологии) свойства бетона связаны жесткими корреляционными связями (правило створа) [79]. При оптимизации проектных показателей на первой стадии для каждого свойства в отдельности следует определять технически необходимые показатели, затем выбирать определяющий или «примарный» показатель, с которым приведятся в соответствие другие свойства. Выбранная из условия прочности марка бетона в конструкции оказывается часто ниже требуемой, если не учтены требования по водонепроницаемости или морозостойкости. В такой ситуации после увязки показателей свойств в соответствии с их объективно необходимым соотношением целесооб-

разно корректировать сечение конструкции и ее армирование. Таким образом, оптимальное проектирование составов бетона, являясь в целом комплексом технологических задач, тесно сопрягается с задачами технико-экономического и конструктивного характера. Оптимальное проектирование неразрывно связано с проблемой управления качеством. Математические зависимости, положенные в основу проектирования составов и технологических режимов, могут быть после необходимых преобразований включены в автоматизированную систему управления технологическими процессами.

1.2. Системный анализ-методология решения задач оптимального проектирования составов

Системный анализ — это методология объектов, основанная на концепции систем. Он включает всестороннее количественное сравнение альтернатив и выбор оптимальных решений при широком применении математического моделирования и ЭВМ.

Систему можно рассматривать как организованный комплекс средств достижения общей цели. Таким организованным комплексом является и оптимальное проектирование составов бетона. В него входят назначение технических свойств бетонной смеси и бетона, выбор вида и активности цемента, качественных показателей песка и щебня, вида добавки, определение режимных параметров твердения, установление содержания исходных компонентов в 1 м^3 бетонной смеси. Все эти операции направлены на достижение общей цели — получение бетона, обеспечивающего необходимые требования к конструкциям наиболее эффективным образом, например при минимальных затратах. Их можно рассматривать в качестве подсистем оптимального проектирования составов бетона, а последнюю как подсистему более общей системы — проектирования бетонных и железобетонных конструкций, технологии их производства.

Системный анализ, развивая традиционные методы научного анализа, эффективен при решении сложных проблем в условиях наличия неопределенностей и безграничного количества возможных альтернатив. Неопределенности при проектировании составов обусловлены сложностью бетона как объекта исследования из-за недостаточной изученности процессов его твердения, деформирования и разрушения, неоднородной и многокомпонентной структуры, нестабильной во времени, постоянного взаимодействия с окружающей средой.

В работе [3] путем простых расчетов показано, что при проектировании технологии железобетонных конструкций даже по весьма упрощенной схеме с оценкой всего лишь трех вариантов на каждом из 14 этапов возможно 3^{14} , или 4782969 решений.

Аналогично нетрудно показать, что практически безграничное количество альтернатив возможно и в задачах проектирования качественных показателей бетона. Вероятностный характер прогноза свойств бетона при различных комбинациях технологических факторов приводит к стохастичности системы проектирования составов. Для оценки функциональных характеристик необходимо построение математических моделей, адекватно отражающих взаимосвязи между отдельными элементами объекта исследования. Влияние технологических факторов в таких моделях можно учитывать как непосредственно, так и косвенно через интегральные критерии.

Вероятностные математические модели строят, используя аппарат регрессионного анализа результатов традиционного или активного алгоритмизированного эксперимента. Последний проводят, применяя методы математического планирования экспериментов, которые в настоящее время достаточно хорошо разработаны [3, 12, 13]. Методы математического планирования эксперимента наиболее близки по исходным предпосылкам системному подходу. Изучаемый объект с их помощью рассматривается с учетом возможного взаимодействия факторов, что позволяет построить модель, достаточно полно вскрывающую прямые и обратные связи в системе.

Основные задачи оптимального проектирования составов бетона можно решать кибернетическим и структурно-критериальными методами. Кибернетический метод предполагает использование при получении математической модели принципа «черного» или «серого» ящика и описание взаимосвязей между параметрами «выхода» и «входа» системы уравнениями регрессии.

Структурно-критериальный метод также включает применение статистических моделей, однако они устанавливают вероятностные зависимости между свойствами бетона и структурными критериями этих свойств.

Основным достоинством кибернетического метода является высокая точность прогноза поведения сложной системы с определенным набором контролируемых факторов по интерполяционным моделям. Статистические полиномиальные модели имеют простую структуру. По ним можно быстро оценить влияние каждого из исследуемых факторов. Такие модели позволяют с помощью ЭВМ легко осуществлять оптимизацию, характер уравнений облегчает поиск экстремума. Однако при числе регулируемых факторов более пяти-шести резко возрастают объем экспериментальных работ и ошибки измерений. Кроме того, с помощью полиномиальных моделей интерполяционные расчеты строго производятся лишь в избранном факторном пространстве, хотя и возможен некоторый экстраполяционный прогноз [13]. Это приводит к известной локальности кибернетических моделей, их пригодности для определенных условий, диапазон которых может быть и достаточно широким.

$$\Sigma P_i^{\circ} = \Sigma P_{i, \text{опт}}$$

$$OK^{\circ} = OK_{\text{опт}} (Ж^{\circ} = Ж_{\text{опт}})$$

$$\tau_{т.о}^{\circ} = \tau_{т.о, \text{опт}}$$

$$K_M^{\circ} = K_{M, \text{опт}}$$

Проектирование оптимальных составов бетона при определенных исходных материалах (K_M°), режиме твердения ($\tau_{т.о}$) и проектных показателях (ΣP_i° , OK°)

$$C \rightarrow \min$$

Определение $C/B, B, D$

$$\Sigma p_i \geq \Sigma p_i^{\circ}$$

$$OK = OK^{\circ}$$

$$(Ж = Ж^{\circ})$$

$$\tau_{т.о} = \tau_{т.о}^{\circ}$$

$$K_M = K_M^{\circ}$$

$$r = \frac{П}{П+Ш}$$

Выбор оптимальных исходных материалов ($K_{M, \text{опт}}$)

$$S_M \rightarrow \min;$$

$$K_{р.и.ц1} \geq K_{р.и.ц1}^{\circ}$$

Определение затрат на материалы S_M

Определение $K_{р.и.ц1}$

Выбор оптимальной продолжительности тепловой обработки ($\tau_{т.о, \text{опт}}$)

$$S_M + S_{т.о} \rightarrow \min;$$

$$K_{р.и.ц2} \geq K_{р.и.ц2}^{\circ}$$

Определение суммарных затрат на материалы и тепловую обработку $S_M + S_{т.о}$

Определение $K_{р.и.ц2}$

Выбор оптимальной удобоукладываемости бетонной смеси ($OK_{\text{опт}}$, $Ж_{\text{опт}}$)

$$S_M + S_{п} + S_{у} + S_{т.о} \rightarrow \min$$

$$K_{р.и.ц3} \geq K_{р.и.ц3}^{\circ}$$

Определение суммарных затрат на материалы, перемешивание, уплотнение и тепловую обработку бетона $S_M + S_{п} + S_{у} + S_{т.о}$

Определение $K_{р.и.ц3}$

Выбор оптимальных показателей проектных свойств бетона ($\Sigma P_{i, \text{опт}}$)

$$S_0 \rightarrow \min$$

(При обеспечении несущей способности конструкции)

Определение общих удельных затрат на конструкцию (изделие) S_0

Определение затрат на тепловую обработку $S_{т.о}$

Определение затрат на перемешивание смеси $S_{п}$

Определение затрат на уплотнение $S_{у}$

Определение затрат на армирование и др.

Критерий оптимальности (эффективности) системы характеризует степень достижения цели и является средством, с помощью которого выбираются альтернативы. Эффективность любого технологического решения можно измерить размерами затрат при обеспечении необходимых свойств продукции. При решении отдельных технических задач возможны разнообразные критерии эффективности (максимальная прочность, срок безотказной службы агрегата и т. д.), однако при системном анализе предпочтительно использование стоимостных критериев, из которых наиболее общим являются приведенные затраты

$$S = C + E_n K + E_n \Sigma K_{сп}, \quad (1.2)$$

где C — себестоимость единицы продукции, руб.; K — удельные капиталовложения на единицу продукции; $E_n = 0,15$ — нормативный коэффициент эффективности; $\Sigma K_{сп}$ — суммарные удельные капиталовложения в сопряженные отрасли (производство цемента, заполнителей, арматуры, химдобавок).

Выбор варианта по критерию минимума удельных приведенных затрат обеспечивает принятие необходимого решения. Приведенные затраты удовлетворяют требованиям, предъявляемым к критериям оптимальности технологических решений [100], и характеризуют эффективность системы.

Критерий минимума удельных приведенных затрат можно рассматривать как общий или глобальный критерий системы, на отдельных стадиях системного анализа возможно применение частных или локальных критериев. Например, при проектировании составов бетона на известных исходных материалах при заданных технологических режимах критерием оптимальности служит минимум расхода цемента. В данном случае этот частный критерий вполне соответствует общему — минимуму удельных приведенных затрат. Минимизация общих затрат не всегда ведет к минимуму расхода цемента — главного материального ресурса при проектировании составов бетона. Такие ситуации характерны в случае выбора составов бетона с одновременной оценкой оптимальности различных видов и марок цемента, режимов тепловой обработки и т. д.

Важнейшим технико-экономическим показателем эффективности технологических решений при проектировании составов является степень рационального использования цемента. При системном подходе понятие рационального использования цемента включает не только экономное расходование определенного вяжущего в бетоне при заданных условиях твердения, но и выбор вида вяжущего, его физико-механических характеристик, а также определение комплекса технологических приемов, способствующих наименьшим затратам на цемент. Критерием рационального использования цемента $K_{р.и.д}$ должен служить стоимостной показатель, позволяющий сравнить суммарные затраты на цемент и технологические приемы, способствующие

его экономии при данном варианте, с затратами на цемент, при некотором эталонном варианте:

$$K_{р.и.ц} = S_{ц.эт}/(S_{ц} + S_{т.п}) = (C_{ц.эт} + E_{н} K_{ц}) \times \\ \times U_{эт}/[(C_{ц} + E_{н} K_{ц}) U + (C_{д} + E_{н} K_{д}) D + S_{доп}], \quad (1.3)$$

где $K_{р.и.ц}$ — коэффициент (критерий) рационального использования цемента; $S_{ц.эт}$, $S_{ц}$ — удельные приведенные затраты на цемент (на 1 м³ бетона, конструкцию и т. д.) соответственно при эталонном и данном вариантах технологического решения; $S_{т.п}$ — удельные приведенные затраты на комплекс технологических приемов, направленных на сокращение расхода цемента без ухудшения качества бетона (введение добавок, электро- или пароразогрев смеси и т. д.); $C_{ц.эт}$, $C_{ц}$, $C_{д}$ — соответственно стоимость эталонного и используемого цемента, а также стоимость добавки; $K_{ц}$, $K_{д}$ — удельные капиталовложения в производство цемента, добавок и т. д.

$K_{р.и.ц}$ может быть или самостоятельным частным критерием оптимальности в ряде задач, или служить в качестве ограничения, когда критерием являются удельные приведенные затраты. Если сравниваются технологические решения при неизменном виде и марке цемента без специальных дополнительных затрат $S_{т.п}$, то стоимостной показатель $K_{р.и.ц}$ трансформируется в физический — относительный расход цемента (например, расход цемента при ускоренном твердении относительно эталона — расхода цемента при нормальном твердении). Наряду с $K_{р.и.ц}$ в отдельных задачах оптимального проектирования составов возможно применение и других критериев рационального использования ресурсов — топлива, металла, рабочей силы и др.

Общая схема системного анализа при оптимальном проектировании составов бетона показана на рис. 1.1. На первом этапе она предполагает определение оптимальных составов бетона, обеспечивающих комплекс требуемых свойств при некоторых заданных проектных параметрах, а на последующих — оптимизацию проектных параметров и соответствующее корректирование составов.

Задачи оптимизации при системном подходе решают поэтапно и завершают общей оптимизацией системы. В зависимости от постановки задач в конкретных условиях отдельные блоки этой схемы можно не включать в оптимальное проектирование.

Для каждой задачи формулируют критерии оптимальности и ограничения. По мере углубления задач системного анализа усложняются и критерии оптимальности (рис. 1.1). При оптимальном проектировании составов бетона простейший критерий оптимальности — минимальный расход цемента, наиболее сложный — минимальные удельные затраты на конст-

рукцию «в деле», т. е. суммарные затраты, включающие затраты на ее изготовление, а также при необходимости транспортирование и монтаж.

Критерий минимума затрат в задачах выбора оптимальных технологических решений в реальных условиях применим с учетом ограничений имеющихся ресурсов (цемента, топлива, рабочей силы и др.), а также уровня необходимой производительности. Принимаемые решения при этом часто имеют компромиссный характер [100]. По мере ограничения числа рассматриваемых альтернатив при проектировании составов бетона, связанных с выбором цемента, добавок и заполнителей, условий и длительности твердения, удобоукладываемости смеси, наконец, проектных марок бетона и параметров конструкций критерий минимума затрат и коэффициента рационального использования цемента упрощаются и в конечном счете трансформируются в минимум затрат на цемент или минимальный расход цемента. В этом случае решение приобретает характер поиска единственного варианта, при котором критерий имеет экстремальное (минимальное) значение.

ГЛАВА 2

СТРУКТУРНО-КРИТЕРИАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ И ПРОЕКТИРОВАНИЮ ОПТИМАЛЬНЫХ СОСТАВОВ БЕТОНА

Создание достаточно общих и вместе с тем простых аналитических зависимостей структура—состав—свойства возможно, во-первых, на основе развития представлений о структуре бетонной смеси и бетона, во-вторых, при обосновании интегральных критериев, позволяющих учитывать в значительной мере многообразие технологических факторов.

2.1. Расчет показателей удобоукладываемости бетонной смеси

Удобоукладываемость бетонных смесей определяется многими технологическими факторами, что существенно затрудняет расчет подвижности, жесткости и необходимой водопотребности. Существует ряд эмпирических формул, позволяющих находить водосодержание и показатели удобоукладываемости [1, 9, 52, 91, 92].

Физически обоснованным и сравнительно простым для оценки подвижности бетонной смеси является структурный крите-

рий N [4], равный отношению толщины слоя цементного теста между зернами заполнителя δ к размеру поверхности зерен заполнителя F . Этот критерий, однако, справедлив при определенной консистенции цементного теста, что существенно ограничивает его возможности, не позволяет отразить ряд известных закономерностей, например, правило постоянства водопотребности, влияние нормальной густоты и т. д., а также найти достаточно общее критериальное уравнение.

На рис. 2.1 представлена зависимость водопотребности бетонных смесей с различной осадкой конуса от цементно-водного

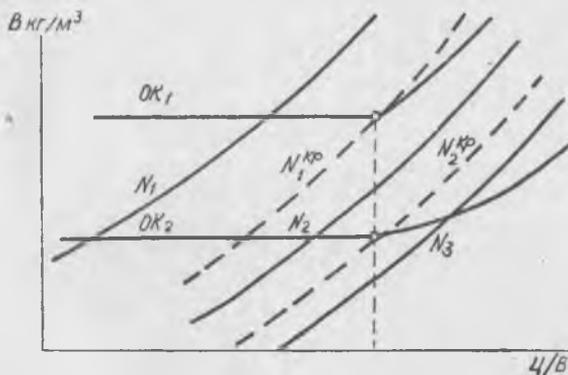


Рис. 2.1. Зависимость водопотребности бетонной смеси и критерия N при различной осадке конуса от цементно-водного отношения.

отношения цементного теста $(Ц/В)_{ц.т} = 1/(В/Ц)_{ц.т}$. Как следует из рис. 2,1, правило постоянства водопотребности бетонных смесей сохраняется до критического значения $(Ц/В)_{ц.т}^{кр}$, что подтверждают ряд исследований [1, 85,91]. Согласно тем же исследованиям, значение $(Ц/В)_{ц.т}^{кр} = 1/(1,68 k_{н.г})$, $k_{н.г} = НГ/100$, где $НГ$ — нормальная густота цементного теста, %, т. е. связано с верхней границей тиксотропии [1] или с предельной водоудерживающей способностью цементного теста в его статическом состоянии. Это обусловлено тем, что при $(Ц/В)_{ц.т} < (Ц/В)_{ц.т}^{кр}$ структурная сетка цементного теста максимально разрушена и частицы цемента раздвинуты так, что не способны взаимодействовать друг с другом. В этом случае вода затворения (за исключением воды, поглощенной поровой структурой заполнителя) однозначно определяет подвижность бетонной смеси. Однако $(В/Ц)_{ц.т}$ нельзя отождествлять с истинным $(В/Ц)_{и}$, которое определяет подвижность цементного теста, сроки схватывания и свойства цементного камня в бетоне [87]. Водоцементное отношение цементного теста $(В/Ц)_{ц.т}$ учитывает также иммобилизованную заполнителем воду за вычетом поглощенной $V_{полг}$, т. е. воду, физически связанную поверхностью заполни-

рукцию «в деле», т. е. суммарные затраты, включающие затраты на ее изготовление, а также при необходимости транспортирование и монтаж.

Критерий минимума затрат в задачах выбора оптимальных технологических решений в реальных условиях применим с учетом ограничений имеющихся ресурсов (цемента, топлива, рабочей силы и др.), а также уровня необходимой производительности. Принимаемые решения при этом часто имеют комплексный характер [100]. По мере ограничения числа рассматриваемых альтернатив при проектировании составов бетона, связанных с выбором цемента, добавок и заполнителей, условий и длительности твердения, удобоукладываемости смеси, наконец, проектных марок бетона и параметров конструкций критерии минимума затрат и коэффициента рационального использования цемента упрощаются и в конечном счете трансформируются в минимум затрат на цемент или минимальный расход цемента. В этом случае решение приобретает характер поиска единственного варианта, при котором критерий имеет экстремальное (минимальное) значение.

ГЛАВА 2

СТРУКТУРНО-КРИТЕРИАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ И ПРОЕКТИРОВАНИЮ ОПТИМАЛЬНЫХ СОСТАВОВ БЕТОНА

Создание достаточно общих и вместе с тем простых аналитических зависимостей структура—состав—свойства возможно, во-первых, на основе развития представлений о структуре бетонной смеси и бетона, во-вторых, при обосновании интегральных критериев, позволяющих учитывать в значительной мере многообразие технологических факторов.

2.1. Расчет показателей удобоукладываемости бетонной смеси

Удобоукладываемость бетонных смесей определяется многими технологическими факторами, что существенно затрудняет расчет подвижности, жесткости и необходимой водопотребности. Существует ряд эмпирических формул, позволяющих находить водосодержание и показатели удобоукладываемости [1, 9, 52, 91, 92].

Физически обоснованным и сравнительно простым для оценки подвижности бетонной смеси является структурный крите-

рий N [4], равный отношению толщины слоя цементного теста между зернами заполнителя δ к размеру поверхности зерен заполнителя F . Этот критерий, однако, справедлив при определенной консистенции цементного теста, что существенно ограничивает его возможности, не позволяет отразить ряд известных закономерностей, например, правило постоянства водопотребности, влияние нормальной плотности и т. д., а также найти достаточно общее критериальное уравнение.

На рис. 2.1 представлена зависимость водопотребности бетонных смесей с различной осадкой конуса от цементно-водного

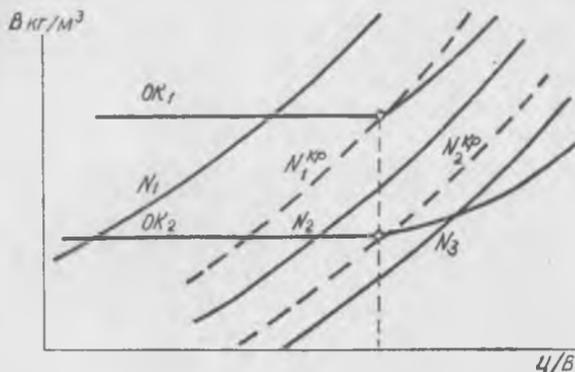


Рис. 2.1. Зависимость водопотребности бетонной смеси и критерия N при различной осадке конуса от цементно-водного отношения.

отношения цементного теста $(Ц/В)_{ц.т} = 1/(В/Ц)_{ц.т}$. Как следует из рис. 2,1, правило постоянства водопотребности бетонных смесей сохраняется до критического значения $(Ц/В)_{кр.т}$, что подтверждают ряд исследований [1, 85,91]. Согласно тем же исследованиям, значение $(Ц/В)_{кр.т} = 1/(1,68 k_{ц.г})$, $k_{ц.г} = НГ/100$, где $НГ$ — нормальная плотность цементного теста, %, т. е. связано с верхней границей тиксотропии [1] или с предельной водоудерживающей способностью цементного теста в его статическом состоянии. Это обусловлено тем, что при $(Ц/В)_{ц.т} < (Ц/В)_{кр.т}$ структурная сетка цементного теста максимально разрушена и частицы цемента раздвинуты так, что не способны взаимодействовать друг с другом. В этом случае вода затворения (за исключением воды, поглощенной поровой структурой заполнителя) однозначно определяет подвижность бетонной смеси. Однако $(В/Ц)_{ц.т}$ нельзя отождествлять с истинным $(В/Ц)_и$, которое определяет подвижность цементного теста, сроки схватывания и свойства цементного камня в бетоне [87]. Водоцементное отношение цементного теста $(В/Ц)_{ц.т}$ учитывает также иммобилизованную заполнителем воду за вычетом поглощенной $V_{пол.г}$, т. е. воду, физически связанную поверхностью заполни-

теля. Таким образом, $(B/C)_{ц.т}$ определяет консистенцию цементного теста в местах контакта с заполнителем или его смазочный эффект. Это уточнение необходимо для того, чтобы учесть не только силы внутреннего трения цементного теста, но и трение его на контактах с заполнителем.

На рис. 2.1 показаны изолинии критерия N , подсчитанные по формуле

$$N = \delta/F = (v_{ц.т} - p_a v_3) / (u v_3)^2, \quad (2.1)$$

где $\delta = (v_{ц.т} - p_a v_3) / (u v_3)$ — средняя толщина цементного теста в бетоне, 10^{-6} м; $F = u v_3$ — суммарная поверхность зерен заполнителя; $v_{ц.т} = C/\rho + B + v_b$ — объем цементного теста с учетом вовлеченного воздуха, $м^3/м^3$; v_3 — абсолютный объем заполнителя, $м^3/м^3$; $p_a = \rho_3/\rho_{0.3} - 1$ — пустотность по отношению к абсолютному объему зерен заполнителя; ρ_3 — плотность заполнителя, $кг/м^3$; $\rho_{0.3}$ — объемная насыпная масса заполнителя в уплотненном состоянии, $кг/м^3$; u — удельная поверхность зерен заполнителя по абсолютному объему, 10^{-6} $м^2/м^3$.

Как видно из рис. 2.1, изолинии подвижности пересекаются с изолиниями критерия N при различных значениях $(C/B)_{ц.т}$. Это свидетельствует о том, что подвижность бетонной смеси не определяется однозначно критерием N , а зависит еще и от консистенции цементного теста или $(C/B)_{ц.т}$.

Обозначим значения критерия N , имеющие общую точку с изолиниями OK (рис. 2.1) при $(C/B)_{ц.т} = (C/B)_{ц.т}^{кр}$ через $N^{кр}$. Так как каждому значению $N^{кр}$ соответствует определенное значение OK , то в пределах действия правила постоянства водопотребности $(C/B)_{ц.т} \leq (C/B)_{ц.т}^{кр}$ подвижность бетонной смеси определяется значением

$$N^{кр} = \frac{[B/\rho_b + B/(1,68 k_{н.г} \rho_{ц}) + v_b](1 + p_a) - p_a}{\{u [1 - B/\rho_b - B/(1,68 k_{н.г} \rho_{ц}) - v_b]\}^2} \cdot 10^{-3}. \quad (2.2)$$

Здесь произведена замена:

$$C = B : (B/C)_{кр} = B / (1,68 k_{н.г}). \quad (2.3)$$

Введем понятие структурного критерия подвижности бетонной смеси, учитывающего реологию цементного теста:

$$L_{ок} = N / l\eta_0 = (v_{ц.т} - p_a v_3) / [(u v_3^2) l\eta_0], \quad (2.4)$$

где $l\eta_0$ — критерий структурной вязкости цементного теста в бетонной смеси практически неразрушенной структуры, т. е. такой структуры, которая характерна при стандартном определении осадки конуса. Тогда в пределах $(C/B)_{ц.т} \leq (C/B)_{ц.т}^{кр}$,

$$L_{ок} = N^{кр} = N / l\eta_0. \quad (2.5)$$

Консистенция, а следовательно, и структурная вязкость цементного теста однозначно зависят от нормальной густоты. Это вы-

текаст из определения нормальной густоты цементного теста. Таким образом, она при критическом значении $(B/C)_{ц.т.}^{кр} = 1,68 k_{ц.г.}$, т. е. на верхнем пределе тиксотропии, величина постоянная, а любое изменение значений водосодержания цементного теста скажется на изменении показателей консистенции. В связи с этим введем параметр s , именуемый в дальнейшем показателем консистенции,

$$s = (B/C)_{ц.т.} - 1,68 k_{ц.г.} \quad (2.6)$$

Для плотных заполнителей, пренебрегая значением воды, поглощаемой поровой структурой, записываем

$$s = B/C - 1,68 k_{ц.г.} \quad (2.7)$$

Можно выделить три качественных состояния бетонной смеси:

1) $s > 0$ — по мере увеличения водоцементного отношения при $B = \text{const}$ вязкость цементного теста на контактах с заполнителем изменяется незначительно, что не приводит к существенному изменению подвижности (правило постоянства водопотребности);

2) $s = 0$ — водоцементное отношение достигло своего критического значения, равного $1,68 k_{ц.г.}$. Это состояние можно рассматривать как промежуточное;

3) $s < 0$ — вязкость цементного теста существенно сказывается на трении в зонах контакта с заполнителем, и незначительное изменение B/C приводит к существенному изменению подвижности.

Зависимость $l\eta_0 = f(s)$ в пределах действия правила постоянства водопотребности ($s > 0$) можно найти с учетом выражения (2.5), тогда

$$l\eta_0 = N/N^{кр} = f(s). \quad (2.8)$$

Для поиска функциональной связи $l\eta_0 = f(s)$ введем понятие относительной вязкости цементного теста ненарушенной структуры

$$\eta_0' = \eta_0 / \eta_0^{кр}, \quad (2.9)$$

где $\eta_0^{кр}$ — значение η_0 при $s = 0$.

Известно [50], что логарифм структурной вязкости линейно изменяется с изменением B/C , т. е. консистенции цементного теста. В нашем случае показателем консистенции цементного теста является s . Поэтому, учитывая, что $\eta_0' = 1$ при $s = 0$ и увеличение s приводит к снижению η_0 , можно записать:

$$\ln(1/\eta_0') \sim s. \quad (2.10)$$

Введем коэффициент пропорциональности m . Тогда выражение $\eta_0' = f(s)$ запишем как

$$\eta_0' = \exp(-ms). \quad (2.11)$$

Линейная связь между подвижностью бетонной смеси и критерием $L_{ок} = N/\eta_0'$, очевидно, будет в случае, когда OK линейно связано как с критерием N , так и с $1/\eta_0'$. Для установления характера зависимости $OK = f(N)$ поставлен специальный эксперимент при различных значениях s (табл. 2.1). Из табл. 2.1 следует, что зависимость $OK = f(N)$ является линейной во всех случаях: $s < 0$; $s = 0$; $s > 0$.

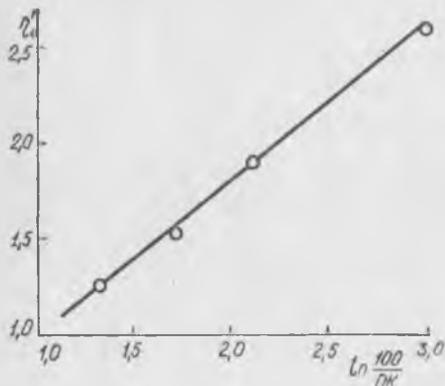


Рис. 2.2. Зависимость между относительной начальной вязкостью η_0' цементного теста ненарушенной структуры и $\ln \frac{100}{OK}$:

OK — осадка конуса бетонной смеси.

В серии специально поставленных опытов определяли зависимость между осадкой конуса бетонной смеси и структурной вязкостью цементного теста (при $N = \text{const}$). Структурную вязкость цементного теста при различных значениях s определяли на ротационном вискозиметре РВ—4.

Таблица 2.1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ
ДЛЯ УСТАНОВЛЕНИЯ ХАРАКТЕРА ЗАВИСИМОСТИ $OK = f(N)$

Осадка конуса бетонной смеси (OK), см	Критерий N при различных показателях консистенции цементного теста		
	$(BII)_{ц.т.} = -0,41;$ $S = -0,05$	$(BII)_{ц.т.} = -0,46;$ $S = 0$	$(BII)_{ц.т.} = 0,66;$ $S = 0,2$
1,4	11,0	8,5	4,9
2,5	12,1	9,3	5,5
5,7	14,7	11,1	6,7
12	20,4	14,8	9,0
15	22,5	17,3	10,2

Осадку конуса бетонной смеси измеряли на стандартном конусе. Зависимость между OK и η_0' представлена на рис. 2.2. Анализ графика показал, что связь между OK и η_0' имеет логарифмический характер:

$$\eta_0' = \ln(1/OK); \quad OK \sim (1/\exp \eta_0'). \quad (2.12)$$

При обеспечении условия линейности ОК от $L_{ок}$, очевидно, можно записать:

$$OK \sim (1/\exp \eta_0') \sim (1/l\eta_0). \quad (2.13)$$

Учитывая, что при $s=0$ должны выполняться условия $l\eta_0=1$ и $\eta_0'=1$, из выражений (2.11)—(2.13) получаем формулу критерия $l\eta_0$:

$$l\eta_0 = \exp[\exp(-ms) - 1]. \quad (2.14)$$

Так как $l\eta_0$ — величина условная и важен только характер ее изменения, то нет необходимости вводить коэффициент пропор-

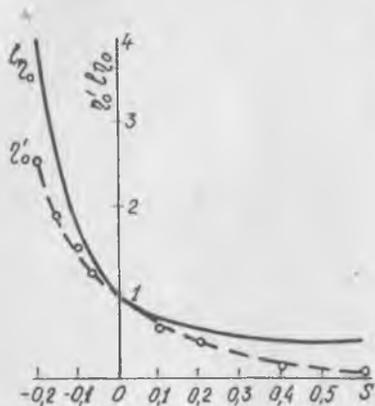


Рис. 2.3. Изменение структурной вязкости η_0 и критерия $l\eta_0$ от показателя консистенции s .

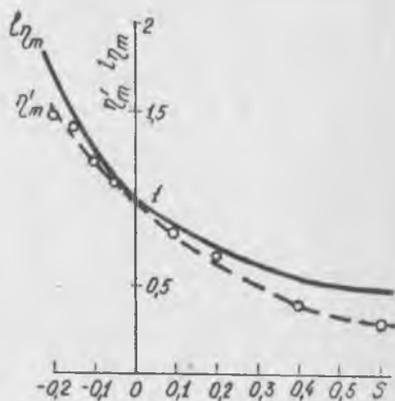


Рис. 2.4. Изменение структурной вязкости цементного теста η_m и критерия $l\eta_m$ от показателя консистенции s .

циональности в выражение (2.13). Среднее значение коэффициента m , определенное экспериментально для различных значений $k_{ц.г}$ из формулы $m = \frac{\ln(1/\eta_0')}{s}$, оказалось равным 4.4. На рис. 2.3 показано изменение η_0' и $l\eta_0$ в зависимости от s .

При вибрационных воздействиях на бетонную смесь вследствие тиксотропного снижения структурной вязкости существенно возрастает роль толщины пленки цементного теста δ и снижается влияние поверхности трения F . В табл. 2.2 приведены экспериментальные данные для установления зависимости жесткости бетонной смеси, определенной по ГОСТ 10181-62, от значения δ . Учитывая практически линейную связь между показателем жесткости и δ (табл. 2.2), предлагаем следующее выражение для критерия жесткости:

$$L_{ж} = \delta/l\eta_m = (v_{ц.г} - p_a v_3)/(u v_3 l\eta_m), \quad (2.15)$$

где $l\eta_m$ — критерий структурной вязкости цементного теста разрушенной структуры в бетонной смеси при стандартных характеристиках колебаний виброплощадки.

Для экспериментального обоснования зависимости структурной вязкости от параметра s поставлена серия опытов по методике работы [50]. Анализ полученных данных (рис. 2:4) подтверждает, что зависимости $l\eta_m = f_1(s)$; $\eta_m' = f_2(s)$, как и $l\eta_0 = f_1(s)$, $\eta_0' = f_2(s)$, достаточно хорошо аппроксимируются формулами

$$l\eta_m = \exp[\exp(-m_1 s) - 1], \quad (2.16); \quad \eta^1 = \exp(-m_1 s), \quad (2.17)$$

Таблица 2.2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ
ДЛЯ УСТАНОВЛЕНИЯ ХАРАКТЕРА ЗАВИСИМОСТИ $\mathcal{J} = f(\delta)$

Жесткость бетонной смеси (\mathcal{J}), с	Критерий δ при различных показателях константности цементного теста, мкм (10^{-6} м)		
	$(B/II)_{ц.т} = 0,41;$ $S = -0,05$	$(B/II)_{ц.т} = 0,46;$ $S = 0$	$(B/II)_{ц.т} = 0,66;$ $S = 0,2$
8	63	50	30
15	57	46	27
26	47	35	21
40	40	31	19
78	28	24	12

где η_m' — относительная вязкость цементного теста структуры, разрушенной при стандартных колебаниях в процессе уплотнения

$$\eta_m' = \eta_m / \eta_m^{кр}; \quad (2.18)$$

$\eta_m^{кр}$ — значение η_m при $s=0$. Коэффициент m_1 зависит от интенсивности процесса уплотнения и определяется в общем виде:

$$m_1 = \frac{\ln(1/\eta_m^1)}{s}, \quad (2.19)$$

где $\eta_m^1 = \eta_m / \eta_m^{кр}$ — относительная вязкость цементного теста структуры, разрушенной данным способом уплотнения.

Значения коэффициента m_1 для $l\eta_m$ приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3. ЗАВИСИМОСТЬ $l\eta_0$ И $l\eta_m$ ОТ s

Параметр	s								
	-0,2	-0,13	-0,1	-0,05	0	0,1	0,2	0,4	0,6
m	4,71	4,32	4,14	4,66	—	4,34	4,01	4,45	4,56
m_1	2,01	2,42	2,12	2,05	—	2,17	2,07	2,53	2,20
$l\eta_0$	4,10	2,55	1,74	1,28	1	0,70	0,56	0,44	0,39
$l\eta_m$	1,74	1,48	1,28	1,12	1	0,82	0,70	0,56	0,48

Определение $l\eta_0 = f(s)$ и $l\eta_m = f(s)$ по формулам (2.14) и (2.17) можно производить посредством интерполяции по табл. 2.3.

Таким образом, сформулированные критерии подвижности и жесткости бетонной смеси учитывают особенности цементного теста (нормальную густоту, верхний предел тиксотропии, водоцементное отношение), характеристики заполнителей (пустотность, удельную поверхность, водопоглощение), факторы состава бетонной смеси (в том числе и наличие вовлеченного воздуха), а также интенсивность уплотнения. Критерии не учитывают в полной мере влияние максимальной крупности заполнителя и особенно формы его зерен. Влияние этих факторов сказывается на коэффициентах критериальных уравнений.

Для установления зависимостей $OK=f(L_{OK})$ и $Ж=f(L_{Ж})$ статистически обработаны экспериментальные данные НИСа Гидропроекта (полученные при подборе составов бетона для Загорской ГАЭС) и В. П. Сизова [85]. В этих исследованиях применяли цементы Белгородского и Здолбуновского заводоизготовителей с различными значениями нормальной густоты ($k_{н.г.}=0,25-0,29$). Крупность песков изменяли в пределах $M_{кр.г.}=1\div 3$, а содержание отмучиваемых примесей — от 0 до 10%. В качестве крупного заполнителя использовали речной и дробленый гравий, щебень гранитный, известняковый и базальтовый. Крупность заполнителя изменяли в пределах $D_{max.г.}=5\div 70$ мм. В бетонные смеси вводили пластифицирующие (СДБ и СП) и воздухововлекающие ПАВ (СНВ). Исследовали бетонные смеси обычных тяжелых ($r=0,2-0,45$), малощебечных ($r=0,7-0,85$) и песчаных бетонов, водоцементное отношение изменяли в пределах $B/C=0,3\div 1,0$. Такое многообразие структур и составов бетонных смесей позволило получить критериальные уравнения удобоукладываемости в диапазоне от литых до особо жестких бетонных смесей с оценкой влияния максимальной крупности и формы зерен заполнителя на коэффициенты критериальных уравнений.

Изменение нормальной густоты цемента при введении добавок ПАВ устанавливали экспериментально в зависимости от вида и концентрации добавки для каждого цемента. Как пример приведем экспериментальные данные влияния дозировки добавки СДБ на относительное изменение нормальной густоты $\Delta k_{н.г.}/k_{н.г.}$ для среднеалюминатного портландцемента Здолбуновского цементно-шиферного комбината:

Дозировка добавки СДБ, %	0	0,05	0,1	0,2	0,3
Относительное снижение нормальной густоты, %	0	-8,2	-9,7	-10,8	-11,2

Удельную поверхность заполнителей рассчитывали в зависимости от вида заполнителя и его гранулометрического состава по таблицам А. И. Яшвили [109]. Для получения значения δ в микронах размерность удельной поверхности приводили от $см^2/см^3$ к $мкм^{-1}$, т. е. принимали с переводным коэффициентом 10^{-4} .

Значение удельной поверхности смеси заполнителей не зависит от расположения зерен в пространстве. Его можно определить по формуле (2.20), которую легко найти из условия геометрического подобия (рис. 2.5):

$$u_3 = u_{щ} + (u_{п} - u_{щ})r, \quad (2.20)$$

где $u_{п}$, $u_{щ}$ — удельные поверхности щебня (гравия) и песка; r — доля песка в смеси заполнителей по абсолютному объему, $r = v_{п} / (v_{п} + v_{щ})$.

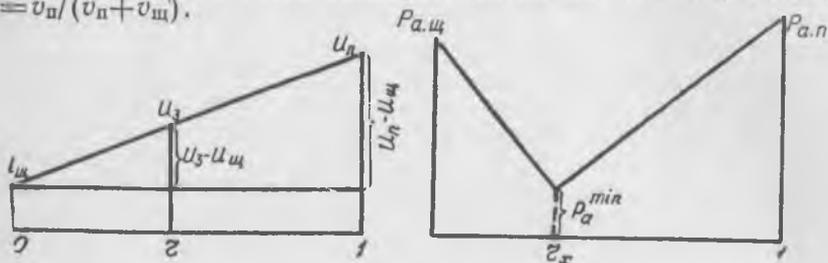


Рис. 2.5. Зависимость удельной поверхности u и пустотности p_a от доли песка в смеси заполнителей r .

Вследствие раздвижки зерен заполнителя в бетонной смеси и в зависимости от степени уплотнения, пустотность смеси заполнителей принимает некоторые промежуточные значения двух ее состояний: рыхло-насыпного и виброуплотненного. Поэтому Ю. Я. Штаерман [108] предложил методику экспериментального определения установившейся в бетоне пустотности заполнителя. Значение пустотности заполнителя в уплотненном состоянии p_a в выражениях критериев $L_{ок}$ и $L_{ж}$ линейно влияет на их изменение (2.4) и (2.15), и, как следствие, на ОК и Ж. Для упрощения пользования структурными критериями удобоукладываемости предлагается определять пустотность заполнителя в виброуплотненном состоянии. При этом значение толщины пленки цементного теста на зернах заполнителя оказывается несколько завышенным, что в конечном счете учитывает угловой коэффициент a линейных критериальных уравнений (2.24) и (2.25).

В литературе пустотность заполнителя в виброуплотненном состоянии изучена еще недостаточно. Принят вывод В. В. Охотина о постоянстве пустотности песка фракции от 2 до 0,1 мм в уплотненном состоянии, подтвержденный исследованиями И. Н. Ахвердова [1] для песков с различной формой зерен, содержащих фракции от 5 до 0,1 мм. Частицы крупностью менее 0,1 мм имеют несколько большую пустотность. Закономерности, установленные для песка, справедливы также для щебня и гравия. Осредненные значения пустотностей заполнителей при виброуплотнении с учетом данных И. Н. Ахвердова [1], приведены в табл. 2.4.

Таблица 2.4. СРЕДНЕЕ ЗНАЧЕНИЕ ПУСТОТНОСТИ ЗАПОЛНИТЕЛЯ ПРИ ВИБРОУПЛОТНЕНИИ

Размер фракции	Пустотность заполнителей				
	песок			щебень	гравий
	морской	речной	горный		
5...0,14 мм, нефракционированный	0,290	0,288	0,328	—	—
	0,408	0,404	0,488	—	—
<0,14 мм	0,395	0,403	0,462	—	—
	0,653	0,675	0,859	—	—
5...70 мм, нефракционированный	—	—	—	0,290	0,320
	—	—	—	0,408	0,471

Примечание. В числителе даны значения пустотности в относительных единицах $p = v_{\text{пуст}} / (v_a + v_{\text{пуст}})$, в знаменателе — пустотность по отношению к абсолютному объему зерен заполнителя $p_a = v_{\text{пуст}} / v_a$, где $v_{\text{пуст}}$ — объем пустот в смеси заполнителей; $p_a = p / (1 - p)$; $p = (1 - \rho_{0,3}) / \rho_3$; $p_a = \rho_3 / \rho_{0,3} - 1$.

Пустотность смеси заполнителей зависит от их соотношения r и для двухфракционной смеси ее можно найти, исходя из некоторых допущений.

При заполнении пустот крупного заполнителя зернами песка ($r < r_x$) пустотность можно рассчитать по формуле (рис. 2.5)

$$p_a v_3 = p_{a,щ} v_{щ} - r v_3 = p_{a,щ} (v_3 - r v_3), \quad (2.21)$$

откуда

$$p_a = p_{a,щ} - p_{a,п} r.$$

При замещении части объема песка зернами щебня ($r \geq r_x$) пустотность находят по формуле

$$p_a v_3 = p_{a,п} v_3 r. \quad (2.22)$$

Учитывая это, $p_{a2} = p_{a,п} r$.

Долю песка в смеси заполнителей, при которой теоретически возможен наименьший объем пустот, определяют из условия $p_{a1} = p_{a2}$:

$$r_x = p_{a,щ} / (1 + p_{a,п} + p_{a,щ}). \quad (2.23)$$

В формулах (2.21) и (2.22) $p_{a,п}$ и $p_{a,щ}$ соответственно пустотность песка и щебня (гравия) по абсолютному объему.

Определение осадки конуса и жесткости бетонных смесей производили согласно ГОСТ 10181—62. В результате статистической обработки получены уравнения:

для подвижности

$$OK = a_0 L_{OK} + b_0, \quad (2.24)$$

для жесткости

$$Ж = 100 a_m / L_{ж} + b_m. \quad (2.25)$$

Приведем значения коэффициентов a_0 , a_m в зависимости от максимальной крупности заполнителя:

Значение коэффициента	$D_{\max}=5$	$D_{\max}=10$	$D_{\max}=20$	$D_{\max}=40$	$D_{\max}=70$
a_0	1,21	1,35	1,55	1,88	2,06
a_m	45	37,8	30	24,5	20

Значения коэффициентов b_0 , b_m в зависимости от вида заполнителя приведем ниже:

Значение коэффициента	Щебень гранитный	Щебень известняковый	Щебень базальтовый	Гравий речной	Песок без крупного заполнителя
b_0	-11,8	-13,5	-15,2	-10,1	-12,0
b_m	-53	-43	-40	-68	-51

Анализ зависимостей коэффициентов критериальных уравнений (2.24), (2.25) от влияющих на них факторов позволяет предположить, что a_0 является «гравитационным» коэффициентом, он учитывает влияние максимальной массы зерна крупного заполнителя на осадку конуса, a_m — «инерционный» коэффициент, который учитывает влияние максимальной массы зерна крупного заполнителя на жесткость бетонной смеси, а b_0 и b_m — коэффициенты вида и формы зерен крупного заполнителя, т. е. характеристики окатанности, лещадности и т. д.

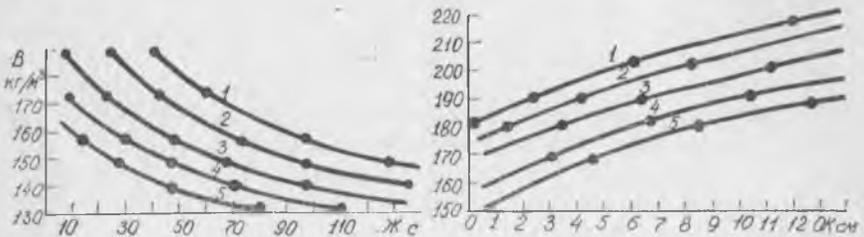


Рис. 2.6. Расчетные зависимости влияния показателей подвижности или жесткости бетонной смеси на водопотребность при различной крупности гранитного щебня:

1 — $D_{\max}=5$ мм; 2 — 10 мм; 3 — 20 мм; 4 — 40 мм; 5 — 70 мм.

На рис. 2.6 показано влияние крупности заполнителя на водопотребность бетонной смеси для гранитного щебня ($b_0 = -11,8$; $b_m = -53$), рассчитанные по формулам (2.24), (2.25) при коэффициентах a_0 и a_m . Для расчета взяты осредненные данные для овражных песков средней крупности, гранитного щебня и портландцемента с нормальной плотностью 27%. Как следует из рис. 2.6, характер зависимости водопотребности бетонной смеси $B = f(OK, Ж, D_{\max})$ соответствует известным экспериментальным данным [4].

Таблица 2.5. РАСЧЕТНЫЕ И ФАКТИЧЕСКИЕ ЗНАЧЕНИЯ УДОБОУКЛАДЫВАЕМОСТИ

Шифр состава	Водо-содержание, л/м ³	В/Ц	Эмуль-гированный воздух, %	Значения критериев		Значения удобоукладываемости			
				L _{ок}	L _ж	фактические		расчетные	
						ОК, см	Ж, с	ОК, см	Ж, с

НИС Гидропроекта

9	218	0,64	5,8	12,6	57,1	7	—	8	—
015	206	0,70	4,0	8,45	41,2	2	8	1	20
012	221	0,77	4,0	11,24	52,1	3	8	6	5
8	216	0,77	5,9	12,29	56,0	8	5	7	—
013	221	0,77	4,0	11,24	52,1	3	8	6	5
014	221	0,77	4,0	11,24	52,1	6	4	6	5
10	217	0,95	6,2	12,9	58,0	12	—	8	—
12	221	0,50	4,3	9,03	—	3	—	2	—
13	221	0,64	4,8	9,29	—	2	—	3	—
05a	201	0,69	4,2	—	41,1	—	18	—	20
056	201	0,69	4,2	—	33,3	—	39	—	37
4	213	0,74	3,9	7,61	31,6	0	40	0	42
18	216	0,79	6,3	8,13	45,5	1	12	1	12
1	205	0,85	3,2	7,8	—	0	—	1	—
3	231	0,95	—	8,71	—	1	—	2	—
2	232	0,99	3,0	7,87	—	0	—	0	—

В. П. Сизов [85]

1	161	0,46	—	7,61	36,6	—	25	—	29
2	175	0,5	—	8,76	49,8	2	15	2	17
3	176	0,88	—	8,82	43,8	2	15	2	16
4	140	0,40	—	—	28,2	—	50	—	54
5	126	0,36	—	—	23,9	—	75	—	73
6	196	0,56	—	11,8	—	6	—	7	—
7	228	0,65	—	17,55	—	15	—	16	—
8	210	0,6	—	13,94	—	10	—	9	—
9	228	0,75	—	16,97	—	15	—	14	—
10	210	1,05	—	14,19	—	10	—	10	—
11	196	0,98	—	11,42	—	6	—	6	—
12	161	0,8	—	7,74	38,5	0	25	0	—

В табл. 2.5 приведены выборочно рассчитанные по формулам (2.24), (2.25) и экспериментальные (НИС Гидропроекта) данные удобоукладываемости бетонных смесей. Отклонения расчетных значений ОК и Ж от фактических, как показывает анализ табл. 2.5, можно считать удовлетворительными. Коэффициент вариации при расчетном определении подвижности и жесткости во всех случаях не превышает 18%.

Расчетные выражения для критериев удобоукладываемости и критериальные уравнения (2.24) и (2.25) позволяют оценить влияние различных технологических факторов. Например, на рис. 2.7 показано влияние крупности заполнителя и добавок ПАВ на связь между ОК и Ж, а на рис. 2.8 — влияние вовлеченного воздуха на снижение водопотребности бетонной смеси.

Определение снижения водопотребности бетонной смеси в зависимости от воздухоудержания возможно, как следует из рис. 2.8, при использовании различных критериев удобоукладываемости. Кроме того, рис. 2.8 позволяет оценить влияние эмульгированного добавками ПАВ воздуха на изменение соотношения между жесткостью и подвижностью бетонной смеси.

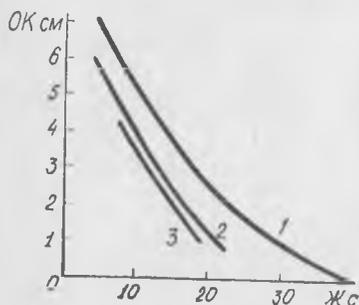


Рис. 2.7. Связь между осадкой конуса и жесткостью для бетонных смесей:

1 — крупнозернистых на гранитном щебне; 2 — то же, с добавкой СНВ; 3 — мелкозернистых с добавкой СНВ.

Простая и удобная для пользования эмпирическая зависимость изменения водопотребности бетонной смеси ΔB за верхним пределом тиксотропии:

$$\Delta B = [C/B - 1 / (1,68 k_{н.г})] (B_0/100)^6 \geq 0, \quad (2.26)$$

где B_0 — водопотребность бетонной смеси требуемой удобоукладываемости в пределах действия правила постоянства

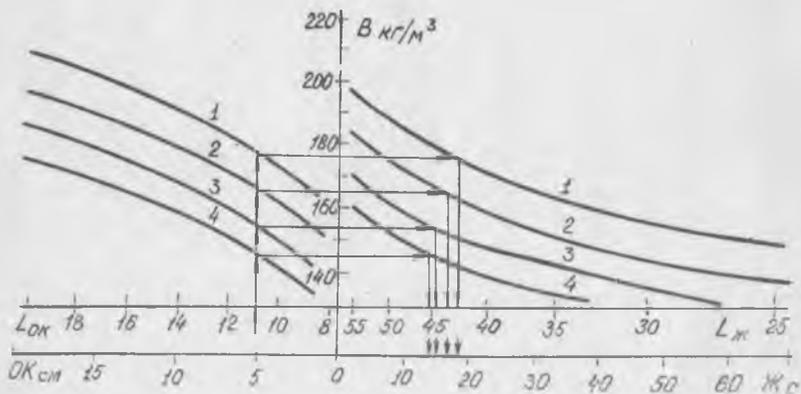


Рис. 2.8. Зависимость водопотребности бетонной смеси от объема вовлеченного воздуха:

1 — $v_{в}=0$; 2 — $v_{в}=2\%$; 3 — $v_{в}=4\%$; 4 — $v_{в}=6\%$.

водопотребности, которую при $(C/B) = (C/B)^{кр}$ находят посредством критериального уравнения либо экспериментальным путем. При этом водопотребность бетонной смеси определяется зависимостью

$$B = B_0 + \Delta B. \quad (2.27)$$

Таблица 2.6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ ДАННЫЕ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ УВЕЛИЧЕНИЯ ВОДОПОТРЕБНОСТИ БЕТОННОЙ СМЕСИ ПРИ $(Ц/В) \cong (Ц/В)_{кр}$, $k_{нт} = 0,27$

Водосодержание, кг/м ³		Значения Ц/В						B_0 , кг/м ³
		$Ц/В < (Ц/В)_{кр}$		$(Ц/В)_{кр}$	$Ц/В > (Ц/В)_{кр}$			
		1,5	2,0	(2,2)	2,5	3,0	3,5	
В	Ж=57 с	150	150	150	154	160	165	150
	ОК=1,3 см	180	180	180	190	129	225	180
	ОК=4,5 см	200	200	200	217	247	279	200
$\Delta B_{эксп}$	Ж=57 с	0	0	0	4	10	15	150
	ОК=1,3 см	0	0	0	10	29	45	180
	ОК=4,5 см	0	0	0	17	47	79	200
$\Delta B_{расч}$	Ж=57 с	0	0	0	3,4	9,1	14,8	150
	ОК=1,3 см	0	0	0	10,2	27,2	44,2	180
	ОК=4,5 см	0	0	0	19,2	51,2	83,2	200

Как следует из табл. 2.6, формула (2.26) хорошо воспроизводит экспериментальные данные.

2.2. Выбор оптимального соотношения заполнителей

Расход цемента для изготовления бетонной смеси с требуемыми значениями удобоукладываемости и $B/Ц$ определяется зерновым составом всего заполнителя, т. е. в конечном счете отношением расходов песка и щебня (гравия). Оптимизация этого отношения является важнейшей задачей проектирования состава бетона как экспериментальными, так и расчетно-экспериментальными методами. Существует ряд расчетных формул для определения доли песка в смеси заполнителей r и расхода щебня [4].

Наибольшее распространение получил способ нахождения оптимального значения r с помощью коэффициента раздвижки $k_{изб}$. Все известные расчетные формулы для определения r и $k_{изб}$ не учитывают влияния консистенции цементного теста и вовлеченного воздуха, изменения этих показателей за пределами правила постоянства водопотребности цементного теста. Попытка учесть некоторые из этих факторов при помощи обработки многих экспериментальных данных и построения рабочих номограмм сделана в работе [85], однако при этом не раскрывается физическая сущность влияния основных характеристик заполнителей и структуры бетона, а также не даются соответствующие аналитические выражения.

Оптимально, очевидно, такое значение r , которое при заданных значениях подвижности (жесткости) и B/C обеспечивает минимальный расход цемента. Выражение оптимального $r = r_{\text{опт}}$ можно найти из условия $dL/dr = 0$ при

$$B/C = (B/C)^{\text{кр}} (s=0; l_{\eta}=1) \quad dN/dr = 0. \quad (2.28)$$

При определении $r_{\text{опт}}$ значение пустотности смеси заполнителей целесообразно принимать в стандартно-рыхлом состоянии (p_a') , так как в этом случае она более чувствительна при изменении фракционного состава заполнителей.

Для нахождения $r_{\text{опт}}$ формулу критерия N преобразуют с учетом выражений (2.20), (2.21) для удельной поверхности и пустотности смеси заполнителей. Оптимальная доля песка в смеси заполнителей находится в компромиссной зоне (где $u \rightarrow u_{\text{min}}$ и $p_a \rightarrow p_{a\text{min}}$), которая расположена в левой ветви кривой (рис. 2.5), т. е. при $r \leq r_x$, и для расчета целесообразно использовать выражение (2.21).

После дифференцирования dN/dr получаем выражение

$$r_{\text{опт}} = u_n / (u_n - u_{\text{ш}}) + 2 \{ p_{a,\text{ш}}' / (p_{a,\text{ш}}' + 1) - v_{\text{ц.т}} / [v_3 (p_{a,\text{ш}}' + 1)] - \chi \}, \quad (2.29)$$

где χ — поправка, учитывающая раздвижку зерен щебня и пустотность песка:

$$\chi = p_{a,\text{п}}^1 r + \Delta p_a^1; \quad \Delta p_a^1 = p_{a2}^1 + p_{a1}^1; \quad \chi = (2p_{a,\text{п}}^1 - p_{a,\text{ш}}^1 + 1)r - p_{a,\text{ш}}^1. \quad (2.30)$$

Окончательное выражение $r_{\text{опт}}$ при $s=0$, т. е. $B/C = (B/C)^{\text{кр}}$ можно найти по формуле

$$r_{\text{опт}}^{s=0} = 1 / (2p_{a,\text{п}}^1 + p_{a,\text{ш}}^1 + 1.5) \cdot \{ u_n / [2(u_n - u_{\text{ш}})] + p_{a,\text{ш}}^1 + p_{a,\text{ш}}^1 / (1 + p_{a,\text{ш}}^1) - v_{\text{ц.т}} / [(1 + p_{a,\text{ш}}^1) v_3] \}. \quad (2.31)$$

Коэффициент раздвижки $k_{\text{изб}}$ для заданной удобоукладываемости определяют как отношение объема цементно-песчаного раствора к объему пустот крупного заполнителя:

$$k_{\text{изб}} = (v_{\text{ц.т}}^{s=0} + r v_3) / [(1 - r) p_{a,\text{ш}}^1 v_3] + \Delta k_{\text{изб}}, \quad (2.32)$$

где $\Delta k_{\text{изб}}$ — поправка при $s < 0$, полученная путем обработки многочисленных экспериментальных данных для высокопрочных бетонов.

$$\Delta k_{\text{изб}} = 0,1 [C/B - 1 / (1,68 k_{\text{п.г}})] \geq 0. \quad (2.33)$$

В пределах действия правила постоянства водопотребности, как показано в опытах В. П. Сизова [85], $k_{\text{изб}}$ для бетона постоянной подвижности или жесткости постоянен. Значение $r_{\text{опт}}$

для заданной удобоукладываемости при изменении объема цементного теста можно найти по формуле, полученной преобразованием (2.31):

$$r_{\text{опт}} = (k_{\text{изб}} v_3 p'_{\text{а.щ}} - v_{\text{ц.т}}) / [(1 + k_{\text{изб}} p'_{\text{а.щ}}) v_3]. \quad (2.34)$$

В табл. 2.7 приведены расчетные и экспериментальные значения $r_{\text{опт}}$ и $k_{\text{изб}}$, которые свидетельствуют о достаточной точности расчетных формул (2.32), (2.34).

Таблица 2.7. РАСЧЕТНЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ [85] ЗНАЧЕНИЯ $r_{\text{опт}}$ И $k_{\text{изб}}$ ($\text{Ц}=350 \text{ кг/м}^3$)

Удобоукладываемость		В/Ц	Экспериментальные		Расчетные	
ОК см	Ж с		$r_{\text{опт}}$	$k_{\text{изб}}$	$r_{\text{опт}}$	$k_{\text{изб}}$
15	—	0,65	0,368	1,5	0,340	1,40
10	—	0,6	0,361	1,42	0,355	1,32
6	—	0,56	0,35	1,32	0,333	1,26
2	15	0,5	0,333	1,20	0,326	1,17
0	25	0,46	0,324	1,12	0,324	1,12
—	50	0,4	0,314	1,03	0,327	1,07
—	75	0,36	0,301	0,96	0,337	1,06

Примечание. Значения удельной поверхности и пустотности: $\mu_{\text{п}} = 175 \cdot 10^2 \text{ м}^{-1}$; $\mu_{\text{щ}} = 10^3 \text{ м}^{-1}$; $\rho_{\text{п}} = 0,42$; $\rho_{\text{щ}} = 0,48$.

Таблица 2.8. РАСЧЕТНЫЕ ОПТИМАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ $k_{\text{изб}}$

Расход цементного теста, л/м ³	Водоцементное отношение								Значение $k_{\text{изб}}$ [1]
	0,35	0,4	0,45	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	
200	1,08	1,07	1,07	1,12	1,15	1,17	1,19	1,21	1,20
250	1,18	1,18	1,19	1,26	1,29	1,33	1,35	1,38	1,32
300	1,29	1,3	1,31	1,41	1,46	1,5	1,54	1,57	1,42
350	1,41	1,43	1,46	1,58	1,65	—	—	—	1,48
400	1,54	1,57	1,61	—	—	—	—	—	1,53

Примечание. Значения $k_{\text{изб}}$ приведены для заполнителей с относительной пустотностью в рыхло-насыпном состоянии $\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{щ}} = 40\%$, удельной поверхностью $\mu_{\text{п}} = 175 \times 10^2 \text{ м}^{-1}$, $\mu_{\text{щ}} = 10^3 \text{ м}^{-1}$ количество эмульгированного воздуха $v_3 = 0$. Увеличение $k_{\text{изб}}$ на каждый процент вовлеченного воздуха равно 0,025. С увеличением (уменьшением) $\rho_{\text{п}}$ на 1% $k_{\text{изб}}$ понижается (возрастает) на 0,014. С увеличением (уменьшением) $\rho_{\text{щ}}$ на 1% $k_{\text{изб}}$ понижается (возрастает) на 0,01. С увеличением (уменьшением) $\mu_{\text{п}}$ на 10^2 м^{-1} значение $k_{\text{изб}}$ понижается (возрастает) на 0,004.

В табл. 2.7 последние два значения В/Ц (0,4 и 0,36) находятся за пределами $(\text{В/Ц})_{\text{кр}} = 1,68 k_{\text{н.г}}$. Представляет интерес, что тенденция к уменьшению расчетных значений $k_{\text{изб}}$ совпадает с экспериментальными данными В. П. Сизова, а для $r_{\text{опт}}$ экспериментально определенные значения справедливы лишь

до значений $(B/C)^{кр}$, т. е. в пределах действия правила постоянства водопотребности.

Расчетные формулы (2.32), (2.34) для определения $k_{изб}$ и $r_{опт}$ позволяют учесть не только объем цементного теста $v_{ц.т.}$, как это было предложено Ю. М. Баженовым [4], но и его консистенцию. В табл. 2.8 приведены расчетные оптимальные значения $k_{изб}$ в зависимости от объема цементного теста, водоцементного отношения, характеристик заполнителя и количества вовлеченного воздуха.

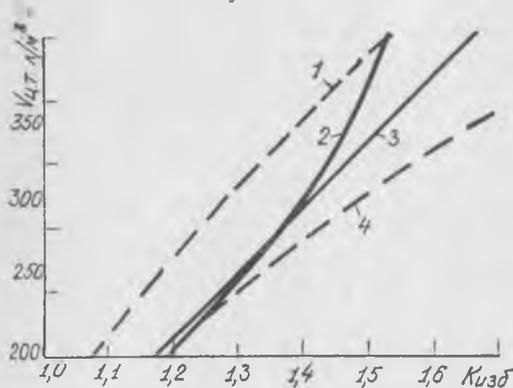


Рис. 2.9. Расчетные и экспериментальные зависимости коэффициента раздвижки крупного заполнителя от объема цементного теста:

1, 4 — расчетные зависимости $k_{изб}$ соответственно для $B/C=0,4$ и $0,7$; 2, 3 — экспериментальные данные [4] соответственно для бетонов на гравии и щебне.

На рис. 2.9 показано, что экспериментальные графики $k_{изб} = f(v_{ц.т.})$ на щебне и гравии, построенные по данным Ю. М. Баженова [4], находятся в основном диапазоне расчетных оптимальных значений $k_{изб}$.

2.3. Прогноз прочности бетона на основе структурно-физических представлений

Одной из центральных проблем технологии бетона является исследование основных технологических закономерностей, определяющих прочность бетона, которое развивается в трех направлениях: 1) уточнение формул, основанных на теории водоцементного (цементно-водного) отношения; 2) построение многофакторных математических моделей прочности в виде уравнений регрессии; 3) установление расчетных выражений для прочности бетона на основе физических закономерностей процессов структурообразования.

Наиболее широко в нашей стране известны формулы Н. М. Беляева и Б. Г. Скрамтаева — Ю. М. Баженова, связывающие прочность бетона с активностью цемента и соответственно водоцементным или цементно-водным отношением. Наряду с этими формулами предложены их многочисленные модификации.

В практике подбора состава бетона чаще всего используют осредненные зависимости прочности бетона от цементно-водного отношения и активности цемента, которые являются результатом коллективной работы, выполненной рядом лабораторий при введении в действие ГОСТ 310-60 [88]. Из формул типа $R_b = f(R_c, C/B)$, предложенных в последние годы, практическое значение имеет формула ВНИИЖелезобетона, полученная на основе обобщения результатов испытаний более 80 партий портландцементов и шлакопортландцементов. Эта формула в некоторой степени учитывает нелинейность функции $R_b = f_1(R_c)$ и более гибко отражает изменчивость функции $R_b = f_2(C/B)$ при $C/B < 2,5$ и $C/B > 2,5$. Однако в ней не отражено влияние на прочность бетона качества заполнителей. Являясь вполне пригодными для практических расчетов, формулы рассмотренного типа не вскрывают физическую сущность основных закономерностей, определяющих прочность бетона. На этот существенный недостаток указывают ряд исследователей [15, 86]. Формулы, вытекающие из закона водоцементного отношения, справедливы лишь при постоянных материалах, способах приготовления и степени уплотнения бетонной смеси, одних и тех же условиях твердения, а также для таких составов бетонной смеси, которые обеспечивают близкие значения подвижности. Они в ряде случаев дают существенные отклонения от фактических значений прочности бетона.

Учесть все факторы, влияющие на прочность бетона, и создать идеально точную расчетную формулу, разумеется, невозможно. Но вряд ли можно согласиться с тем, что создание более развернутых, чем следует из закона В/Ц, математических зависимостей для прочности бетона ведет лишь к усложнению расчетных формул без должного эффекта. Во-первых, в ряде случаев представляет интерес рассматривать зависимость прочности бетона, когда нарушаются «прочие равные условия», при которых справедлив закон водоцементного отношения. Во-вторых, математические зависимости прочности бетона от технологических и структурных факторов являются не только расчетными формулами, но и моделями, количественно и качественно раскрывающими характер влияния отдельных факторов при данных ограничениях. Очевидно, чем полнее модель, тем она более совершенна, хотя при этом неизбежны определенные допущения и ограничения в зависимости от постановки технологической задачи.

Структурные математические модели прочности бетона можно разделить на три группы.

К первой относятся теоретически полученные формулы типа $R = f(P_c, C/B)$, где ΣP_c — комплекс параметров, учитывающих влияние структурных факторов. Примерами моделей первой группы являются формулы И. Н. Ахвердова [1], И. М. Грушко [17], О. П. Мчедлова-Петросяна [72], И. А. Рыбьева [79].

Каждая из этих формул основана на оригинальных теоретических предположениях. Так, И. Н. Ахвердов в качестве рабочей гипотезы принял предположение о том, что пространственное взаиморасположение центров кристаллизации (цементных ядер) определяется количеством воды, содержащейся в цементном тесте в начале его схватывания. И. М. Грушко основные зависимости для прочности бетона получены при выделении в бетоне двухкомпонентных макро-, мезо- и микроструктур. О. П. Мчедлов-Петросян теоретический анализ выполнил, исходя из представлений зависимости прочности бетона от значения когезии цементного камня, заполнителя и их взаимной адгезии. И. А. Рыбьев расчетную формулу прочности бетона определил как следствие сформулированного им закона прочности оптимальных структур.

Различные физические аспекты формирования прочности, положенные в основу рассмотренных выше зависимостей, предопределили их наиболее рациональную область применения. Например, формулы И. А. Ахвердова можно использовать прежде всего для расчета высокопрочных бетонов, формулы О. П. Мчедлова-Петросяна позволяют учесть факторы, определяемые временем твердения и, в частности, усадочные явления и температурный режим твердения.

К структурным моделям прочности бетона второй группы относятся эмпирические уравнения полиномиального типа, включающие в качестве факторов структурные характеристики. Уравнения получают статистической обработкой результатов традиционных или алгоритмизированных экспериментов [87]. Наиболее удачными моделями этой группы являются полиномиальные формулы [5]:

$$R_b = f[(B/C)_и, v_{ц,к}, R_{ц}, R_{отн}],$$

где R_b — предел прочности бетона при сжатии; $(B/C)_и$ — водоцементное отношение в конце периода формирования структуры, или так называемое истинное B/C ; $v_{ц,к}$ — объемная концентрация цементного камня в бетоне; $R_{отн}$ — относительная марка заполнителя.

Наиболее многочисленной является третья группа — структурные модели, основанные в той или иной мере на зависимости между прочностью бетона и плотностью цементного камня. Фере [97] предложил первый структурный критерий $v_{ц}/(v_{ц}+B+v_{в})$, связанный с прочностью бетона R_b квадратной функцией $R_b = k[v_{ц}/(v_{ц}+B+v_{в})]^2$, где $v_{ц}$, B и $v_{в}$ — абсолютные объемы цемента, воды и воздуха; k — коэффициент, зависящий от качества цемента, продолжительности и режима твердения. Критерий Фере не учитывал изменения структуры цементного камня по мере гидратации, что позволило Пауэрсу в дальнейшем его видоизменить и представить как концентрацию твердых продуктов гидратации цемента в пространстве, доступ-

ном для этих веществ, т. е. отношением объема геля к суммарному объему геля и пустот [110]:

$$X = \frac{k_r V_{II} \alpha}{\alpha V_{II} + B/\Pi} \approx \frac{0,647 \alpha}{0,319 \alpha + B/\Pi}, \quad (2.35)$$

где $k_r = 2,09 - 2,2$ — коэффициент увеличения объема продуктов гидратации; Π — масса цемента; V_{II} — удельный объем цемента ($V_{II} = 1/\rho_{II} = 0,319$ см³/г), величина, обратная плотности цемента ρ_{II} ; B — объем воды затворения; α — часть цемента, прошедшая гидратацию.

Прочность при сжатии образцов цементного камня $R_{II,K}$ различного возраста и B/Π , твердевших в нормальных температурных условиях, соответствует [110] эмпирическому уравнению

$$R_{II,K} = AX^n, \quad (2.36)$$

где A — константа, характеризующая прочность цементного геля ($A \approx 240$ МПа); n — константа, характеризующая особенности цемента ($n = 2,6 - 3$).

Близкие к критерию Пауэрса критерии прочности цементного камня были затем предложены как за рубежом [111—115], так и в нашей стране [15, 101]. Так, Джулинский [111] предложил рассматривать прочность как функцию критерия v :

$$v = v_{г.д} / (v_{г.д} + B_{исп} + v_B), \quad (2.37)$$

где $v_{г.д}$ — объем гидратированного цемента в единице объема образца; $B_{исп}$ — объем испаряющейся воды; v_B — заполненные воздухом пустоты.

Он установил на основе экспериментальных данных, что $R_{II,K} = R_0^{kv}$, R_0 и k — эмпирические константы.

Вишерс [112] предложил для прочности цементного камня зависимость

$$R_{II,K} = 3100 v_T^{2,7}, \quad (2.38)$$

где v_T — абсолютный объем твердого материала, состоящий из продуктов гидратации цемента и не до конца гидратированных зерен цемента в единичном объеме образца затвердевшего цемента.

По данным Поповича [113], в определенных пределах прочность на сжатие $R_{II,K}$ и изгиб $R_{II,K}^{изг}$ может быть выражена в виде следующих зависимостей:

$$R_{II,K}^{изг} = k_c v_{г.д}^{2,2}, \quad R_{II,K} = k_H v_{г.д}^{1,5}, \quad (2.39)$$

где $v_{г.д}$ — общее количество продуктов гидратации на 1 г цемента; k_c , k_H — параметры, зависящие от применяемых способов хранения и испытания, B/Π и других факторов.

Рой и Гоуда установили [114], что зависимость прочности цементного камня от пористости может быть описана уравнением

$$R_{ц.к} = R_0 \exp(-bp), \quad (2.40)$$

где R_0 и b константы; p — пористость, %.

А. Е. Шейкин [101] связал прочность цементного камня с его относительной плотностью

$$d_{отн} = \rho_{о.ц.к}/\rho_{ц.к} = (1 + 0,23 \alpha \rho_{ц}) / (1 + \rho_{ц} B/L); R_{ц.к} = 3100 d_{отн}^{2,7}, \quad (2.41)$$

где $\rho_{о.ц.к}$ — объемная масса цементного камня в сухом состоянии; $\rho_{ц.к}$ — плотность.

Зависимость Фере является и сейчас основополагающей при создании и совершенствовании расчетных формул прочности бетона. Близкая к формуле Фере формула связи между прочностью бетона R_b и плотностью цементного камня d , предложена в работе [15]:

$$d = [(1 - \alpha) + \alpha k_r] \varphi_{ц}; \quad \varphi_{ц} = v_{ц}/(v_{ц} + B), \quad (2.42)$$

где $\varphi_{ц} = v_{ц}/(v_{ц} + B)$ — объемная концентрация цемента в цементном камне.

После проведения необходимых преобразований получаем зависимость

$$R_b = k R_{ц} (\varphi_{ц} - \varphi_0), \quad (2.43)$$

где k и φ_0 — некоторые условные параметры; $R_{ц}$ — активность цемента.

Как видно, формула (2.43) отличается от формулы Фере тем, что учитывается зависимость R_b от $R_{ц}$ и линейно влияет на R_b объемная концентрация цемента в цементном камне. Учет $R_{ц}$ в формуле Фере предложен М. З. Симоновым [86]. Как справедливо отметил В. Г. Довжик [51], можно считать спорным утверждение о линейном влиянии плотности $\varphi_{ц}$ на прочность бетона. Кроме того, водоцементное отношение бетона не является водоцементным отношением цементного камня в бетоне и фактические значения α не определены. Нелинейность функции $R_b = f(R_{ц})$ в формуле (2.43) установлена искусственно введением коэффициентов. При этом не раскрывается физический смысл закономерности.

Известные структурные формулы прочности бетона данной группы не учитывают особенности заполнителей, их роль в формировании структуры, поэтому область их практического применения ограничена.

Задача нашего исследования — установление интегрального структурного критерия и критериальных уравнений прочности бетона, учитывающих качество цементного камня в бетоне, роль заполнителей и значения пористости.

Ряд отечественных и зарубежных ученых [1, 5, 73] предложили дифференцировать воду в бетонной смеси между цементным тестом и заполнителем.

Как показали Ю. М. Баженов, Г. И. Горчаков, Л. А. Алимов и В. В. Воронин [5], при изменении качественных характеристик заполнителя прочность бетона может быть однозначно связана с «истинным» водоцементным отношением цементного теста в бетоне. Этот параметр выражает такое значение B/C , при котором бетонная смесь имеет ту же подвижность и сроки схватывания, что и цементное тесто

$$(B/C)_{\text{и}} = (B - B_{\text{п}} - B_{\text{щ}}) / C, \quad (2.44)$$

где B , C , P и $Ш$ — расходы воды, цемента, песка и щебня; $B_{\text{п}}$ и $B_{\text{щ}}$ — водопотребность песка и щебня, найденные по специальной методике [4].

Понятие истинного водоцементного отношения близко к понятию эффективного B/C , предложенного зарубежными исследователями [73]. При этом под эффективной водой так же, как и под истинной, понимается вода, которая занимает пространство за пределами зерен заполнителя, когда общий объем бетона стабилизировался, т. е. примерно в период схватывания. На связь прочности бетона с водоцементным отношением цементного камня $(B/C)_{\text{ц.к}}$ указывалось также в работах И. Н. Ахвердова [1]. Различие между $(B/C)_{\text{ц.к}}$ и $(B/C)_{\text{и}}$ обусловлено методиками определения водопотребности заполнителей.

Представления о влиянии истинного водоцементного отношения позволили в работе [4] предложить структурный критерий прочности бетона в виде отношения объема цементного камня в бетоне $v_{\text{ц.к}}$ при заданном значении $(B/C)_{\text{и}}$ к суммарному объему пор бетона $v_{\text{пор}}$:

$$L = v_{\text{ц.к}} / v_{\text{пор.з}} = \frac{C / \rho_{\text{ц}} + (B/C)_{\text{и}} C}{B - 0,21 \alpha C + v_{\text{пор.з}} + v_{\text{в}}}, \quad (2.45)$$

где $B - 0,21 \alpha C$ — общая пористость цементного камня в бетоне; $v_{\text{пор.з}}$, $v_{\text{п}}$ — соответственно пористость заполнителя и пористость, образованная вовлеченным воздухом.

Предполагалось, что изменение структуры цементного камня будет учитываться изменением пористости в зависимости от степени гидратации α . Однако нетрудно показать, что изменение α в допустимых пределах ведет к незначительному изменению L и соответственно прочности бетона. Кроме того, критерий L не стремится к нулю даже при ничтожно малых значениях α , т. е. может изменяться в широкой области для бетона, еще не имеющего механической прочности. Из этого следует, что он может быть удовлетворительным при $(B/C)_{\text{и}} = \text{const}$ лишь для бетона определенного возраста. Нахождение

$(B/C)_н$ при помощи зависимости (2.44) справедливо только для бетонов с консистенцией цементного теста, соответствующей его нормальной густоте, что следует из методики работы [4]. Можно предположить, что водопотребность заполнителей будет зависеть от водосодержания бетонной смеси, иначе при больших значениях $B_п$ и $B_щ$ по формуле (2.44) можно получить $(B/C)_н < 0$. Для проверки этого предположения поставлен эксперимент по определению водопотребности заполнителей на цементном тесте различной консистенции — (0,85; 0,9; 1,0;

Таблица 2.9. ВОДОПОТРЕБНОСТЬ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ КОНСИСТЕНЦИИ ЦЕМЕНТНОГО ТЕСТА

Консистенция цементного теста		Водоцементное отношение, B/C		Водопотребность заполнителей по массе, %			$(\frac{B_з}{B_з^{н.г}})_{100\%}$
% НГ	$(B/C)_н$	раствора 1:2	бетона 1:2,3,5	песка $B_п$	щебня $B_щ$	общая $B_з$	
85	0,24	0,39	0,528	7,51	3,95	5,24	84,8
90	0,254	0,413	0,559	7,96	4,19	5,56	90,1
100	0,282	0,469	0,621	8,84	4,65	6,17	100
110	0,310	0,504	0,683	9,72	5,12	6,79	110,1
115	0,324	0,528	0,715	10,2	5,35	7,11	115,3

Примечание. $B_з^{н.г}$ — водопотребность заполнителей при нормальной густоте цементного теста.

1,1; 1,15) НГ (табл. 2.9), где НГ — нормальная густота цементного теста, %.

Как следует из табл. 2.9, изменение водопотребности заполнителя в бетоне прямо пропорционально изменению консистенции цементного теста в бетонной смеси по отношению к значению нормальной густоты.

Последнее положение можно сформулировать следующим образом: отношение количества истинной воды (воды цементного камня) в бетонной смеси заданной удобоукладываемости к количеству воды, иммобилизованной заполнителями, пропорционально их отношению в бетонной смеси с удобоукладываемостью, при которой цементное тесто имеет консистенцию нормальной густоты и те же сроки схватывания. Исходя из вышесказанного, можно записать

$$\frac{(B/C)_н}{B_{им.м}} = \frac{НГ}{B_{им.м}^{н.г}} \quad (2.46)$$

где $B_{им.м} = B - (B/C)_н C$; $B_{им.м}^{н.г} = v_3 B_з \rho_3 = w_3 \rho_3$;

$B_з$ — водопотребность заполнителя по массе, определяемая по методике работы [4]; ρ_3 — плотность заполнителя; $w_3 = B_з \rho_3$ — водопотребность заполнителя по абсолютному объему.

Произведя элементарные математические преобразования, имеем

$$(B/C)_ц = \frac{B/C}{1 + (\omega_3 v_3)/(HG \cdot C)}. \quad (2.47)$$

Выразив ω_3 через B_{II} и B_{III} , запишем

$$(B/C)_ц = \frac{B/C}{1 + (B_{II}P + B_{III}C)/(HG \cdot C)}, \quad (2.48)$$

где B/C — водоцементное отношение бетона; HG — нормальная плотность цемента, %.

Например, $B/C=0,65$; $B_{II}=10\%$; $B_{III}=4\%$; $HG=27\%$; $C=298$ кг/м³; $P=503$ кг/м³; $C=1260$ кг/м³. Подставляя эти данные в формулу (2.48), получаем $(B/C)_{II}=0,29$.

Основываясь на изложенных теоретических представлениях, можно принять рабочую гипотезу для формулирования структурного критерия: прочность бетона прямо пропорциональна объему продуктов гидратации в цементном камне определенной качества и обратно пропорциональна общему объему пор бетона [22]

$$L_R = k_{ц,к} v_{г,ц} / v_{пор}, \quad (2.49)$$

где L_R — структурный критерий прочности бетона; $v_{г,ц}$ — объем гидратированного цемента; $v_{пор}$ — объем пор в бетоне; $k_{ц,к}$ — коэффициент качества цементного камня.

Объем гидратированного цемента в единице объема бетона можно найти по формуле

$$v_{г,ц} = k_r \alpha_x V_{ц} C, \quad (2.50)$$

где k_r — коэффициент увеличения объема продуктов гидратации ($k_r=2,09-2,2$); α_x — степень гидратации цемента в бетонной смеси при данном $(B/C)_{II}$; $V_{ц}$ — удельный объем цемента ($V_{ц}=0,319$ дм³/кг). Таким образом,

$$v_{г,ц} = 0,647 \alpha_x C. \quad (2.51)$$

Качество цементного камня в бетоне, очевидно, прежде всего зависит от его общей пористости

$$p_{ц,к} = (B/C)_{II} - 0,21 \alpha_x. \quad (2.52)$$

Тогда можно принять

$$k_{ц,к} = \frac{1}{(B/C)_{II} - 0,21 \alpha_x}. \quad (2.53)$$

Отношение объема продуктов гидратации цемента в цементном камне к его пористости характеризует, по существу, несущую способность цементного камня в бетоне, на которой

сказываются особенности цемента (через степень гидратации α_x), его расход в бетоне, нормальная плотность цемента, водоцементное отношение бетонной смеси и водопотребность заполнителей (через значение $(B/C)_и$).

Общий объем пор в бетоне можно найти из выражения

$$v_{пор} = B - 0,21 \alpha_x C + \Sigma v_{п.д}, \quad (2.54)$$

где $\Sigma v_{п.д}$ — суммарный объем дополнительных пор в бетоне, образованный вовлеченным воздухом $v_{в}$, нехваткой цементного теста при контактной структуре $v_{п.ост}$ и т. п.; $v_{п.ост} = 1000 - B - C/\rho_c - v_3 - v_b$ — объем остаточных пор бетона. Он характерен для контактной структуры, встречающейся в малоцементном бетоне. Абсолютный объем заполнителя v_3 можно ориентировочно найти из условия

$$v_3 + p_a v_3 + u_3 \delta_{мин} v_3 \leq 1000, \quad (2.55)$$

где p_a — пустотность заполнителя в уплотненном состоянии; u_3 — удельная поверхность, m^2/m^3 ; $\delta_{мин} \approx 13 \cdot 10^{-6} m$ — условно необходимая для оклеивания зерен заполнителя минимальная толщина пленки цементного теста [1].

Таким образом, окончательно выражение структурного критерия прочности бетона можно записать в следующем виде:

$$L_R = k_{ц.к} v_{г.ц} / v_{пор} = \frac{0,647 \alpha_x C}{[(B/C)_{ц} - 0,21 \alpha_x] (B - 0,21 \alpha_x C + \Sigma v_{п.д})}. \quad (2.56)$$

При расчете критерия необходимо наряду с данными для определения $(B/C)_и$ иметь значение α_x .

Для установления соответствия величин степени гидратации цементного камня в бетоне (растворе) и чистого цементного камня при $(B/C)_и = (B/C)_{ц.к}$ выполнены специальные опыты.

Определение степени гидратации чистого цементного камня и цементного камня в цементно-песчаном растворе 1:3 производили по методике определения количества связанной воды при $(B/C)_и = (B/C)_{ц.к} = 0,3$ на портландцементе Здолбуновского ЦШК М500. Применяли кварцевый песок $B_{п} = 4\%$. Расходы цемента и песка: $C = 500$ г; $P = 1500$ г. При этом водоцементное отношение в растворе из формулы (2.48) находили как

$$B/C = (B/C)_{и} [1 + (B_{п} P) / (H \Gamma \cdot C)] = 0,44. \quad (2.57)$$

Обезвоживание производили безводным этиловым спиртом, образцы-кубики (2×2 см) цементного камня и раствора измельчали до прохода через сито 008, прокаливание осуществляли при температуре $1000^\circ C$ до постоянной массы. Плотность цемента $\rho_c = 3100$ kg/m^3 , песка — $\rho_{п} = 2650$ kg/m^3 . Определив количество химически связанной воды и зная состав цементно-песчаного раствора, легко рассчитать степень гидратации. Ко-

личество связанной воды при полной гидратации принято для данного цемента $w=28,2\%$. Значения степени гидратации оказались близки: для чистого цементного камня в 28 сут $\alpha=0,58$; для раствора $\alpha=0,57$. Следовательно, при $(B/C)_н = (B/C)_{ц,к}$ степень гидратации с точностью до 1,5% можно считать одинаковой.

Таблица 2.10. ИЗМЕНЕНИЕ СТЕПЕНИ ГИДРАТАЦИИ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА ВО ВРЕМЕНИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ВОДОЦЕМЕНТНОГО ОТНОШЕНИЯ

B/C	Значения степени гидратации цемента α через τ сут.					Отношение α ($B/C < 0,5$) к α ($B/C = 0,5$) при τ сут.				
	3	7	28	90	180	3	7	28	90	180
0,5	0,45	0,55	0,63	0,75	0,85	—	—	—	—	—
0,35	0,43	0,516	0,583	0,625	0,646	0,955	0,94	0,925	0,875	0,76
0,30	0,42	0,505	0,567	0,585	0,578	0,94	0,92	0,90	0,78	0,68

В основном диапазоне составов бетонов значение $(B/C)_н < 0,5$. Максимальную степень гидратации при $(B/C)_{ц,к} < 0,5$ можно считать [16]:

$$\alpha_{\max} = 2(B/C)_{ц,к} = 2(B/C)_н. \quad (2.58)$$

Обозначим α в отличие от α_x как степень гидратации цементного камня при B/C равном 0,5, т. е. когда возможна полная гидратация ($\alpha_{\max} = 1$).

Специально поставленные опыты по нахождению степени гидратации нормального среднеалюминатного портландцемента Здолбуновского цементно-шиферного комбината при различных B/C (методом определения химически связанной воды) показали (табл. 2.10), что в общем виде зависимость $\alpha_x = f(\alpha)$ можно представить выражением

$$\alpha_x = 2m(B/C)_н\alpha + (1-m)\alpha, \quad (2.59)$$

где m — константа, зависящая от возраста бетона, минералогии цемента и других факторов.

Для исследованного портландцемента константа m равна при продолжительности гидратации (τ): 3 сут. — 0,15; 7 сут. — 0,2; 28 сут. — 0,25; 90 сут. — 0,55; 180 сут. — 0,8. При $\tau \rightarrow \infty$ $m = 1$.

Анализ формулы и данных табл. 2.10 показывает, что при продолжительности нормального твердения до 28 сут. отношение $\alpha(B/C < 0,5)$ к $\alpha(B/C = 0,5)$ близко к единице. По мере увеличения длительности твердения оно закономерно уменьшается.

При выражении α_x через α для упрощения формулы критерия значение константы m можно принять равной единице.

В этом случае выражение (2.59) существенно упрощается:

$$L_R = 1,29 \alpha C / [(1 - 0,42 \alpha)(B - 0,42 \alpha B_n + \Sigma v_{п.д})], \quad (2.60)$$

где $B_n = (B/C)_н C$.

Для удобства пользования критерием L_R в формуле (2.60) α удобно выражать через стандартную величину. Наши исследования показали [20], что прочность цемента $R_{ц}$, определяемая по ГОСТ 310—76, связана со степенью гидратации α эмпирической зависимостью степенного вида

$$R_{ц} = \alpha^n R_{ц0}, \quad (2.61)$$

где $R_{ц0}$ и n — константы для данного вида цемента, причем $R_{ц0}$ можно интерпретировать как некоторую условную прочность цемента при полной гидратации ($\alpha=1$).

Таблица 2.11. ПРОЧНОСТЬ ЦЕМЕНТА $R_{ц}$ ПРИ СЖАТИИ ПО ГОСТ 310—76 И СТЕПЕНЬ ГИДРАТАЦИИ α ПРИ В/Ц=0,5 В РАЗЛИЧНЫЕ СРОКИ ТВЕРДЕНИЯ

Марка цемента	Добавка СДБ от массы цемента	Параметр	Сроки твердения τ , сут.					
			3	7	28	90	180	365
М 400	—	$R_{ц}$ МПа	13,4	22,7	42,2	64,5	67,8	70,4
		α_a	0,29	0,36	0,52	0,63	0,66	0,65
		α_p	0,285	0,371	0,506	0,625	0,641	0,653
М 500	—	$R_{ц}$ МПа	17,6	33,4	50,5	64,0	68,2	69,9
		α_a	0,30	0,43	0,57	0,63	0,64	0,65
		α_p	0,327	0,450	0,553	0,623	0,643	0,651
М 500	СДБ, 0,2%	$R_{ц}$ МПа	13,8	26,7	46,2	64,2	68,6	—
		α_a	0,29	0,41	0,54	0,62	0,66	—
		α_p	0,289	0,402	0,529	0,624	0,645	—

Для определения $R_{ц0}$ и n мы поставили опыты на портландцементе Здолбуновского цементно-шиферного комбината, который можно отнести [57] к нормальным ($C_3S=58\%$) среднеалюминатным ($C_3A=7\div 8\%$) цементам марок 400 (удельная поверхность $2800 \text{ см}^2/\text{г}$) и 500 (удельная поверхность $3200 \text{ см}^2/\text{г}$). Опыты проводили без и с введением пластифицирующей добавки СДБ (табл. 2.11).

Значение $R_{ц0}$, найденное графической экстраполяцией, равно 165 МПа, $n=2$. Расчетное значение степени гидратации можно определить по формуле (2.61):

$$\alpha = \sqrt{R_{ц}/165}. \quad (2.62)$$

Общность зависимости (2.62) проверена по известным литературным данным. В табл. 2.12 приведены данные С. Д. Окоркова и А. В. Волженского [11, 14] по изменению $R_{ц}$ и степени гидратации портландцемента во времени и произведено их сопоставление по формуле (2.62).

Как видно из табл. 2.12, погрешность при использовании формулы (2.62) невелика, тем более, если учесть, что экспериментально $R_{ц}$ и α определяли на разных цементах, общим у которых было только повышенное содержание фазы алита.

Для широкого практического применения структурного критерия, очевидно, необходимо уточнение $R_{до}$ и n для различных видов цемента. Степень гидратации цемента рядового химико-минералогического состава предлагается также рассчитывать с помощью эмпирического уравнения [10]

$$\alpha = k \lg \tau - B, \quad (2.63)$$

Таблица 2.12. СОПОСТАВЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ СТЕПЕНИ ГИДРАТАЦИИ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА

Технические характеристики	Сроки твердения τ , сут			
	3	7	28	90
Предел прочности при сжатии, $R_{ц}$ МПа	13,8	23,8	34,6	38,3
Экспериментальные значения α (э)	0,31	0,35	0,43	0,51
Расчетное значение α_p	0,289	0,380	0,457	0,482
Относительная ошибка $\frac{\alpha_p - \alpha_n}{\alpha_n} \cdot 100\%$	6,7	-8,9	6,3	-5,5

где k — константа скорости реакции; B — константа, отражающая продолжительность индукционного периода гидратации. С учетом влияния температурных условий твердения

$$\alpha = (0,93 T - 251) \lg \tau - 25,7 / T^{10,6}, \quad (2.64)$$

где T — абсолютная температура, К.

Например, при 28-суточном твердении цемента и температуре 20°C ($T = 293^\circ \text{K}$) степень гидратации, рассчитанная по формуле (2.64), составляет $\alpha = 0,311$.

По данным табл. 2.11, 2.12 степень гидратации портландцемента находится в пределах 0,43—0,55, что лучше соответствует известным данным [11, 14].

Для технологической интерпретации критерия L_R преобразуем формулу (2.60) с учетом выражения (2.62):

$$L_R = \frac{1,294 U \sqrt{R_{ц}/165}}{(1 - 0,42 \sqrt{R_{ц}/165})(B - 0,42 B_n \sqrt{R_{ц}/165} + \Sigma v_{п.л})}. \quad (2.65)$$

Из графиков следует (рис. 2.10, 2.11), что структурный критерий прочности бетона L_R верно отражает известные закономерности, выявленные экспериментальным путем.

Как известно, прочность материала связана с пористостью степенной зависимостью. Для бетона еще Фере предложил свя-

зывать прочность квадратичной зависимостью. В формуле (2.60) в знаменателе стоит произведение пористости цементного камня на объем пор бетона. Это дает основание полагать, что связь близка к линейной.

Для установления зависимости $R_6 = f(L_R)$ статистически обработаны результаты испытаний составов обычных, малощебеночных и песчаных бетонов, выполненных в НИСе Гидропроекта, для Загорской ГАЭС. Испытанные в 28-, 90- и 180-суточном возрасте бетоны изготавливали, используя порт-

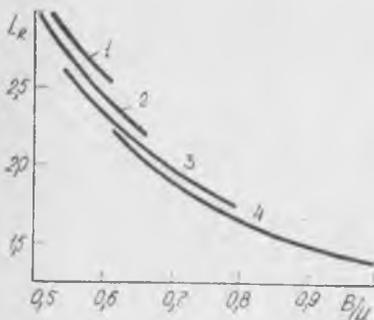


Рис. 2.10. Зависимость критерия L_R от водоцементного отношения и объемной концентрации цементного камня:

1 — $v_{ц.к}=0,4$; 2 — $v_{ц.к}=0,3$; 3 — $v_{ц.к}=0,2$; 4 — $v_{ц.к}=0,15$.

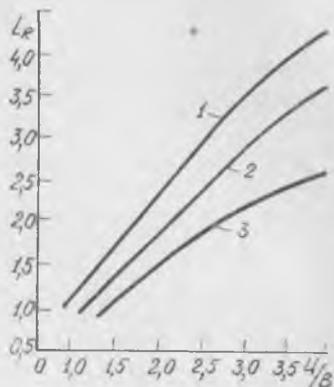


Рис. 2.11. Изменение критерия L_R в зависимости от цементно-водного отношения и марки цемента:

1-3 — марки цемента соответственно 600, 400 и 300.

ландцемента Белгородского завода марок 400 и 500 с химико-минералогическим составом: $C_3S=65\%$, $C_2S=13$, $C_3A=6$, $C_4AF=13\%$ и заполнители пяти карьеров, различающихся зерновым и химико-минералогическим составом. Крупный заполнитель представлен гравием и щебнем, а также смесями. Содержание в смеси заполнителей фракции более 5 мм изменяли в диапазоне от 0 до 65%. В бетонные смеси вводили минеральную пыль и поверхностно-активные добавки СП, СДБ, СНВ, а также их сочетания. Таким образом, испытанные бетоны отличало большое многообразие особенностей состава и структуры. Всего обработано 224 результата испытаний прочности бетона на сжатие шестидесяти составов в разном возрасте. В объем выборки вошли результаты испытаний кубов с длиной ребра 7,07; 10; 15 см и половинок балочек $4 \times 4 \times 16$ см, приведенные к прочности кубов $20 \times 20 \times 20$ см. Значение выборочного коэффициента корреляции между пределом прочности при сжатии и критерием равно 0,98, что значительно больше критического, равного 0,254 при 1%-ном уровне значимости. Это дает основание считать зависимость $R_6 = f(L_R)$ линейной и близкой к функ-

циональной. В общем виде она выражается уравнением $R_6 = aL_R + b$. После расчета коэффициентов методом наименьших квадратов найдено уравнение регрессии:

$$R_6 = 19 L_R - 5,4, \quad 0,5 \leq L_R \leq 3,5. \quad (2.66)$$

Уравнение (2.66) можно принять как расчетную формулу прочности тяжелых бетонов на среднеалюминатных цементах и заполнителях с достаточно высокими механическими характеристиками.

Таблица 2.13. РАСЧЕТНЫЕ И ЭМПИРИЧЕСКИЕ ЗНАЧЕНИЯ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА

Шифр составов	Возраст, сут.	Состав бетона на 1 м ³ с учетом воздухосодержания						Значение критерия L_R	Расчетный предел прочности при сжатии, МПа	Фактический предел прочности при сжатии, МПа
		добавки СП, СДБ, СНВ в % от массы цемента	марка цемента	расход воды, кг/м ³	расход заполнителя, кг/м ³	расход цемента, кг/м ³	объем воздуха, дм ³ /м			
12	28	0,25;0;0	500	221	1576	442	43	2,35	39	39,8
13	28	"	"	221	1652	346	48	1,79	28,6	22,9
19	180	0,25;0,1;0,01	"	203	1620	203	123	1,043	13,8	12
10	28	0,4;0,15;0,015	"	217	1714	227	58	1,13	15,8	16,7
3	28	0,25;0;0	400	231	1815	242	0	1,16	16,5	17,7
3	180	"	"	"	"	"	"	1,47	22,4	23
2	28	"	"	232	1746	233	30	0,98	12,5	14,3
2	180	"	"	"	"	"	"	1,24	18	19,9
101	28	"	500	168	1921	302	19	2,22	37	45,1
23	28	"	"	214	1745	268	29	1,52	23,4	21,7
23	180	0,25;0;0	500	214	1746	268	29	1,89	30,6	29
108	28	"	"	183	1817	280	13	2,04	32,8	31
108	28	"	"	"	"	"	"	2,33	38,8	35,5
28	28	0,4;0;0	"	211	1818	235	25	1,36	20,4	18,9
28	90	"	"	"	"	"	"	1,55	24	23,2
28	180	"	"	"	"	"	"	1,68	26,7	26,8
8	28	0,25;0,15	"	216	1692	282	56	1,42	21,5	21,2
8	90	"	"	"	"	"	"	1,62	25,2	24,6
8	180	"	"	"	"	"	"	1,76	28	25,4

Среднеквадратическое отклонение, характеризующее рассеяние экспериментальных значений прочности относительно среднего расчетного значения ($R_6 = 28$ МПа), равно 5,6 МПа, что соответствует коэффициенту вариации $C_v = 20\%$.

Расчетные и фактические значения прочности бетонов при сжатии характерных для исследованной совокупности составов позволяют считать (табл. 2.13), что прогноз с помощью структурного критерия в широком диапазоне составов является достаточно удовлетворительным.

Оценивая приведенные результаты, следует иметь в виду, что при расчете структурного критерия L_R использовали справочные значения степени гидратации α [16] и обобщенные показатели водопотребности заполнителей (табл. 2.14), полученные по ме-

тодике работы [4]. Экспериментальное определение степени гидратации и водопотребности применительно к исследованным материалам позволило бы повысить точность предлагаемой расчетной формулы.

На рис. 2.12, 2.13 для сравнения представлены зависимости $R_6 = f(L_R)$ и $R_6 = f(C/B)$. Для построения зависимостей $R_6 = f(C/B)$ экспериментальные результаты приводили к услов-

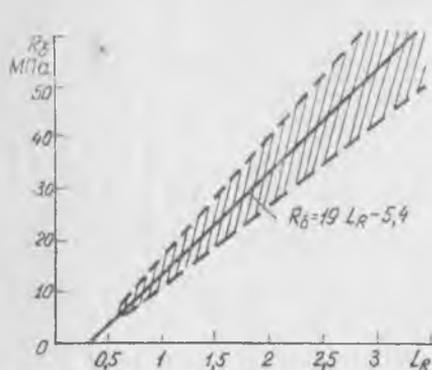


Рис. 2.12. Зависимость $R_6 = f(L_R)$.

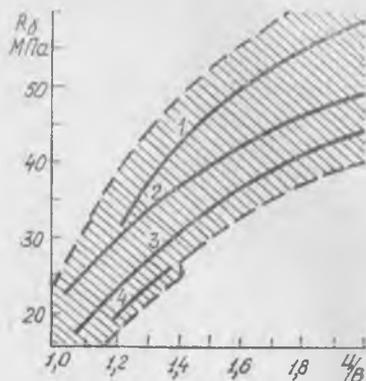


Рис. 2.13. Изменение прочности бетона в возрасте 28 сут, при изменении C/B по данным НИСа Гидропроекта:

1 — бетон с максимальной крупностью зерен 40 мм; 2 — бетон с содержанием искусственного песка 14 — 20%; 3 — бетон с содержанием искусственного песка 7 — 12%; 4 — песчаный бетон.

ному содержанию воздуха 2%. При этом принимали, что снижение прочности на каждый процент вовлеченного воздуха составляет в среднем 4%. Как видно из графиков (рис. 2.12, 2.13), точность прогноза прочности, оцениваемая шириной заштрихованной зоны вероятных значений, при использовании критерия L_R зна-

Таблица 2.14. ЗНАЧЕНИЯ ВОДОПОТРЕБНОСТИ ОТДЕЛЬНЫХ ФРАКЦИЙ РАЗЛИЧНЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ ПО АБСОЛЮТНОМУ ОБЪЕМУ

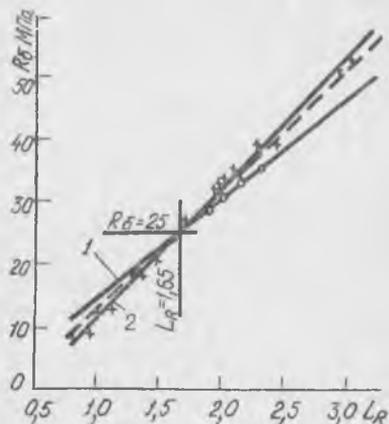
Заполнитель	Водопотребность единицы абсолютного объема заполнителя в % для фракции, мм									
	0,14	0,14—0,315	0,315—0,63	0,63—1,25	1,25—2,5	2,5—5	5,0—10	10—20	20—40	40—70
Песок кварцевый	67,2	32,3	17,1	8,25	5,04	4,57	—	—	—	—
овражный	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Щебень гранитный	—	—	—	—	—	—	7,82	5,99	4,96	4,7
Гравий	—	—	—	—	—	—	9,33	8,89	7,9	7,2
Щебень базальтовый	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Щебень известняковый	—	—	—	—	—	—	13,4	12,4	10,7	9,82
	—	—	—	—	—	—	10,0	9,3	8,69	7,72

чительно выше чем C/V . Это можно объяснить учетом значительного количества факторов, характеризующих как макро-, так и микроструктуру бетона.

Дополнительно повысить точность прогноза прочности бетона можно при корректировании коэффициентов критериальных уравнений с учетом прочности и адгезионных свойств заполнителей. С этой целью обработаны результаты испытаний отдельно для каждого вида заполнителей.

Рис. 2.14. Критериальные зависимости $R_b = f(L_R)$ для бетонов:

1 — на известняковом (o) щебне; 2 — на дробленом гравии (x); пунктиром обозначена обобщенная зависимость для бетонов на обоих заполнителях.



В результате статистической обработки данных для бетонов на гравийно-песчаной смеси с дробленой гравийной составляющей получено критериальное уравнение

$$R_b = 20,9 L_R - 9,5. \quad (2.67)$$

Коэффициент вариации $C_v = 6,5\%$. Точность совпадения здесь расчетных и фактических данных намного превышает точность при использовании выражения (2.66). Это объясняется тем, что уравнение (2.67) установлено для одного вида заполнителя, хотя и с широким диапазоном изменения зернового состава.

Линейный характер критериальной зависимости $R_b = f(L_R)$ дает основания считать, что для построения уравнения связи теоретически достаточно результатов двух испытаний бетонов различных составов. Разумеется, для предотвращения возможных ошибок необходимо поставить как минимум один контрольный опыт. Так как критерий L_R через степень гидратации α учитывает возраст бетона, то критериальную зависимость можно построить по результатам испытания бетона в ранние сроки, например в 7 сут. Для этого необходимо знать изменение α во времени для данного вида цемента.

Необходимо отметить, что зависимости $R_b = 16 L_R - 1,4$ на известняковом щебне и $R_b = 20,9 L_R - 9,5$ на дробленом гравии пересекаются (рис. 2.14) при значениях $R_b = 25$ МПа и $L_R = 1,65$.

Для значений критерия $L_R < 1,65$ ($R_b < 25$ МПа) при одной и той же структуре прочность бетона на известняковом щебне выше, а для значений $L_R > 1,65$ ($R_b > 25$ МПа) — ниже. По-видимому, это явление связано с тем, что в низкомарочных бетонах разница в прочности известнякового и дробленного гравийного заполнителей практически не имеет значения, а сцепление цементного камня с известняковым заполнителем в результате реакции карбонатов с гидратными новообразованиями существенно выше. С механических позиций такое химическое

Таблица 2.15. ЗНАЧЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ a И b В УРАВНЕНИИ $R_b = aL_R + b$

Заполнители	Коэффициенты	
	a	b
Без крупного заполнителя	18÷19	-4,5÷-55
Щебень гранитный и базальтовый	20÷22	-8,0÷-120
Гравий	19÷21	-5,0÷-65
Щебень известняковый	15÷17	-1,4÷-2

Примечание. В качестве мелкого заполнителя применяли кварцевый песок.

сцепление заполнителя с цементным камнем условно можно отнести к адгезионной характеристике. При получении высокомарочных бетонов, очевидно, сказывается сравнительно невысокая прочность известнякового щебня. Так как наклон линии $R_b = aL_R + b$ зависит, по существу, от прочности заполнителя, то коэффициент a можно считать коэффициентом прочности заполнителя. Коэффициент b характеризует сцепление цементного камня с заполнителем, следовательно, его примем как коэффициент адгезионной способности заполнителей.

Исследования позволили в некоторой степени систематизировать полученные значения коэффициентов по видам заполнителей (табл. 2.15). Влияние крупности заполнителя свыше 70 мм мы не изучали. Коэффициенты критериальных уравнений для бетонов на гранитном и базальтовом щебне оказались одинаковыми. При этом предполагается, что для достижения одинаковой прочности требуется одинаковая степень уплотнения бетонных смесей. Применение базальтового щебня, имеющего значительно большую лещадность, ухудшает удобоукладываемость и, как следствие, вызывает перерасход цемента.

Критериальные уравнения позволяют найти количественные зависимости коэффициентов в формуле Болоемя от основных структурных параметров бетона и вскрыть их физический смысл.

Большинство исследователей коэффициент C в формуле $R_b = AR_{ц}(C/B - C)$ принимают постоянным, а значения коэффициента A устанавливают в зависимости от вида заполнителей. Л. А. Кайсер, обработав много экспериментальных данных, показал, что значения коэффициентов A и C находятся

в сложной зависимости от величины активности и вещественного состава цемента [57]. В настоящее время многочисленными исследованиями установлено, что значения коэффициентов A и C в зависимости от особенностей используемых материалов, методов испытаний, возраста бетона, технической вязкости бетонной смеси и других факторов могут изменяться в широком диапазоне.

Приравнивая критериальное уравнение вида $R_6 = aL_R + b$ к формуле Болоемя $R_6 = AR_{п}(Ц/B - C)$ с учетом выражения (2.65), после некоторых преобразований получаем формулы для коэффициентов A и C :

$$A = 1,294 a / [165 \alpha (1 - 0,42\alpha)], \quad (2.68)$$

$$C = - \frac{b (1 - 0,42\alpha)}{1,294 \alpha} - \frac{0,42 \alpha Ц B_{и} / (B + \Sigma v_{п.л})}{B - 0,42 \alpha B_{и} + \Sigma v_{п.л}}. \quad (2.69)$$

В частном случае, когда критериальное уравнение имеет вид $R_6 = 19 L_R - 5,4$, значения коэффициентов A и C рассчитывают по формулам:

$$A = 24,59 / [165 \alpha (1 - 0,42\alpha)], \quad (2.70)$$

$$C = - \frac{5,4 (1 - 0,42\alpha)}{24,59 \alpha} - \frac{0,42 \alpha Ц B_{и} / (B + \Sigma v_{п.л})}{B - 0,42 \alpha B_{и} + \Sigma v_{п.л}}. \quad (2.71)$$

Анализ приведенных формул позволяет утверждать, что коэффициент A зависит от вида цемента, а также от всех факторов, влияющих на степень гидратации (температурно-влажностных условий твердения, вида и содержания добавок и т. д.). На значении коэффициента A через критериальное уравнение $R_6 = f(L_R)$ должны сказаться и прочностные свойства заполнителя. Таким образом, коэффициент A можно считать коэффициентом качества исходных материалов. Значение его может изменяться в определенном диапазоне.

Значительно больший комплекс факторов учитывается коэффициентом C (вид и соотношение заполнителей, водосодержание смеси (через $B_{и}$), количество вовлеченного воздуха, степень гидратации, цементно-водное отношение и др.).

Как следует из формулы (2.71), коэффициент C меняет знак в определенном диапазоне $Ц/B$. Эта закономерность, как известно, отражена в формуле Б. Г. Скрамтаева—Ю. М. Баженова и других исследованиях [4].

Коэффициент C уменьшается с увеличением $Ц/B$ и $R_{п}$. Абсолютное значение C при переходе к мелкозернистым бетонам увеличивается, что подтверждают исследования Ю. М. Баженова [4]. Критическое значение $Ц/B$, при котором C изменяет знак, может быть различным в зависимости от степени гидратации цемента.

Представляет интерес проанализировать некоторые следствия, вытекающие из формулы (2.60). Так, зависимость $R_{\delta} = f(C/B, R_{II})$ (рис. 2.15) имеет характер, близкий к установленному в работе [4]. Сопоставление функций $R_{\delta} = f(C/B, R_{II})$, определенных по различным формулам, в том числе и с использованием структурного критерия, свидетельствует о достаточно близком характере кривых, рассчитанных с помощью критериального уравнения и наиболее известных формул.

Критериальные уравнения позволяют прогнозировать рост прочности бетона с увеличением возраста.

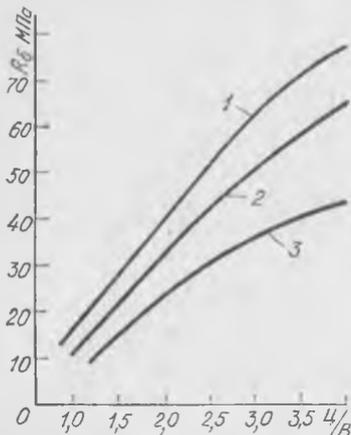


Рис. 2.15. Зависимости прочности бетона от цементно-водного отношения и активности цемента, рассчитанные по критериальному уравнению:

1 — $R_{II} = 60$ МПа; 2 — $R_{II} = 40$ МПа; 3 — $R_{II} = 30$ МПа.

Коэффициент роста прочности бетона k_{τ} во времени определяется отношением $k_{\tau} = R_{\delta\tau} / R_{\delta_{28}}$. Используя критериальное уравнение в общем виде, имеем

$$k_{\tau} = (aL_{R\tau} + b) / (a \cdot L_{R28} + b). \quad (2.72)$$

В качестве примера определим рост прочности бетона с расходами цемента $C = 250$ кг/м³ и воды $B = 160$ кг/м³. Пусть заполнитель иммобилизует 78 л воды, следовательно, $V_{II} = 160 - 78 = 82$ л, коэффициент уплотнения 0,98, т. е. объем заземленного воздуха $v_3 = 20$ л/м³.

Критериальное уравнение имеет вид $R_{\delta} = 19 L_R - 5,4$, т. е. $a = 19$, $b = -5,4$. Подставляя данные в уравнение (2.72), после всех арифметических преобразований получаем

$$k_{\tau} = \frac{1138 \alpha_{\tau} / [(1 - 0,42 \alpha_{\tau})(180 - 34,44 \alpha_{\tau})] - 1}{1138 \alpha_{28} / [(1 - 0,42 \alpha_{28})(180 - 34,44 \alpha_{28})] - 1}. \quad (2.73)$$

Для рядовых цементов степень гидратации в различном возрасте можно принять по данным работы [16]. Коэффициенты роста прочности бетона данного состава при этом:

$$\tau = 28 \text{ сут.}; \quad \alpha_{28} = 0,58; \quad k_{28} = 1;$$

$$\tau = 90 \text{ сут.}; \quad \alpha_{90} = 0,66; \quad k_{90} = 1,26;$$

$$\tau = 180 \text{ сут.}; \quad \alpha_{180} = 0,68; \quad k_{180} = 1,33.$$

По логарифмической зависимости роста прочности:

$$k_{90} = \lg 90 / \lg 28 = 1,35; \quad k_{180} = \lg 180 / \lg 28 = 1,56.$$

Осредненные значения коэффициентов нарастания прочности по экспериментальным данным В. В. Стольникова [93] и Мак-Миллана [69] $k_{90} = 1,25$; $k_{180} = 1,38$.

В соответствии с рекомендациями ВНИИГа [81] обобщенные коэффициенты нарастания прочности бетона на обычных порландцементе $k_{90} = 1,15 - 1,35$; $k_{180} = 1,30 - 1,50$.

Критериальные уравнения в отличие от логарифмической зависимости позволяют учесть при определении интенсивности роста прочности бетона факторы, влияющие на степень гидратации цемента и состав бетонной смеси.

В табл. 2.16 приведены расчетные коэффициенты роста прочности бетона без добавок ПАВ и с добавкой СДБ в зависимости от V/C .

При расчетах приняты следующие исходные данные: водосодержание $V = 200$ л/м³, нормальная густота цементного теста без добавки СДБ НГ = 27%, с добавкой 0,2% СДБ — 25,5%, водопотребность заполнителей по абсолютному объему $w_3 = 0,135$ и количество вовлеченного воздуха $v_b = 20$ л (2%).

Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными других исследователей [69, 93].

Критериальные уравнения позволяют учесть совокупность основных факторов и прогнозировать прочность бетона в широком диапазоне и в различном возрасте, хорошо отражают основные закономерности технологии бетона.

2.4. Прогноз морозостойкости бетона

Теоретически и экспериментально установлено, что морозостойкость бетона на материалах определенного качества является функцией пористости. Одним из первых критериев морозостойкости, предложенным Уайтсайдом и Свитом [115] на основе теории о замерзающей воде Пауэрса была степень насыщения бетона C_H :

$$C_H = v_{з,в} / (v_{з,в} + v_b), \quad (2.74)$$

Таблица 2.16. ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТОВ РОСТА ПРОЧНОСТИ БЕТОНА ОТ V/C

V/C	Расчетные коэффициенты роста прочности во времени, сут.		
	7	90	180

Бетон на порландцементе М 500 без добавок

0,8	0,68	1,25	1,32
0,65	0,69	1,23	1,31
0,5	0,71	1,22	1,29
0,4	0,72	1,22	1,28

Бетон на порландцементе М 500 с добавкой СДБ 0,2%

0,8	0,59	1,36	1,44
0,65	0,61	1,34	1,42
0,5	0,63	1,32	1,40
0,4	0,64	1,31	1,39

где $v_{з,в}$ и $v_в$ — объемы замерзающей воды и воздуха на единицу объема бетона.

При $C_H < 0,88$ бетон имеет высокую долговечность, при $C_H > 0,91$ быстро разрушается при переменном замораживании и оттаивании в водонасыщенном состоянии. Так как морозостойкость ($M_{рз}$) обратна по величине степени насыщения C_H можно записать

$$M_{рз} \sim 1/C_H = 1 + v_в/v_{з,в}. \quad (2.75)$$

Обстоятельные исследования влияния параметров поровой структуры бетона на его морозостойкость выполнены Г. И. Горчаковым [16]. Он установил, что

$$M_{рз} \sim \rho_k/\rho_{кап}, \quad (2.76)$$

где ρ_k и $\rho_{кап}$ — соответственно контракционная и капиллярная пористость.

Положительное влияние контракционной пористости на морозостойкость выявили многие исследователи, однако о механизме ее действия нет единого мнения. В ряде работ [16, 104] утверждается, что контракционные поры создают особый вид пор, заполненных паровоздушной смесью, вследствие уменьшения абсолютного объема системы цемент—вода. Однако большинство исследователей считает, что контракционные процессы в цементном камне приводят к образованию капилляров радиусом менее 10^{-5} — 10^{-4} см, заполненных в обычных условиях водой.

По мнению А. Е. Шейкина [103], контракционные поры при твердении на воздухе заполняются водой из более крупных макрокапилляров (смачивающая жидкость перемещается от низшего капиллярного потенциала к высшему), а при твердении в воде происходит непрерывный подсос влаги и зона капиллярного пространства за исключением воздушных пузырьков полностью заполнена жидкой фазой. По А. В. Волженскому [14], контракционные поры заполняются водой или воздухом в зависимости от условий твердения бетона. Положительный эффект влияния контракционных пор на морозостойкость объясняется эффектом выделения из воды в крупных порах и капиллярах пузырьков избыточного воздуха. Количество воздуха, выделенного контракцией, или объем условных контракционных пор, определяется массой цемента в единице объема бетона, степенью его гидратации, химико-минералогическим составом.

Для сравнительной оценки морозостойкости бетонов удобен критерий А. Е. Шейкина [102], полученный из условия $\rho_{у,з} \geq \geq 0,09 \rho_k$, где $\rho_{у,з}$ — условно-замкнутая пористость, образующаяся в бетоне вследствие контракции и вовлечения воздуха; ρ_k — интегральная, т. е. открытая пористость.

После необходимых преобразований это условие записывается как

$$0,0041 \alpha Ц \geq 0,09[0,1(B-0,23 \alpha Ц) + 100 \times (1-k_{c,п}) - 0,0041 \alpha Ц], \quad (2.77)$$

где α — степень гидратации; $Ц$ — расход цемента; B — расход воды на 1 м^3 бетона; $k_{c,п}$ — коэффициент структурной плотности бетонной смеси.

Этот критерий предназначен и для количественного прогноза ожидаемой морозостойкости.

И. М. Красный [62] предложил оценку морозостойкости бетона производить по компенсационному фактору (ГОСТ 10060—76)

$$\Phi_K = (v_B + v_K) / v_{л}, \quad (2.78)$$

где v_B — объем остаточного воздуха в уплотненной смеси, включая заземленный и эмульгированный виды воздуха в $\text{л}/\text{м}^3$; $v_K = 120 Ц / \rho_{ц}$ — объем контракционных пор в бетоне в $\text{л}/\text{м}^3$; $v_{л} = B - 0,27 Ц$ — объем льда в бетоне при стандартном методе испытания морозостойкости бетона в $\text{л}/\text{м}^3$; $B, Ц$ — соответственно расходы воды и цемента в 1 м^3 бетонной смеси по массе в $\text{кг}/\text{м}^3$; $\rho_{ц}$ — плотность цемента ($\rho_{ц} = 3100 \text{ кг}/\text{м}^3$).

Связь компенсационного фактора с морозостойкостью бетона, предлагаемая ГОСТ 10060—76, различается для бетонов с добавками ПАВ и без добавок. Это, очевидно, объясняется тем, что при одном и том же значении воздухоудержания, контракционной и «льдистой» пористости воздушно-поровая структура может существенно менять свой характер и, следовательно, влияние на свойства бетона.

В. В. Стольников показал [94], что «упорядочение» даже «случайного» (заземленного) воздуха путем перевода его в состояние тонкодисперсной эмульсии воздушных пузырьков без увеличения суммарного количества воздуха существенно меняет структуру и свойства бетонной смеси и бетона, в том числе и морозостойкость. В других исследованиях указывается [160], что главное действие воздухововлекающих добавок состоит в видоизменении системы пор. Ряд исследователей [94, 104] положительное действие воздухововлекающих ПАВ на улучшение свойств бетона объясняет приданием капиллярам несмачиваемости. Гидрофобная пленка на поверхности раздела воздух—вода препятствует попаданию воды в пустоты после затвердевания бетона. При этом наиболее важны для защиты цементного камня от разрушительного влияния замораживания поры среднего размера от 50 до 500 мкм. Именно они в основном образуются в бетонах с добавками ПАВ.

Компенсационный фактор отличается от ранее предложенных критериев (2.77) и (2.78) тем, что в числителе формулы (2.81) учтены объем контракционных пор и общий объем вовлеченного воздуха. Отмечено положительное влияние заземленного воздуха, а также повышенная морозостойкость бетона,

полученного даже из несколько неуплотненной смеси (более 120 циклов вместо 20 для сильно уплотненной смеси без расслоения).

Такое утверждение противоречит многим известным данным. Так, в работах С. В. Шестоперова [105] экспериментально доказано, что уменьшение коэффициента уплотнения вызывает увеличение капиллярной пористости и соответственно снижение морозостойкости. Влияние недоуплотненной смеси на повышение капиллярной пористости отмечено и в других работах.

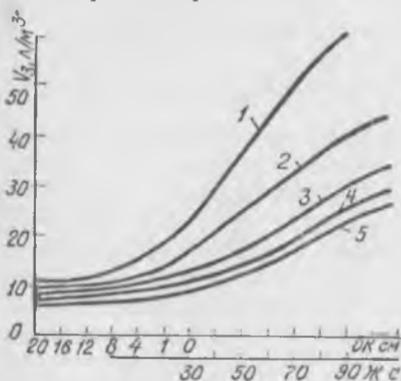


Рис. 2.16. Зависимость объема заземленного воздуха от показателей подвижности и жесткости бетонной смеси:

1 — $D_{шлях} = 10$ мм; 2 — 20 мм;
3 — 30 мм; 4 — 40 мм;
5 — 70 мм.

Защемленный в капиллярах бетонной смеси воздух принципиально отличается от воздушной эмульсии, образующейся при введении добавок ПАВ тем, что является неупорядоченным, может легко коалесцировать, не гидрофобизует поверхности стенок капиллярных ходов, не способствует переводу открытой пористости в замкнутую.

Учитывая возможность разделения вовлеченного воздуха на эмульгированный и «случайно» защемленный [23], из числителя выражения (2.81) следует исключить количество защемленного воздуха, которое можно определить как функцию удобоукладываемости бетонной смеси (рис. 2.16) [23].

При этом выражение компенсационного фактора модифицируется и принимает вид [24]

$$F_K = (v_3 + v_K) / v_L, \quad (2.79)$$

где v_3 — объем эмульгированного воздуха; v_K — объем контракционных пор; v_L — объем льда в бетоне при стандартном методе испытания на морозостойкость.

Для учета влияния контактной зоны на морозостойкость бетона А. В. Алимов [5] предложил критерий морозостойкости

$$K.M = (v_{ц.к} + v_{з.пор}) / v_{с.пор}, \quad (2.80)$$

где $v_{з.пор}$; $v_{с.пор}$ — соответственно объем замкнутых и сообщающихся видов пор; $v_{ц.к}$ — объемная концентрация цементного камня $v_{ц.к} = 1 / \rho_{ц} + (B/C)_{иЦ}$; $(B/C)_{иЦ}$ — «истинное» водоце-

ментное отношение цементного камня в бетоне; ρ_c — плотность цемента.

Однако составной частью объема цементного камня $v_{цк}$ является объем капиллярных пор. Кроме того, учесть влияние контактной зоны только посредством введения в критерий морозостойкости значения объемной концентрации цементного камня невозможно, так как варьируя удельной поверхностью заполнителя, можно менять поверхность контактной зоны при $v_{цк} = \text{const}$. Влияние контактной зоны на морозостойкость

Таблица 2.17. УРОВНИ ФАКТОРОВ И ИНТЕРВАЛЫ ВАРЬИРОВАНИЯ

Уровни факторов	Факторы				
	Волокосо- держание, кг/м ³ x_1	Расход цемента, кг/м ³ x_2	Содержа- ние фрак- ции менее 0,14 мм в объемной смеси за- полнителя x_3	Содержа- ние фрак- ции 0,14— 1,25 мм в объемной смеси за- полнителя x_4	Добавка СНВ, кг/м ³ x_5
+1	200	400	0,1	0,4	120
0	180	300	0,05	0,325	60
-1	160	200	0	0,25	0

связано, главным образом, с тем, что она насыщена капиллярами, образованными водой, иммобилизованной заполнителем. Поэтому общий объем капиллярных пор, очевидно, должен отражать в первую очередь морозостойкость контактной зоны.

Критерий F_k учитывает влияние на морозостойкость как объемной концентрации цементного камня, так и водоцементного отношения его в бетоне. В связи с тем что стандартные испытания на морозостойкость имеют продолжительный характер, учитывать степень гидратации цемента α в формулах объемов контракционных пор и объема льда в бетоне нет необходимости, что существенно упрощает расчеты.

Зависимость морозостойкости от модифицированного компенсационного фактора F_k устанавливали экспериментально по методике ГОСТ 10060—76 на образцах-кубах с ребром 10 см при $k_{мрз} = 0,85$ и B/C , изменяющемся от 0,4 до 1, эксперименты выполняли по плану-матрице Na_5 (табл. 2.17, 2.18, 2.19).

Исходными материалами служили портландцемент Здобуновского цементно-шиферного комбината М 500, песок кварцевый овражный с модулем крупности 1,76.

Удобоукладываемость бетонных смесей изменяли от 170 с до 16 см по ГОСТ 10181—62. Изучали влияние пяти независимых переменных: количества воды и цемента, доли фракции $< 0,14$ мм, доли песка в смеси заполнителей и количества добавки СНВ, изменяемых в определенном диапазоне (табл. 2.17).

Часть опытов выполняли на смеси постоянного состава, что позволило оценить их воспроизводимость с помощью коэф-

Таблица 2.18. МАТРИЦА ПЛАНИРОВАНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ

№ п/п	Факторы					Результаты опытов				
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	удобоукладываемость бетонной смеси		воздухосодержание, %		
						Ж с	ОК см	v_n	v_3	v_3
1	+1	+1	+1	+1	+1	—	8,8	5,45	0,40	5,05
2	-1	-1	+1	+1	+1	101	—	6,84	2,50	4,34
3	-1	+1	-1	-1	-1	61	—	1,41	1,41	0
4	+1	-1	-1	-1	-1	13	6,6	0,46	0,46	0
5	-1	+1	-1	+1	+1	53	—	6,72	1,21	5,51
6	+1	-1	-1	+1	+1	—	16	8,82	0,40	8,42
7	+1	+1	+1	-1	-1	15	6,1	0,48	0,48	0
8	+1	+1	+1	-1	-1	159	—	3,88	3,88	0
9	-1	+1	+1	+1	-1	170	—	3,99	3,99	0
10	+1	-1	+1	+1	-1	—	10	0,40	0,40	0
11	+1	+1	-1	-1	+1	—	17	5,63	0,40	5,23
12	-1	-1	-1	-1	+1	13	4,5	4,98	0,46	4,52
13	-1	+1	+1	-1	+1	82	—	3,15	2,00	1,15
14	+1	-1	+1	-1	+1	—	12	4,46	0,40	4,06
15	+1	+1	-1	+1	-1	—	12	0,40	0,40	0
16	-1	-1	-1	+1	-1	36	0,9	0,84	0,84	0
17	+1	0	0	0	0	—	15	3,82	0,40	3,42
18	-1	0	0	0	0	48	—	3,30	1,08	2,22
19	0	+1	0	0	0	10	6,5	3,24	0,42	2,82
20	0	-1	0	0	0	—	8,3	3,95	0,40	3,55
21	0	0	+1	0	0	15	4,9	2,88	0,48	2,40
22	0	0	-1	0	0	—	12	4,30	0,40	3,90
23	0	0	0	+1	0	13	5,3	4,16	0,46	3,70
24	0	0	0	-1	0	11	6,0	2,75	0,43	2,32
25	0	0	0	0	+1	—	9,3	4,94	0,40	4,54
26	0	0	0	0	-1	19	4,6	0,55	0,55	0
27	0	0	0	0	0	—	8,2	3,28	0,41	2,87
28	0	0	0	0	0	—	9,2	3,48	0,40	3,08
29	0	0	0	0	0	—	10	3,33	0,40	2,93
30	0	0	0	0	0	—	8,7	3,38	0,40	2,98
31	0	0	0	0	0	—	8,0	3,48	0,42	3,06
32	0	0	0	0	0	—	8,2	3,49	0,41	3,08

Примечание. v_n — общий объем воздуха в бетонной смеси; v_3 — объем заземленного воздуха; v_3 — объем эмульгированного воздуха (%).

коэффициента вариации $C_v=14,2\%$. Общее воздухосодержание бетонной смеси определяли компрессионным способом с уплотнением на стандартной виброплощадке. Для сравнения морозостойкость рассчитывали и по компенсационному фактору Φ_K , рекомендуемому ГОСТ 10060—70 и предложенному нами F_K .

На рис. 2.17 показана зависимость морозостойкости от модифицированного компенсационного фактора F_k . Кривая описывается показательной функцией вида

$$Mpz = k (10^{F_k} - 1). \quad (2.81)$$

Коэффициент k можно найти из выражения

$$k = Mpz / (10^{F_k} - 1). \quad (2.82)$$

Для исследованных материалов он равен 170.

Таблица 2.19. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ МОРОЗОСТОЙКОСТИ ПО КРИТЕРИЯМ Φ_k и F_k

№ состава	В/Ц	Значения морозостойкости, цикл		
		экспериментальное	по ГОСТ 10060-76	по формуле (2.81)
1	0,5	710	257	716
2	0,8	330	230	346
3	0,4	160	114	168
4	1	15	5	22
5	0,4	—	—	—
6	1	560	203	555
7	0,5	90	24	80
8	0,8	35	70	31
9	0,4	190	311	168
10	1	20	4	22
11	0,5	730	210	758
12	0,8	355	164	366
13	0,4	390	335	392
14	1	180	106	194
15	0,5	90	23	80
16	0,8	20	15	31
17	0,67	240	120	243
18	0,53	300	175	285
19	0,45	500	209	518
20	0,9	140	88	152
21	0,6	230	119	219
22	0,6	360	163	381
23	0,6	325	201	356
24	0,6	220	115	212
25	0,6	480	187	470
26	0,6	55	16	53
27	0,6	250	131	258
28	0,6	300	140	285
29	0,6	290	134	270
30	0,6	280	136	275
31	0,6	270	140	283
32	0,6	290	139	285

Примечание. В опыте № 5 не достигнуто значение $\kappa_{мрз}=0,85$ вследствие высокой морозостойкости образцов.

Сходимость экспериментальных и расчетных результатов, оцениваемая критерием Фишера $F_{ад}$, для фактора F_k составила 2,96, а $\Phi_k=15,1$. При уровне значимости 5% и числе степеней

свободы $f_{\text{восп}}=5$; $F_{\text{ад}}=5$, табличное значение критерия Фишера $F_{\text{ад}}=5,05$. Таким образом, критерий F_K лучше позволяет осуществлять прогноз морозостойкости, что наглядно видно из сравнения рис. 2.17, где приведены экспериментальные зависимости $Mrз=f(F_K)$ и $Mrз=f(\Phi_K)$.

Расчет морозостойкости бетона по компенсационному фактору Φ_K (ГОСТ 10060-76) дает явно заниженные значения в

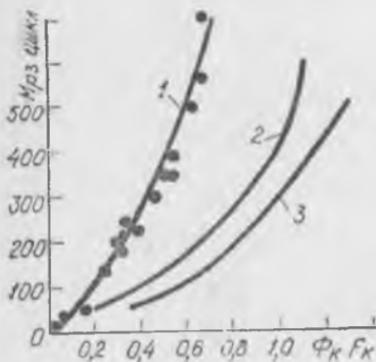


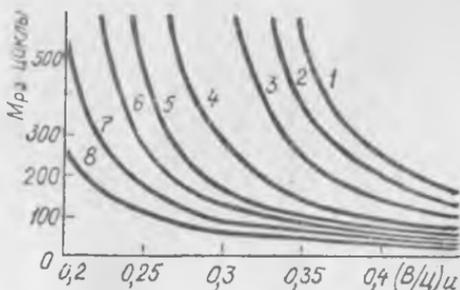
Рис. 2.17. Зависимость морозостойкости от компенсационного фактора: 1 — $Mrз=f(F_K)$; 2 — $Mrз=f(\Phi_K)$ — с добавкой ПАВ; 3 — $Mrз=f(\Phi_K)$ — без добавок ПАВ (ГОСТ 10060-76).

составах с заведомо высокой морозостойкостью. Например, бетон без добавок ПАВ при $B/C=0,4$; $C=450 \text{ кг/м}^3$; $v_з=1\%$ имеет $\Phi_K=0,473$ и табличное значение $Mrз=75$. Расчет морозостойкости по формуле (2.81) при $k=170$ дает $F_K=0,5$ и $Mrз=170$, что, очевидно, более близко к реально ожидаемому значению.

Критерий F_K однозначен как для бетонов с добавками ПАВ, так и без них.

Рис. 2.18. Зависимость морозостойкости бетона от $(B/C)_н$:

1 — $v_{цк}=1$; 2 — 0,8; 3 — 0,6; 4 — 0,4; 5 — 0,3; 6 — 0,25; 7 — 0,2; 8 — 0,15.



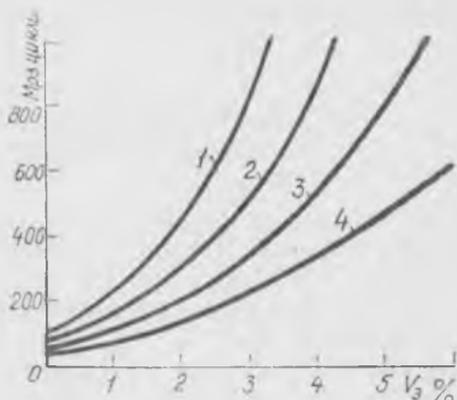
При ориентировочных расчетах морозостойкости бетонов на нормальном среднеалюминатном цементе, гранитном щебне и кварцевом песке значение коэффициента k можно принимать, как показала обработка экспериментальных данных НИСа Гидропроекта, в пределах 170—200 (табл. 2.20).

Для экспериментального уточнения коэффициента k при переходе на другие виды цемента или заполнителя достаточно выполнить, как следует из формулы 2.82, всего один опыт на бетоне произвольного состава.

При анализе критериального уравнения морозостойкости (2.81) устанавливали влияние водоцементного отношения и объема эмульгированного воздуха при постоянной подвижности бетонной смеси, а также объемной концентрации цементного камня и истинного водоцементного отношения (рис. 2.18, 2.19). При расчетах принимали заполнитель с водопотребностью по объему $\omega_3=0,106$ (по массе $b_3 \approx 4\%$), цемент с

Рис. 2.19. Зависимость морозостойкости бетона от объема эмульгированного воздуха при постоянной подвижности бетонной смеси ($OK=8\div 10$ см):

1 — $C=400$ кг/м³; 2 — $C=333$ кг/м³; 3 — $C=250$ кг/м³; 4 — $C=200$ кг/м³.



нормальной густотой $НГ=28,2\%$. Расход цемента и воды при заданных структурных характеристиках определяли по формулам, полученным путем преобразования зависимостей (2.45), (2.47).

Таблица 2.20. РАСЧЕТНЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ МОРОЗОСТОЙКОСТИ БЕТОНА ПО ДАННЫМ НИСАа ГИДРОПРОЕКТА

Шифр состава	В/Ц	Объем воздуха		Φ_k	F_k	Морозостойкость		
		общий	эмульгированный			эксперимент	по формуле (2.81)	по ГОСТ 10060-76
$k=195$								
15	0,50	26	16	0,438	0,333	200	225	100
011	0,66	35	17	0,393	0,239	200	143	100
08	0,69	29	12	0,323	0,185	200	104	75
17	0,75	31	24	0,293	0,245	150	148	75
16	0,94	50	39	0,397	0,322	100	114	100
09	0,69	48	39	0,484	0,410	200	306	100
010	0,69	72	71	0,697	0,681	200	740	200
9	0,64	55	48	0,540	0,484	400	399	150
015	0,70	38	28	0,386	0,307	200	200	100
017	0,77	41	30	0,361	0,285	166	181	100
8	0,77	56	49	0,479	0,429	300	329	100
016	0,77	49	45	0,423	0,394	300	288	100
$k=170$								
04	0,54	26	15	0,463	0,329	150	193	100
101	0,56	19	11	0,356	0,265	200	143	100
102	0,50	113	105	1,938	1,810	300	500	500
103	0,54	134	125	1,973	1,849	300	500	500

Анализ графиков на рис. 2.18, 2.19 позволяет утверждать, что структурный критерий морозостойкости F_k и критериальные уравнения достаточно хорошо отражают известные закономерности [5, 16]. Применение критериальных уравнений морозостойкости бетона позволяет как прогнозировать $M_{pз}$ по известному составу смеси, так и рассчитывать состав морозостойкого бетона с определением необходимого объема эмульгированного воздуха.

2.5. Проектирование составов морозостойких бетонов

Один из первых расчетно-экспериментальных методов проектирования составов бетона с учетом характеристик пористости предложил Г. И. Горчаков [16]. В его основу положена зависимость между морозостойкостью, капиллярной и контракционной видами пористости.

Мы предлагаем расчетно-экспериментальные методы, основанные на использовании в схеме проектирования составов структурных критериев основных свойств бетона. Предварительный расчет составов морозостойких бетонов с определением необходимого объема эмульгированного воздуха можно осуществить, включив в схему традиционных расчетно-экспериментальных методов критериальное уравнение морозостойкости $M_{pз} = k(10^{F_k} - 1)$.

Раскрыв формулу критерия F_k и значений отдельных видов пористости, найдем выражение необходимого объема эмульгированного воздуха, л/м³:

$$v_a = C[(B/C - 0,27)Z - 0,0387], \quad (2.83)$$

где $Z = \lg(M_{pз}/k + 1)$ — параметр, определяемый графически (рис. 2.20). Порядок расчета следующий. Из уравнения $R_6 = AR_{ц}[C/(B + v_a) - 0,5]$ находим выражение водовоздушно-цементного отношения:

$$g = (B + v_a)/C = AR_{ц}/(R_6 + 0,5 AR_{ц}). \quad (2.84)$$

Выразив B/C как $g - (v_a/C)$ из формулы (2.83), можно определить воздушно-цементное отношение:

$$v_a/C = [Z(g - 0,27) - 0,0387]/(1 + Z) \geq 0, \quad (2.85)$$

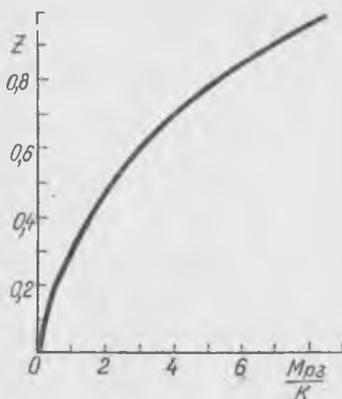
а затем водоцементное отношение $B/C = g - (v_a/C)$ (если $v_a/C < 0$, то необходимость в воздухововлекающей добавке отсутствует).

Из условия снижения водопотребности бетонной смеси примерно на 5 л/м^3 каждым процентом эмульгированного воздуха ищем расход воды, кг/м^3 :

$$B = B_0 - 0,5 v_a \approx B_0 \left(1 - 0,5 \frac{v_a / \Pi}{B / \Pi} \right), \quad (2.86)$$

где B_0 — табличное или графическое значение водопотребности бетонной смеси без воздухововлекающих ПАВ.

Рис. 2.20. График зависимости параметра $Z = f\left(\frac{M_{\text{PЗ}}}{k}\right)$.



Расход цемента, кг/м^3 :

$$\Pi = \frac{B}{B/\Pi}, \quad (2.87)$$

Объем эмульгированного воздуха, л/м^3 :

$$v_a = \Pi \cdot (v_a/\Pi). \quad (2.88)$$

Общее воздуховодящее бетонной смеси, л/м^3 :

$$v_B = v_a + v_z, \quad (2.89)$$

где v_z — объем заземленного воздуха, который находят графически (рис. 2.20) в зависимости от удобоукладываемости смеси.

Расход щебня и песка вычисляют по обычным условиям метода абсолютных объемов. Для определения расхода воздухововлекающей добавки можно использовать номограмму, полученную при помощи анализа математических моделей (см. рис. 3.16).

При экспериментальном уточнении состава бетонной смеси корректируется, как обычно, водосодержание, обеспечивающее требуемую удобоукладываемость, а затем регулированием расхода ПАВ добиваются требуемого воздуховодящего.

Рассмотрим примеры расчета состава морозостойкого бетона при помощи этого метода.

Пример 2.1. Оценить морозостойкость бетона с воздухововлекающей добавкой на гранитном щебне фракции 5...40 мм, если $B/C=0,65$; расход цемента $C=270$ кг/м³, содержание воздуха в бетонной смеси $v_a=4\%$ и осадка конуса $OK=3$ см.

1. По рис. 2.16 находим количество заземленного воздуха $v_a=0,8\%$. Тогда объем эмульгированного $v_a=v_a-v_a=4-0,8=3,2\%=32$ л/м³.

2. Определяем объем контракционных v_k и капиллярных v_l пор:

$$v_k = 120 \frac{C/\rho_c}{3100} = \frac{120 \cdot 270}{3100} = 10,5 \text{ л/м}^3,$$

$$v_l = B - 0,27C = (B/C - 0,27)C = 270(0,65 - 0,27) = 102,6 \text{ л/м}^3.$$

3. Рассчитываем по формуле (2.79) критерий F_k :

$$F_k = \frac{32 + 10,5}{102,6} = 0,414.$$

4. При $k=170$ морозостойкость бетона находим по формуле (2.81):

$$M_{pз} = 170 (10^{0,414} - 1) = 270 \text{ цикл.}$$

Марка бетона по морозостойкости $M_{pз} 250$.

Пример 2.2. Рассчитать необходимое количество вовлеченного воздуха и добавки СНВ для обеспечения морозостойкости $M_{pз} 250$ бетона следующего состава: расход цемента $C=250$ кг/м³, расход воды $B=170$ кг/м³, доля песка в смеси заполнителей $r=0,325$; щебень гранитный $D_{max}=20$ мм, портландцемент среднеалюминатный $C_3A=6-9\%$, осадка конуса бетонной смеси $1-1,5$ см.

1. Требуемое количество эмульгированного воздуха вычисляем по формуле (2.85). Принимаем $k=170$ и по рис. 2.20 определяем значение Z :

$$M_{pз}/k + 1 = \frac{250}{170} + 1 = 2,471; \quad Z = 0,393.$$

Тогда $v_a/C = C[(B/C - 0,27)Z - 0,0387] = 30,6$ л/м³ = 3,1%.

2. Общее воздухововлечение v_a можно найти, зная количество заземленного воздуха v_a , по рис. 2.16: $v_a=1,3\%$; $v_a=3,1+1,3=4,4\%$.

Пример 2.3. Рассчитать состав гидротехнического бетона М 200 ($R_6=20$ МПа) в возрасте 180 сут., $M_{pз} 200$. $OK=3$ см. Исходные материалы: портландцемент М 400; $C_3A=6\%$; мелкий заполнитель — кварцевый песок с водопотребностью $B_n=9,5\%$, плотность песка $\rho_n=2,56$ т/м³; объемно-насыпная масса $\rho_{o.n}=1,42$ т/м³, удельная поверхность $U_n=218 \times 10^2$ м⁻¹, крупный заполнитель — щебень фракции 5—40 мм, плотность $\rho_{щ}=2,61$ т/м³, объемно-насыпная масса $\rho_{o.щ}=1,45$ т/м³; воздухововлекающая добавка СНВ.

1. Определим коэффициент A в формуле Болоея применительно к 180-суточному возрасту бетона: $A_{180}=A_{28}k_r$, где k_r — коэффициент роста прочности бетона от 28- к 180-суточному возрасту.

Приняв $A_{28}=0,55$ и $k_r=1,4$ [81], получим $A_{180}=0,55 \times 1,4=0,77$.

2. По формуле (2.84) имеем

$$q = \frac{0,77 \cdot 40}{20 + 0,5 \cdot 0,77 \cdot 40} = 0,87.$$

3. Количество эмульгированного воздуха по отношению к массе цемента можно найти по формуле (2.85), зная $k=170$ и значение Z по рис. 2.20:

$$Z = \lg \left(\frac{200}{170} + 1 \right) = 0,336.$$

Тогда

$$v_a/C = \frac{0,336(0,87-0,27)-0,0387}{1+0,336} = 0,12.$$

4. Водоцементное отношение $B/C=0,87-0,12=0,75$.

5. Для расчета водопотребности бетонной смеси B по работе [4] определяем водопотребность B_0 для бетонных смесей без воздухововлекающих добавок: $B_0=165+12,5=177,5$ кг/м³.

Тогда требуемое количество воды (2.86)

$$B = 177,5 \left(1 - 0,5 \frac{0,12}{0,75} \right) = 163 \text{ кг/м}^3.$$

6. Расход цемента (2.87)

$$C = \frac{163}{0,75} = 217 \text{ кг/м}^3.$$

7. Количество эмульгированного воздуха (2.88)

$$v_a = 217 \cdot 0,12 = 26 \text{ л/м}^3, \text{ или } v_a = 2,6\%.$$

8. Общее воздухововлечение (v_n) находим, зная из рис. 2.16 количество заземленного воздуха (v_a) $v_n=0,8\%$. Тогда $v_n=2,6+0,8=3,4\%$ или 34 л/м³.

Для определения расхода крупного заполнителя ищем его пустотность $v_{\text{щ}}^{\text{п}} = (\rho_{\text{щ}} - \rho_{\text{о.щ}}) / \rho_{\text{щ}} = 0,44$.

Коэффициент раздвижки зерен щебня $k_{\text{изб}}$ находим по табл. 2.10 при расходе цементного теста:

$$v_{\text{ц.т}} = B + C / \rho_{\text{ц}} = 163 + \frac{217}{3,1} = 232 \text{ л/м}^3$$

и водоцементном отношении $B/C=0,75$.

С учетом всех поправок и интерполяционных расчетов получаем $k_{\text{изб}}=1,25$.

Тогда расход щебня [4]:

$$Щ = \frac{1000}{\frac{v_{\text{щ}} \cdot k_{\text{изб}}}{\rho_{\text{о.щ}}} + \frac{1}{\rho_{\text{щ}}}} = \frac{1000}{\frac{0,44 \cdot 1,25}{1,45} + \frac{1}{2,61}} = 1315 \text{ кг/м}^3.$$

9. Расход песка:

$$\begin{aligned} P &= [(1000 - v_n) - (C/\rho_{\text{ц}} + B/\rho_{\text{в}} + Щ/\rho_{\text{п}})] \rho_{\text{п}} = \\ &= \left[(1000 - 41) - \left(\frac{217}{3,1} + \frac{163}{1} + \frac{1315}{2,61} \right) \right] 2,56 = 587 \text{ кг/м}^3. \end{aligned}$$

Количество воздухововлекающей добавки определяем по номограмме (рис. 3.16).

Рассмотренный выше метод успешно апробирован в практике строительных организаций при подборе составов гидротехнического бетона с воздухововлекающими добавками.

В составе автоматизированной системы управления качеством предприятий, выпускающих бетон и железобетонные изделия, возможно применение способа проектирования оптимальных составов на основе структурно-критериальных уравнений с помощью ЭВМ.

Таблица 2.21. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕСКОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ НА ОБЪЕКТАХ ТРЕСТА «РОВНОСЕЛЬСТРОЙ»

Карьер	Плотность, кг/дм ³	Объемно-насыпная масса в рыхлом состоянии, кг/дм ³	Объемно-насыпная масса в уплотненном состоянии, кг/дм ³	Удельная поверхность, мкм ⁻¹	Водопогребность по абсолютному объему	Стоимость песка, руб/м ³
Сарненский	2,66	1,51	1,81	0,0318	0,315	1,35
Млыновский	2,65	1,45	1,69	0,034	0,337	1,35
Клеванский	2,59	1,54	1,79	0,0289	0,287	1,35
Корецкий	2,64	1,42	1,76	0,0247	0,246	1,35
Дубновский	2,66	1,55	1,76	0,0308	0,305	1,35
Червоноармейский	2,61	1,52	1,81	0,0321	0,319	1,35
Коршевский	2,62	1,54	1,83	0,024	0,238	1,35
Тракайский	2,55	1,64	1,88	0,0162	0,163	4,21

В общем виде задача оптимизации составов, например гидротехнического бетона на материалах определенного качества с применением структурно-критериальных уравнений, может быть записана следующим образом [25]:

$$OK(\mathcal{K}) = a_0(m) L_{ок(\mathcal{K})} + b_0(m); R_б \geq aL_R + b;$$

$$M_{рз} \geq k(10^{F_k} - 1); V_n \geq f(p_{кап}); I \rightarrow \min, \quad (2.90)$$

где $OK(\mathcal{K})$ — удобоукладываемость бетонной смеси, выражаемая в единицах жесткости (с), или подвижности (см); $R_б$ — предел прочности бетона при сжатии, МПа; $M_{рз}$ — морозостойкость бетона при $k_{M_{рз}} = 0,85$ в возрасте 28 сут., цикл; V_n — водонепроницаемость бетона; I — целевая функция; $L_{ок(\mathcal{K})}$, L_R , F_k — соответственно критерий осадки конуса (жесткости), прочности, морозостойкости; $a_0(m)$, $b_0(m)$, a , b , k — коэффициенты критериальных уравнений.

Обработка экспериментального материала показала, что при «нормальной» структуре ($p_{кап} = 10\%$) водонепроницаемость бетона находится в пределах В2—В4, плотной ($p_{кап} = 7,5\%$) В6—В8 и особо плотной ($p_{кап} = 5,5\%$) В10—В12.

Целевой функцией может служить минимальный расход цемента, а при необходимости выбора вида материала — минимальная стоимость 1 м³ бетона.

Условие $C \rightarrow \min$ выполняется при значении $r = r_{\text{опт}}$, которое можно найти из условия равенства нулю первой производной критерия удобоукладываемости $dL_{\text{ок}}/dr = 0$. Таким образом, получаем дополнительное уравнение

$$r_{\text{опт}} = \varphi(B, C, v_a), \quad (2.91)$$

позволяющее совместно с уравнениями (2.90) решать задачу с четырьмя неизвестными (B, C, r, v_a) при ограничении по $r_{\text{кпак}}$.

Таблица 2.22. РАСЧЕТНЫЕ СОСТАВЫ БЕТОНА

Пески	Дальность транспортирования, км (авто-транспорт)	Состав бетона, кг/м ³				К-во СНВ в % от массы цемента	Стоимость материалов в руб. 1 м ³ бетона
		B	C	П	Щ		
$OК=4$ см $R_b=20$ МПа $R_{п}=40$ МПа							
Сарненский	—	364	212	576	1222	—	15,12
Млыновский	148	375	219	547	1221	—	21,52
Клеванский	75	355	206	592	1215	—	18,33
Корецкий	161	309	187	603	1328	—	22,44
Дубновский	150	367	213	584	1208	—	21,81
Красноармейский	195	370	215	570	1203	—	23,64
Коршевский	136	317	192	634	1274	—	21,35
Тракайский	—	259	180	709	1296	—	15,17
$Мрз 150$ $OК=4$ см $R_b=20$ МПа $R_{п}=40$ МПа							
Сарненский	—	364	202	571	1222	0,009	15,12
Млыновский	148	375	209	542	1221	0,010	21,52
Клеванский	75	355	196	587	1215	0,008	18,33
Корецкий	161	309	179	597	1328	0,008	22,44
Дубновский	150	367	204	580	1208	0,008	21,81
Красноармейский	195	370	205	565	1203	0,008	23,64
Коршевский	136	317	184	631	1274	0,007	21,35
Тракайский	—	259	175	704	1296	0,011	15,17

Критериальные уравнения учитывают множество факторов, влияющих на свойства бетона, и поэтому позволяют осуществлять оперативное проектирование и регулирование составов, чувствительное к изменению качественных параметров исходных материалов. После ввода необходимых исходных данных ЭВМ производит вычисления и на печать выдает таблицу, где указываются необходимые расходы цемента, воды, мелкого и крупного заполнителей, объем воздуха, расход добавки ПАВ и стоимость бетонной смеси.

Рассмотрим пример реализации метода для условий треста «Ровносельстрой».

Пример 2.4. Установить оптимальные составы бетона на песках различных карьеров и гранитном щебне крупностью 5—40 мм, определить песок,

обеспечивающий минимальную стоимость бетонной смеси. Характеристики песков приведены в табл. 2.21. Примеры составов бетона, рассчитанные на ЭВМ Минск-32 для одного из подразделений треста, приведены в табл. 2.22.

Функционирование подсистемы оптимального проектирования составов бетона с применением структурно-критериального метода в составе АСУ предполагает проведение строительной лабораторией необходимых экспрессных испытаний качества исходных материалов и готовой продукции, передачу их на ЭВМ, где определяется оптимальный вид исходных материалов и их соотношение. Фактические параметры качества бетонной смеси и бетона могут накапливаться на ЭВМ, образуя генеральный ряд для каждого вида заполнителя, и использоваться для постоянного совершенствования системы, повышения однородности качества готовой продукции.

ГЛАВА 3

КИБЕРНЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СВОЙСТВ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ СОСТАВОВ БЕТОНА

При структурно-критериальном подходе к прогнозированию и проектированию составов бетона неизбежен ряд допущений, обусловленных тем, что нет достоверных сведений о физическом механизме формирования свойств бетона. Поэтому такой подход не исключает, а наоборот, для ряда задач предполагает необходимость применения кибернетического метода, сущность которого заключается в абстрагировании от сложных физических закономерностей изучаемой системы, получении математической модели и использовании ее затем для анализа, управления и оптимизации системы.

Кибернетический метод включает выполнение и статистическую обработку алгоритмизированного эксперимента, решение уравнений регрессии и их технологическую интерпретацию. Его целесообразно применять при решении сложных рецептурно-технологических задач, где необходимы адекватные количественные зависимости выходных параметров от заданного набора факторов с оценкой степени их индивидуального и совместного влияния. Использование этого метода эффективно при алгоритмизации всей процедуры обработки экспериментальных данных и применении для необходимых вычислений ЭВМ.

Приведем результаты исследований, цель которых — разработка и практическая апробация кибернетического метода проектирования составов бетона, обеспечивающих комплекс проектных показателей при минимально возможном расходе цемента, и их всесторонний технологический анализ.

На основе комплекса многофакторных полиномиальных моделей решены важные практические задачи:

1) разработан широкий диапазон оптимальных составов бетона нормального и ускоренного твердения на типовых материалах, обеспечивающих при заданных подвижности (жесткости), марке и нормальной густоте цемента требуемые показатели прочности, морозостойкости и водонепроницаемости;

2) дан развернутый анализ индивидуального и совместного влияния основных технологических факторов на важнейшие свойства бетона;

3) обоснованы для типовых материалов оптимальные соотношения прочности, морозостойкости и водонепроницаемости бетона при введении добавок ПАВ в бетонную смесь и без них.

Эти задачи относятся к наиболее сложным из цикла задач прогнозирования свойств и проектирования оптимальных составов бетона с применением математического моделирования, решенных нами [26—31]. Использование для их решения традиционных методов нерационально из-за трудоемкости экспериментальных работ или вообще не представляется возможным.

3.1. Применение математического моделирования для проектирования составов бетона

Уже первые работы по применению математического моделирования в технологии бетона с использованием факторного планирования эксперимента были направлены на решение задач проектирования составов бетона. Сначала методами линейного программирования, а затем с помощью ротатабельного планирования второго порядка [53] была решена задача оптимизации зернового состава сухой смеси заполнителей. Позднее для оптимизации состава смеси зерен различных фракций и изучения зависимости прочности бетона от зернового состава заполнителей предложены симплексно-решетчатые планы [53], которые в дальнейшем использовали и для других частных задач, например, установления оптимальной композиции добавок, прогнозирования морозостойкости и т. п. [89]. Симплексное планирование применяли также при проектировании составов некоторых видов бетона и других многокомпонентных композиций. Однако в этих работах задача оптимизации сводилась к поиску соотношения компонентов, обеспечивающих сочетание требуемых свойств материалов. При этом не ставилась цель минимизировать расход одного из компонентов, в частности цемента, не учитывались факторы качества компонентов.

Первую попытку применения математического планирования эксперимента для решения задачи выбора соотношения компонентов, обеспечивающих требуемую прочность бетона и удобоукладываемость бетонной смеси при минимальном расходе це-

мента, сделал Э. Г. Соркин [90]. Он получил математические модели жесткости бетонной смеси в зависимости от расхода воды, водоцементного отношения, соотношения песка и щебня, нормальной густоты цементного теста, а также модели прочности бетона при сжатии с учетом влияния факторов состава и активности цемента.

Совместное рассмотрение уравнений жесткости смеси и прочности бетона позволило предложить [90] новый метод проектирования составов бетона. Сущность его сводится к установлению по аналитическим и графическим зависимостям, вытекающим из модели прочности, значения B/C , учитывая проектную марку бетона и активность цемента, а затем соотношения между заполнителями, обеспечивающего минимальный расход воды для заданных значений жесткости, нормальной густоты и водоцементного отношения. Однако решение задачи этим методом неоднозначно при условии значительного влияния на прочность водосодержания смеси. В работе [90] рассмотрено также решение оптимизации состава бетонной смеси по стоимости материалов и удельной стоимости. Для этого, варьируя факторы состава, найдены соответствующие уравнения регрессии и графическим путем решены компромиссные задачи при ограничениях по прочности бетона и жесткости смеси.

Этот метод проектирования составов бетона рассматривался и в других работах [71, 95]. Так, Г. В. Михайленко [71] получил квадратичные модели жесткости бетонной смеси в широком диапазоне значений (от 5 до 600 с). Для устранения неадекватности модели, вызванной неоднородностью дисперсии в столь большом интервале жесткости, введено логарифмическое преобразование функции отклика. Оптимизацию состава бетона предложено [71] осуществлять при следующей последовательности действий:

- 1) экспериментальная оценка констант в формуле Болемея-Скрамтаева;
- 2) определение минимального C/B , обеспечивающего заданную прочность бетона по зависимости $R_b = f(C/B)$;
- 3) построение модели жесткости и изолиний одинаковой удобоукладываемости в координатах доля песка в смеси заполнителей r — водосодержание B для требуемых значений C/B ;
- 4) отыскание оптимального значения r , обеспечивающего при заданном C/B требуемую жесткость или осадку конуса с минимальным расходом воды.

Этот подход отличается от предложенного Э. Г. Соркиным лишь несколько другим определением C/B . Оба метода исходят из допущения, что водосодержание и объемная концентрация цементного камня не влияют при постоянном C/B на прочность, и это позволяет существенно упростить задачу оптимизации. Однако такое допущение не является строгим для высокоподвижных и особо жестких смесей, а для бетонов, твердеющих

при форсированных режимах тепловой обработки, вообще не приемлемо.

В одной из наших работ [27] предложено графоаналитическое решение такой задачи с учетом возможного влияния на прочность бетона наряду с цементно-водным отношением и водосодержанием. Сущность его заключается в следующем:

1. Определяем квадратичную модель удобоукладываемости бетонной смеси, которую решаем относительно расхода воды. Это позволяет при различных расходах цемента определить значения r , обеспечивающие минимальную водопотребность смеси для получения заданной удобоукладываемости.

2. С применением двухфакторного плана реализуем опыты и находим зависимость прочности бетона от расхода воды и цемента в виде полинома второй ($C/B \geq 2,5$) или первой степени ($C/B < 2,5$). При назначении состава смеси в каждой точке матрицы выбираем оптимальное значение r на основе предварительных расчетов из модели удобоукладываемости.

3. Расход цемента (C) для получения определенной прочности (R_6) определяем из кривой $R_6 = f(C/B)$ при заданной удобоукладываемости. Водосодержание и $r_{\text{опт}}$ бетонной смеси можно найти при требуемом расходе цемента из соответствующих кривых, полученных путем соединения экстремальных значений $B = f(r)$ при различных расходах цемента.

Рассмотренный метод позволяет выполнить оптимизацию состава. При этом, однако, используется неоптимальный алгоритм, требующий для построения графиков значительного количества вычислений.

В дальнейшем предложено [26] более совершенное аналитическое решение задачи оптимизации составов бетона. Оно заключается в том, что находят квадратичные модели удобоукладываемости бетонной смеси J и прочности бетона R_6 в зависимости от расхода воды B , цемента C и доли песка в смеси заполнителей r :

$$J = f(B, C, r); \quad (3.1) \quad R_6 = \varphi(B, C, r). \quad (3.2)$$

Так как фактором, определяющим минимальный расход воды, а следовательно, и цемента при данной его активности и нормальной густоте, является доля песка в смеси заполнителей, фактор r рассматриваем как параметр оптимизации. В области варьирования этот параметр принимает ряд значений, которому соответствует такое же количество поверхностей отклика. Рассматривая выражение

$$f_1 = (B, C, r, J) = 0 \quad (3.3)$$

как однопараметрическое семейство поверхностей, получаем систему уравнений

$$\begin{cases} f_1(B, C, r, J) = 0, \\ \partial f_1 / \partial r = 0. \end{cases} \quad (3.4)$$

Совместное решение системы (3.4) с уравнением прочности позволяет найти оптимальные значения расхода воды и цемента, а также доли песка в смеси заполнителей и получить бетонную смесь заданной подвижности или жесткости, а бетон требуемой прочности.

Цикл исследований по оптимизации составов бетона с применением полиномиальных моделей, учитывающих структурные характеристики, выполнен в работах Ю. М. Баженова, Г. И. Горчакова, Л. А. Алимова, В. В. Воронина [5, 87]. Оптимальный состав бетона предлагается определять решением системы уравнений регрессии, в которых учитывается водопотребность заполнителя в бетоне, истинное V/C цементного камня и его объемная концентрация. Возможность однозначного решения при этом достигается при условии, что число уравнений равно числу неизвестных. Оптимальное значение r рекомендуется находить традиционным расчетным методом с учетом коэффициента раздвижки.

Выполнен ряд разработок по оптимизации составов не только обычных тяжелых, но также легких и специальных видов бетона [89]. Они, как правило, сводятся к построению интерполяционных уравнений, связывающих выходные параметры с факторами состава, и последующему исследованию поверхностей отклика обычно с помощью канонического анализа или изолиний. Предложен также метод проектирования оптимальных составов легкого бетона с применением элементов предельного анализа [80].

Математическое моделирование позволяет решать задачи проектирования составов с большим разнообразием исходных условий и факторов. Однако в большинстве работ по поиску оптимальных составов оно применяется еще в отрыве от других принципов системного анализа. В ряде задач моделированию не предшествует анализ качественной структуры процесса, нет объективного обоснования отбора факторов, выбора показателей и критерия эффективности, четкой формулировки цели оптимизации, не учитываются все необходимые ограничения, что существенно снижает ценность и строгость оптимизационных решений.

Оптимизацию при проектировании состава бетона с применением математических моделей в большинстве работ предполагается выполнять с помощью графических построений. Не отрицая уместность графических решений, особенно в сложных задачах оптимизации, во многих случаях все же следует отдать предпочтение аналитическим и графо-аналитическим методам.

Графическая интерпретация особенно ценна при номографировании результатов, найденных при помощи аналитического решения системы математических моделей. В ряде работ построение полиномиальных моделей не обусловлено технологи-

ческой постановкой задачи и может быть вполне заменено традиционным подходом.

Применительно к бетону, проектируемому по нескольким выходным параметрам, например гидротехническому, задачи оптимизации составов особенно сложны и строго могут быть решены лишь на основе системы математических моделей. Первая попытка решения задачи определения состава, обеспечивающего жесткость бетонной смеси, прочность и морозостойкость бетона с применением простейших полиномиальных моделей, сделана в работе [87]. В качестве факторов в этих моделях избраны структурные характеристики — концентрация цементного камня и его V/C в бетоне.

Имеется определенный опыт по моделированию отдельных свойств гидротехнического бетона многофакторными полиномиальными моделями. Так, в работе И. И. Гранковского построены шестифакторные модели удобоукладываемости и прочности гидротехнического бетона в 28- и 180-суточном возрасте в зависимости от расхода цемента, цементно-водного отношения, доли песка и смеси заполнителей, содержания примесей пыли в заполнителях, гравия фракции 40—80 мм и сульфитно-спиртовой барды. Определенный интерес с точки зрения технологии бетона представляют количественные зависимости, найденные при математическом моделировании водонепроницаемости, модуля упругости, меры ползучести, предельной растяжимости и других физико-механических характеристик.

Несмотря на сравнительно высокий уровень априорной информации, без математического моделирования невозможно достаточно полно качественно, а тем более количественно оценить совокупность взаимосвязей между технологическими факторами, определяющими эффективность составов бетона при различных режимах твердения. Комплекс моделей, использованных для исследования режимов тепловой обработки, получен впервые в работе [58]. Однако эта работа имела ряд существенных методических недостатков, что не позволило достаточно строго подойти к задачам математического описания свойств пропаренного бетона и режимов тепловой обработки. Данные задачи решались в различных аспектах многими исследователями, в том числе и нами [39—43].

Значительный вклад в разработку методологических основ математического моделирования применительно к технологии бетона и железобетона внесли Ю. М. Баженов, В. А. Вознесенский, И. Г. Зедгинидзе, О. П. Мчедлов-Петросян, Э. М. Репьев, Э. Г. Соркин.

В нашей работе методология математического моделирования является базой системного анализа для выбора наиболее рациональных технологических решений при оптимальном проектировании свойств бетона. Мы стремились к наиболее полному использованию возможностей математико-статистичес-

ких методов как инструмента решения конкретных и сложных технологических задач.

3.2. Качественная структура связей свойства—режим—состав бетона. Исходные условия математического моделирования

При априорном изучении качественной структуры связей, определяющих свойства бетона, для последующего математического моделирования и оптимизации важно выбрать главные управляемые факторы, а также оценить возможную кривизну поверхности отклика в данной области варьирования. Сравнительно высокий уровень информации о влиянии факторов состава и режимов твердения на основные свойства бетона позволяет проводить качественный анализ и моделирование сразу в почти стационарной области, что существенно облегчает поиск оптимума.

На основе многочисленных исследований можно определить три основные группы факторов, участвующих в формировании свойств бетона: 1) качественные параметры исходных компонентов; 2) количественные параметры смеси; 3) режимные параметры процессов твердения.

Полностью учесть все факторы нельзя как при традиционном, так и при системном подходе к оптимизации, хотя в последнем случае намного больше таких возможностей. Задача заключается в том, чтобы в зависимости от поставленной цели правильно выбрать регулируемые факторы, из них отобрать наиболее существенные для данного комплекса выходных параметров и зафиксировать остальные, а также учесть нерегулируемые, но влияющие факторы. Отдельные технологические факторы могут быть скоррелированы между собой, и тогда анализ их совместного влияния на выходные параметры системы нецелесообразен.

При оптимизации составов смесей, обеспечивающих комплекс характеристик для бетона выходных параметров, наиболее важны факторы первой группы — химико-минералогический и вещественный состав цемента и добавок, их дисперсность, структурно-минералогические особенности и крупность заполнителей; второй — расход воды и цементно-водное отношение, соотношение заполнителей, а также содержание добавок; третьей — длительность и температура твердения.

Химико-минералогический и вещественный состав цемента, его тонкость измельчения проявляются в интегральных показателях качества цемента — активности и нормальной густоте. Однако строгих общих количественных зависимостей между этими параметрами нет вследствие чрезвычайно сложного ме-

ханизма формирования структуры цементного теста и камня. Зависимости статистического характера можно установить лишь для цемента каждого конкретного завода. При постоянной активности цементы различного химико-минералогического состава по-разному воздействуют на свойства бетона и особенно на прочность после тепловой обработки, морозостойкость, коррозионную стойкость и т. п. В соответствии с современными представлениями особенно существенно на указанные свойства влияют содержание в цементе трехкальциевого алюмината, а также соотношение алюминатной и алитовой фаз. По нашим данным [21], в общем виде зависимость прочности бетона от активности цемента имеет степенной характер, при этом показатель степени уменьшается и приближается к единице по мере увеличения общей длительности твердения.

Влияние нормальной густоты цемента сказывается прежде всего на водопотребности бетонной смеси и, как следствие, на всех основных свойствах бетона. При моделировании следует учитывать ее влияние на критическое C/W , выше которого нарушается правило постоянства водопотребности. С нормальной густотой тесно связано содержание в цементе активных минеральных добавок. Роль нормальной густоты в процессах структурообразования цементного камня глубоко раскрыта И. Н. Ахвердовым [1].

В технологии бетона часто применяют добавки пластифицирующих и воздухововлекающих ПАВ. Их влияние на свойства бетона достаточно хорошо изучено. При поиске оптимальных составов бетонных смесей важно учесть экстремальный характер влияния ПАВ на свойства бетона при постоянной удобоукладываемости. Размещение и величина экстремума в координатах свойства—концентрация ПАВ зависит от вида добавки, уровней, на которых находятся другие факторы состава, а также значения заданной удобоукладываемости [26]. Так, эффект повышения морозостойкости при введении СНВ, очевидно, более высок для подвижных относительно «тощих» бетонных смесей [32]. Эффект СДБ, действие которой в основном обусловлено не дополнительным воздухововлечением, а пептизацией цементного теста, лучше заметен в умеренно «жирных» смесях [32]. Более универсальны добавки комплексных ПАВ [54, 74].

При тепловой обработке влияние добавок ПАВ различно и зависит от природы, воздухововлекающей способности, состава смеси и сочетания режимных параметров. Большинство исследователей сходятся на том, что действие ПАВ при оптимальной концентрации может быть эффективным при умеренных и удлиненных режимах, включающих предварительное выдерживание. Эффективность ПАВ при тепловой обработке увеличивается при дополнительном введении в цемент или бетонную смесь ускорителей твердения [33, 34, 54].

Из факторов второй группы наиболее важные водосодержание бетонной смеси и цементно-водное отношение. Расход воды и цементно-водное отношение характеризуют как качество, так и количество цементного теста и соответственно цементного камня в бетоне. Свойства бетонной смеси и бетона по-разному связаны с этими двумя факторами. Если для удобоукладываемости смесей доминирующим является расход воды и влияние C/V заметно ощущается лишь с некоторого предела, то для прочностных свойств бетона во всем диапазоне решающее воздействие оказывает цементно-водное отношение.

На морозостойкости и водонепроницаемости бетона наряду с цементно-водным отношением существенно сказывается и начальное водосодержание смеси [16]. В связи с развитием деструктивных процессов воздействие водосодержания на прочность и другие свойства бетона становится весомым при форсированных режимах тепловой обработки [70].

Влияние качественных и количественных параметров системы цемент — вода на бетонную смесь и бетон необходимо рассматривать совместно. Известно, например, чем меньше плотность цементного камня, тем большим должно быть его содержание для обеспечения требуемых значений прочности, морозостойкости и водонепроницаемости бетона. Вместе с тем имеется определенное оптимальное количество цементного камня при постоянных параметрах качества и превышение его не дает ощутимого эффекта как с позиций прочности, так и стойкости бетона. Это положение тесно связано с современными представлениями структурной теории бетона [5, 87].

Кроме рассмотренных выше, существует много других технологических факторов состава, оказывающих значительное влияние на свойства бетона. Это прежде всего большинство параметров качества заполнителей (минералогия, крупность, форма, зерновой состав, содержание отдельных включений, прочность, водопоглощение, адгезионные свойства) и их соотношение. Особый интерес с точки зрения оптимизации состава представляют хорошо регулируемые факторы, такие как крупность, зерновой состав и соотношение заполнителей.

Роль зернового состава и соотношения заполнителей в формировании свойств бетона нельзя считать достаточно изученной. Установлен экстремальный характер влияния доли песка в смеси заполнителей на удобоукладываемость бетонной смеси при постоянном водосодержании. В общем случае оптимальным считается такое соотношение заполнителей, которое обеспечивает минимальную водопотребность и, как следствие, минимальный расход цемента для обеспечения требуемых свойств при условии предотвращения процесса расслоения смеси. Значение оптимальной доли песка смещается при изменении содержания цементного теста в смеси, водоцементного отношения и содержания вовлеченного воздуха.

Из технологических факторов третьей группы решающее влияние на свойства бетона оказывает длительность твердения. При тепловой обработке, кроме общей продолжительности процесса, существенное значение имеют температура и структура режимных параметров, т. е. соотношение времени предварительной выдержки, длительности изотермического прогрева, скорости подъема температуры и охлаждения [70]. Влияние режимных параметров твердения на свойства бетона тесно связано с особенностями исходных материалов и составом смеси. Согласно современным представлениям, необходимая общая длительность и соотношение режимных параметров пропаривания, а также удельный расход вяжущего для получения равнопрочных бетонов зависят от вида и химико-минералогического состава цемента. Основные деструктивные процессы в бетоне возникают в период подъема и понижения температуры, а набор прочности — в период изотермического прогрева. Отсюда вытекает важность правильного назначения отдельных режимных параметров процесса. Известно, что оптимальная длительность предварительного выдерживания может колебаться от 2 до 8 ч и более. Ее рекомендуется сокращать по мере повышения марки цемента и температуры среды, снижения В/Ц, уменьшения скорости подъема температуры, введения ускорителей, пропаривания изделий сложного профиля и т. д. Аналогично необходимость учета сложных взаимодействий с другими технологическими факторами возникает при выборе оптимальной скорости нагрева, длительности и температуры изотермической выдержки.

Таким образом, краткий анализ априорной информации о закономерностях свойства—режим твердения—состав бетона позволяет сделать выводы, важные для математического моделирования: 1) технологические факторы влияют на свойства бетона комплексно, взаимодействуя друг с другом; 2) характер воздействия большинства факторов в достаточно широком диапазоне является нелинейным и для математического описания основных свойств бетонной смеси и бетона целесообразно применять полиномиальные уравнения второго порядка.

Наша задача — получить локально-интегральные полиномиальные модели свойств бетонной смеси и бетона на эталонных стандартных материалах для развернутого технологического и технико-экономического анализа, а также разработки составов бетона с комплексом свойств (прочности, морозостойкости, водонепроницаемости) при заданной удобоукладываемости бетонной смеси.

В качестве регулируемых технологических факторов при планировании экспериментов избраны водосодержание бетонной смеси, цементно-водное отношение, максимальная крупность щебня, расход добавки СНВ, нормальная густота и активность

цемента, продолжительность тепловой обработки и нормального твердения.

Влияние особенностей заполнителей и эффект пластифицирующих добавок учитывали через изменение водопотребности бетонной смеси с помощью поправочных коэффициентов, температуру и влажность среды, длительность предварительного выдерживания, скорость подъема температуры и охлаждения и ряд других факторов фиксировали в процессе экспериментальных работ на определенном и практически неизменном уровне.

3.3. Построение и технологический анализ математических моделей свойств бетонной смеси и бетона

Основным при решении задач проектирования оптимальных составов бетона является построение комплекса математических моделей свойств бетонной смеси и бетона. Математическое моделирование при кибернетическом подходе сводится к получению определенного представления о поверхности отклика факторов в виде функции

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k), \quad (3.5)$$

где y — выходной параметр системы; x_1, \dots, x_k — переменные факторы этой же системы.

Наиболее удобно представление неизвестной функции отклика полиномом

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j, \quad (3.6)$$

где b_0, b_i, b_{ii}, b_{ij} — статистические оценки истинных коэффициентов регрессии.

Вид и степень полинома выбирают на основании теоретического анализа, а затем уточняют статистически. Оценки коэффициентов регрессии полиномиальных моделей находят при обработке результатов, выполненных в соответствии с основными принципами и рекомендациями математической теории эксперимента.

Основное технологическое свойство бетонной смеси — удобоукладываемость, оцениваемая показателями подвижности или жесткости. Построение адекватной модели удобоукладываемости бетонной смеси, как показали наши исследования [26], возможно в сравнительно узком диапазоне жесткости или подвижности. Поэтому для оптимизации широкого диапазона составов бетона более целесообразно построение модели водопотребности

бетонной смеси при оптимальной доле песка $r_{\text{опт}}$ и планируемом показателе удобоукладываемости.

Важнейшими проектными показателями бетона являются прочность при сжатии, морозостойкость и водонепроницаемость. Для бетонов, подвергаемых тепловой обработке, нормируют также отпускную прочность. Зависимости этих параметров от технологических факторов хорошо моделируются полиномиальными уравнениями второго порядка [26].

Для постановки эксперимента применены близкие к D -оптимальным планы второго порядка Na_5 и B_4 , требующие сравнительно небольшого количества опытов при удовлетворительных статистических характеристиках [3].

Цель выбора интервалов варьирования заключалась в описании свойств достаточно широкой области составов, включая подвижные, малоподвижные и умеренно жесткие смеси. Для этого использована условно непрерывная шкала удобоукладываемости:

Уровень варьирования	-1	-0,4	0	+0,4	+0,8	+1
Показатель удобоукладываемости	жесткость, с		осадка конуса, см			
	80	2	5	8	11	13

Измерение жесткости, осадки конуса, объема вовлеченного воздуха, предела прочности при сжатии, морозостойкости и водонепроницаемости производили в соответствии с ГОСТ 10180-78, ГОСТ 10181-62, ГОСТ 10060-76 и ГОСТ 12730-78. Рассчитывая коэффициенты, использовали средние арифметические значения полученных для каждой строчки матрицы показателей выходных параметров.

Значение доли песка в смеси заполнителей r для каждой строчки матрицы подбирали из условия минимальной водопотребности при заданной удобоукладываемости. В случае введения воздухововлекающей добавки определяли сначала объем вовлеченного воздуха при заданных условиях варьирования, а затем составы бетонов пересчитывали по методу абсолютных объемов. При построении моделей прочности, морозостойкости и водонепроницаемости бетона принимали допущение о линейном влиянии активности на исследуемые свойства, что существенно упрощает учет активности цемента при планировании эксперимента: в точках матрицы с $R_{ц} = +1$ (в кодированном выражении) применяли цемент более высокой активности, а $R_{ц} = -1$ — более низкой; для точек с $R_{ц} = 0$ показатели свойств бетона определяли как полусумму соответствующих значений при цементах высокой и низкой активности. Допущение о линейном воздействии активности цемента на прочность бетона в широкой области составов при нормальном твердении и нефорсированной тепловой обработке можно считать достаточно

строгим [4]. Влияние активности цемента на морозостойкость и водонепроницаемость бетона сравнительно невелико и допущение о ее линейном влиянии также не может существенно исказить точность моделей.

Химико-минералогический, вещественный состав цемента и его дисперсность сказываются на подвижности и жесткости бетонной смеси через показатель нормальной густоты, который можно считать реологической характеристикой цемента. Нормальную густоту цемента в пределах области варьирования изменяли за счет регулирования количества активной минеральной добавки (опоки) при постоянном химико-минералогическом составе цемента.

Для опытов применяли портландцемент Здолбуновского цементно-шиферного комбината. По составу клинкера его можно отнести к типичным представителям нормальных среднеалюминатных цементов ($C_3S=55\div 59\%$; $C_2S=16\div 20\%$; $C_3A=6\div 8\%$).

Отдельную серию моделей свойств бетона получили, применяя гидрофобный цемент, смолотый в лабораторной мельнице. В состав цемента по массе вводили клинкер Здолбуновского цементно-шиферного комбината (85%), доменный гранулированный шлак (10%) и гипсовый камень (5% или в пересчете на SO_3 — 2,5%). При помоле в цемент вводили также гидрофобизирующую добавку — раствор кубовых остатков высокомолекулярных жирных кислот в минеральном масле (0,15... 0,20% от массы цемента).

Крупным заполнителем служил гранитный щебень максимальной крупностью 20, 40 и 70 мм. При максимальной крупности 40 мм щебень получали смешиванием фракций 5... 20 мм и 20... 40 мм при соотношении 1:1, 70 мм — фракций 5... 20 мм, 20... 40 мм, 40... 70 мм при соотношении 1:1:1.

Мелким заполнителем был кварцевый песок с модулем крупности 2,1 и водопотребностью 7,5%. Заполнители удовлетворяли требованиям ГОСТ 8736-77 и ГОСТ 8267-75.

Образцы бетона—близнецы—твердели в нормальных условиях, а при тепловой обработке в лабораторных пропарочных камерах с автоматизированным управлением режимами, затем подвергались испытанию на прочность, морозостойкость и водонепроницаемость. Для определения прочности и морозостойкости бетона применяли образцы-кубы с размером ребра 15 см.

Тепловой обработке образцы бетона на гидрофобном цементе не подвергали. Ранее выполненные исследования показали, что при тепловой обработке бетона на гидрофобном цементе для предотвращения недобора прочности целесообразно с водой затворения вводить ускорители твердения [34]. Активизировать гидрофобный цемент можно введением ускорителей твердения, например хлористого кальция (1% массы цемента), а также

при измельчении клинкера совместно с гидрофобизирующей добавкой [33]. При этом сохраняется как эффект гидрофобизации, так и интенсификации помолы.

На основе известных рекомендаций [82] в пределах общей продолжительности тепловлажностной обработки длительность предварительного выдерживания принимали 5 ч (при общей длительности 10 ч она составила 3 ч); подъем температуры среды в камерах 15° С в час. Охлаждение образцов производили в течение 1 ч до температуры 60° С, а извлечение их из форм

Таблица 3.1. УСЛОВИЯ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ СВОЙСТВ БЕТОННОЙ СМЕСИ И БЕТОНА

Факторы	Уровни варьирования			Интервал варьирования
	-1	0	+1	
Начальное водосодержание, кг/м ³ (x ₁)	150	180	210	30
Цементно-водное отношение, (x ₂)	1,3	2,1	2,9	0,8
Расход цемента, кг/м ³ (x ₂)	234	378	522	144
Максимальная крупность щебня, мм (x ₃)	10	40	70	30
Расход добавки СНВ, кг/м ³ (x ₄)	0	0,06	0,12	0,06
Нормальная густота, % (x ₅)	24,6	27,2	29,8	2,6
Активность цемента, МПа (x ₆)	34,5	41,2	47,9	6,7
Продолжительность тепловой обработки, ч (x ₇)	10	14	18	4
Длительность нормального твердения, сут (x ₇)	lg 28	lg 71	lg 180	lg 2,6
Условная удобоукладываемость (x ₈)	-1	0	+1	1

Примечание. Факторы x₁, x₂, x₃, x₄, x₅ — учитывались при построении модели доли песка в смеси заполнителей; x₁, x₂, x₃, x₄, x₅ — содержание эмульгированного воздуха; x₂, x₃, x₄, x₅, x₈ — водопотребности бетонной смеси; x₁, x₂, x₄, x₆, x₇ — прочности, морозостойкости и водонепроницаемости бетона нормального твердения; x₁, x₂, x₄, x₆, x₇ — прочности, морозостойкости и водонепроницаемости бетона ускоренного твердения.

при перепаде температуры между поверхностью изделий и окружающей средой не более 40° С. Таким образом, в пределах наиболее характерной области режимов тепловой обработки варьировали длительность изотермического прогрева при 80° С. Условия планирования экспериментов приведены в табл. 3.1. По результатам опытов построено 14 квадратичных моделей вида (3.6) на обычном портландцементе с минеральными добавками и на гидрофобном портландцементе (ГОСТ 10178-76), в том числе модели объема вовлеченного, эмульгированного добавкой СНВ воздуха \hat{y}_1 , водопотребности бетонной смеси \hat{y}_2 , \hat{y}_4 , оптимальной доли песка \hat{y}_3 (табл. 3.2), а также отпускной \hat{y}_5 и проектной \hat{y}_6 прочности, морозостойкости \hat{y}_7 и водонепроницае-

мости \hat{y}_8 бетона, подвергнутого тепловой обработке (табл. 3.3), проектной прочности (\hat{y}_9, \hat{y}_{10}), морозостойкости ($\hat{y}_{11}, \hat{y}_{12}$), и водо- непроницаемости ($\hat{y}_{13}, \hat{y}_{14}$) бетона нормального твердения (табл. 3.4).

Таблица 3.2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОБЪЕМА ЭМУЛЬГИРОВАННОГО ВОЗДУХА, ВОДОПОТРЕБНОСТИ, ОПТИМАЛЬНОЙ ДОЛИ ПЕСКА В СМЕСИ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ

Вид цемента	Выходной параметр	Уравнение регрессии
Портланд-цемент	Объем эмульгированного воздуха (\hat{y}_1), %	$2,27+0,72x_1-0,63x_2-0,47x_3+2,14x_4-0,18x_5-0,20x_1^2+0,24(x_2')^2+0,17x_3^2-0,22x_4^2-0,09x_5^2-0,13x_1x_2+0,71x_1x_4-0,61x_2x_4-0,46x_3x_4-0,13x_3x_5-0,19x_4x_5. \quad (3.7)$
	Водопотребность (\hat{y}_2), кг/м ³	$169,2+26,4x_8+13,4x_2-20x_3-8,3x_4+9,3x_5-5,2x_8^2+5,8x_2^2+8,8x_3^2+2,8x_4^2+3,8x_5^2+x_8x_2-1,1x_8x_3+2,6x_8x_5-x_2x_3+3,1x_2x_4+2,25x_2x_5-1,1x_3x_5+x_4x_5. \quad (3.8)$
	Оптимальная доля песка в смеси заполнителей (\hat{y}_3)	$0,284+0,03x_1-0,039x_2-0,02x_3-0,009x_4+0,007x_1^2+0,016x_2^2+0,008x_3^2+0,006x_4^2-0,005x_1x_2+0,01x_1x_3+0,009x_2x_4-0,004x_3x_4+0,007x_4x_5. \quad (3.9)$
Гидрофобный	Водопотребность (\hat{y}_4), кг/м ³	$163,6+36,2x_8+2,4x_2-22,1x_3+1,7x_5+3,2x_8^2+8,2x_2^2+5,7x_3^2+5,2x_5^2+1,1x_8x_2-4,6x_8x_3. \quad (3.10)$

Статистические исследования показали, что полученные модели можно считать адекватными при 95%-ной доверительной вероятности, а приведенные в табл. 3.2—3.4 коэффициенты зна-

чимыми при 5% -ном уровне значимости. Формулы, позволяющие перейти к натуральным значениям факторов в полученных моделях, приведены в табл. 3.5.

Комплекс полиномиальных моделей физико-механических свойств бетонной смеси и бетона в сочетании с моделями оптимальной доли песка, водопотребности объема эмульгирован-

Таблица 3.3. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СВОЙСТВ БЕТОНА, ПОДВЕРГНУТОГО ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКЕ

Выходной параметр	Уравнение регрессии
Отпускная прочность (предел прочности бетона при сжатии через 4 ч после тепловой обработки) (\hat{y}_5), МПа	$22,38 - 1,39x_1 + 12,55x_2 - 2,14x_4 + 3,41x_6 +$ $+ 3,05x_7 - 0,54x_1^2 - 0,19x_2^2 - 0,14x_4^2 - 0,19x_6^2 -$ $- 1,09x_7^2 - 0,67x_1x_2 - 0,23x_1x_4 - 0,63x_1x_6 +$ $+ 0,97x_1x_7 + 2,11x_2x_6 + 1,28x_2x_7. \quad (3.11)$
Проектная прочность (предел прочности пропаренного бетона при сжатии в возрасте 28 сут) (\hat{y}_6), МПа	$31,05 - 1,98x_1 + 14,59x_2 - 3,35x_4 + 4,03x_6 + 1,93x_7 -$ $- 0,49x_1^2 - 0,79x_2^2 - 0,49x_4^2 + 0,06x_6^2 - 0,19x_7^2 -$ $- 0,86x_1x_2 - 1,3x_1x_6 + 1,09x_2x_4 + 2,76x_2x_6 +$ $+ 0,96x_2x_7. \quad (3.12)$
Морозостойкость (\hat{y}_7), циклы	$292,1 - 45,4x_1 + 171,7x_2 + 45,1x_4 + 5,4x_6 + 19x_7 +$ $+ 0,3x_1^2 - 2,7x_2^2 - 2,7x_4^2 + 8,8x_6^2 - 2,7x_7^2 -$ $- 10,6x_1x_2 + 20,6x_1x_4 + 21,6x_6x_7. \quad (3.13)$
Водонепроницаемость (\hat{y}_8), МПа	$0,55 + 0,07x_1 + 0,36x_2 + 0,01x_4 + 0,05x_6 + 0,05x_7 -$ $- 0,04x_1^2 + 0,038x_2^2 + 0,02x_4^2 + 0,01x_6^2 + 0,004x_7^2 +$ $+ 0,07x_1x_2 - 0,01x_1x_4 + 0,03x_1x_6 - 0,02x_2x_4 +$ $+ 0,05x_2x_6 - 0,01x_4x_6 + 0,04x_4x_7 - 0,02x_6x_7. \quad (3.14)$

ного воздуха позволяет выполнить развернутый технологический анализ основных зависимостей, связывающих свойства, факторы состава бетона и режимы его твердения. Из рис. 3.1—3.3 хорошо видно, что в моделях концентрируются и количественно отражаются известные основные закономерности и положения технологии бетона. Так, анализ моделей водопотребности, воздухоудержания и оптимальной доли песка дает возможность получить зависимости, отражающие правило постоянства водо-

Таблица 3.4. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СВОЙСТВ БЕТОНА
НОРМАЛЬНОГО ТВЕРДЕНИЯ

Вид цемента	Выходной параметр	Уравнение регрессии
Портланд-цемент	Прочность при сжатии (\hat{y}_9), МПа	$37,29 - 1,61x_1 + 16,23x_2 - 3,66x_4 +$ $+ 5,57x_6 + 5,9x_7 - 0,44x_1^2 - 0,93x_2^2 -$ $- 0,23x_4^2 - 0,78(x_7)^2 - 0,99x_1x_2 -$ $- 0,87x_1x_4 - 1,37x_1x_6 + 0,42x_1x_7 +$ $+ 1,17x_2x_4 + 2,75x_2x_6 + 1,95x_2x_7 +$ $+ 0,59x_4x_6 + 0,89x_6x_7. \quad (3.15)$
	Морозостойкость (\hat{y}_{10}), циклы	$394,2 - 71x_1 + 207,6x_2 + 121,6x_4 +$ $+ 21,9x_6 + 71,4x_7 - 3,7x_1^2 - 11,7x_2^2 +$ $+ 18,8x_4^2 + 11,8x_6^2 + 2,2(x_7)^2 -$ $- 26,2x_1x_2 + 16,8x_1x_4 - 18,4x_1x_7 +$ $+ 17,8x_2x_4 + 27,3x_2x_7 + 18,3x_4x_7 +$ $+ 13,9x_6x_7. \quad (3.16)$
	Водонепроницаемость (\hat{y}_{11}), МПа	$0,81 + 0,08x_1 + 0,52x_2 + 0,04x_4 +$ $+ 0,06x_6 + 0,24x_7 - 0,045x_1^2 + 0,04x_2^2 +$ $+ 0,03x_6^2 - 0,02(x_7)^2 + 0,07x_1x_2 +$ $+ 0,035x_2x_6 + 0,13x_2x_7. \quad (3.17)$
Гидрофобный портланд-цемент	Прочность при сжатии (\hat{y}_{12}), МПа	$36,5 - 4,08x_1 + 16,2x_2 + 4,42x_6 +$ $+ 6,89x_7 - 0,5x_1^2 - 1,29x_2^2 - 0,54x_6^2 -$ $- 0,53(x_7)^2 - 0,78x_1x_2 - 0,59x_1x_6 +$ $+ 2,34x_2x_6 + 1,53x_2x_7 + 0,53x_6x_7. \quad (3.18)$

Вид цемента	Выходной параметр	Уравнение регрессии
	Морозостойкость (\bar{y}_{13}) циклы	$385 - 35,1x_1 + 186,7x_2 + 14,9x_6 +$ $+ 100,6x_7 - 3,2x_1^2 - 12,4x_2^2 + 20,6x_6^2 -$ $- 7,4(x_7)^2 - 17,3x_1x_2 - 22,2x_1x_7 +$ $+ 59,7x_2x_7. \quad (3.19)$
	Водонепроницаемость (\bar{y}_{14}), МПа	$0,92 + 0,06x_1 + 0,59x_2 + 0,08x_6 +$ $+ 0,29x_7 - 0,02x_1^2 + 0,13x_2^2 + 0,04x_6^2 +$ $+ 0,03(x_7)^2 - 0,11x_1x_2 + 0,07x_2x_6 +$ $+ 0,17x_2x_7. \quad (3.20)$

потребности (рис. 3.1), изменение доли песка в смеси заполнителей при различных значениях цементно-водного отношения и объема вовлеченного воздуха (рис. 3.2), уменьшение водопотребности по мере увеличения количества ПАВ для смесей различной удобоукладываемости (рис. 3.3).

Таблица 3.5. ФОРМУЛЫ ПЕРЕХОДА К НАТУРАЛЬНЫМ ЗНАЧЕНИЯМ ФАКТОРОВ

Фактор	Формула перехода	Фактор	Формула перехода
x_1	$x_1 = \frac{B-180}{30}$	x_5	$x_5 = \frac{HG-27,2}{2,6}$
x_2	$x_2 = \frac{Ц/B-2,1}{0,8}$	x_6	$x_6 = \frac{R_{ц}-41,2}{6,7}$
x_3	$x_3 = \frac{Ц-378}{144}$	x_7	$x_7 = \frac{\tau_{т.о}-14}{4}$
x_4	$x_4 = \frac{D_{max}-40}{30}$	x_7	$x_7 = \frac{\lg \tau_H - \lg 71}{\lg 2,6}$
x_4	$x_4 = \frac{СНВ-0,06}{0,06}$	x_8	$x_8 = \frac{Y-1}{1}$

Из модели водопотребности зависимость водосодержания от Ц/В выражается плавной кривой второго порядка (рис. 3.1), что, очевидно, согласуется с изменением реологических свойств бетонной смеси по мере повышения вязкости цементного теста

лучше, чем интерпретация этой зависимости в виде ломаной линии с резко выраженным критическим C/V [57]. Количественный анализ полученных данных по изменению водопотребности с ростом C/V для подвижных и жестких бетонных смесей при различной нормальной густоте свидетельствует о хорошем соответствии экспериментальным результатам В. И. Сорокера, В. Г. Довжика и Л. А. Кайсера [57, 91].

Влияние отдельных факторов состава бетонной смеси на значение оптимального $r_{\text{опт}}$ хорошо изучено в ряде работ [4, 85].

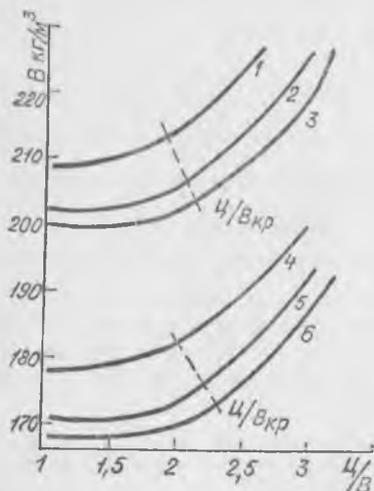


Рис. 3.1. Зависимость водопотребности бетонной смеси от цементно-водного отношения ($D_{\text{max}} = 20$ мм):

1-3 — ОК=7-9 см, нормальная густота цемента соответственно 29, 27 и 25%;
4-6 — Ж=30-50 с, нормальная густота цемента соответственно 29, 27 и 25%.

Математическое моделирование позволяет рассмотреть воздействие этих факторов на $r_{\text{опт}}$ во взаимосвязи (рис. 3.2). Представляет интерес влияние объема эмульгированного воздуха на $r_{\text{опт}}$, зависящее от цементно-водного отношения и максимальной крупности щебня.

При помощи совместного анализа моделей водопотребности и объема эмульгированного воздуха можно количественно оценить влияние содержания воздухововлекающей добавки и объема эмульгированного воздуха на пластифицирующий эффект. Как следует из рис. 3.3, наиболее высокая интенсивность пластификации имеет место при содержании СНВ от 0,04 до 0,08% (от массы цемента).

Рассматривая модели водопотребности бетонных смесей как на обычном, так и на гидрофобном цементе видим, что возможное снижение водосодержания возрастает по мере увеличения подвижности. Применительно к бетонным смесям на гидрофобном цементе данные, полученные при анализе математической модели [98], не противоречат теории смазочного действия тонких гидрофобных пленок [99], согласно которой в цементных системах с развитой поверхностью заполнителя имеет место уменьшение смазочного слоя (режим граничной

смазки) и особое значение приобретает специфическое взаимодействие молекул этого слоя с поверхностью твердых частиц.

Эффективность введения в бетонные смеси комплексных ПАВ, содержащих как гидрофобизирующие, так и гидрофилизующие компоненты, хорошо известна. Несмотря на перспективность нового вида добавок-суперпластификаторов, традиционные комплексные ПАВ не утратили своей практической значимости вследствие доступности и низкой стоимости исходных компонентов. Для прогноза возможного усиления эффекта

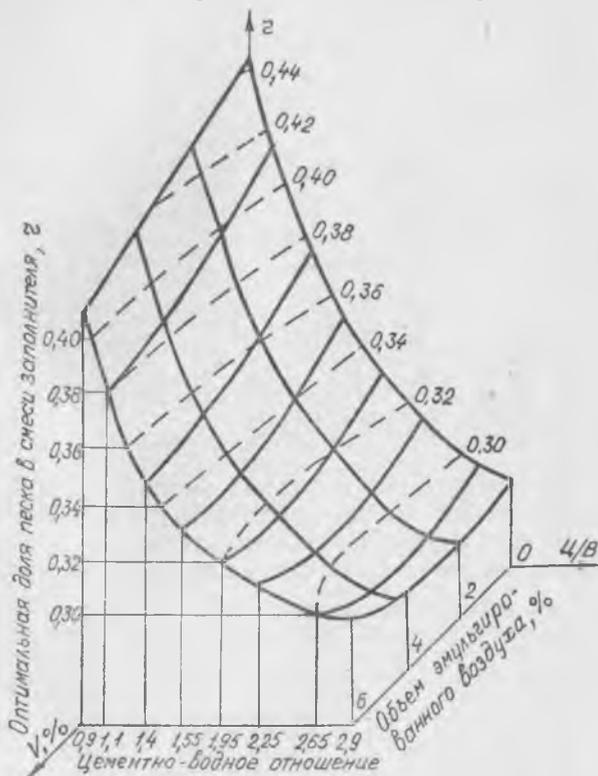


Рис. 3.2. Оптимальная доля песка в смеси заполнителей при изменении цементно-водного отношения и объема эмульгированного воздуха (пунктиром показаны изолинии оптимальной r).

пластификации в бетонных смесях, содержащих добавку СНВ за счет дополнительного введения СДБ, поставлена специальная серия опытов на исследованных (табл. 3.1) составах. СДБ вводили с водой затворения в количестве 0,25% массы цемента и определяли при этом показатели удобоукладываемости и прочности на сжатие в 28 сут при нормальном твердении. Опыты показали, что введение СДБ не вызывает

сколько-нибудь ощутимого снижения прочности. Для учета дополнительной пластификации за счет СДБ находили поправочные коэффициенты по формуле $k_{сдб} = \hat{B}/\hat{B}_1$, где \hat{B} — расчетная водопотребность по модели y_3 для достижения заданной удобоукладываемости без добавки СДБ; \hat{B}_1 — с добавкой. Осредненные значения поправочных коэффициентов приведены в табл. 3.6.

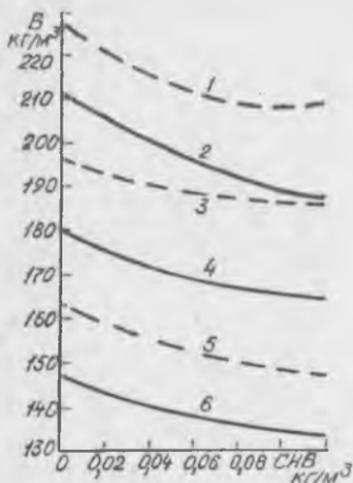


Рис. 3.3. Изменение водопотребности по мере роста количества ПАВ для смесей различной удобоукладываемости ($D_{max}=40$ мм, НГ= $=27\%$):
1, 2 — ОК=10±12 см; 3, 4 — ОК=4±6 см; 5, 6 — Ж=30±50 с пунктирная — Ц/В=2,9; сплошная линия — Ц/В=2,1.

Влияние добавки СНВ и объема эмульгированного воздуха на прочность бетона можно определить из графиков рис. 3.4, где представлены кривые прочности для составов с одинаковым водосодержанием и удобоукладываемостью как при нор-

Таблица 3.6. ЗНАЧЕНИЯ ПОПРАВОЧНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДЛЯ РАСЧЕТА ВОДОПОТРЕБНОСТИ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ, СОДЕРЖАЩИХ СДБ

Удобоукладываемость бетонной смеси		Цементно-водное отношение			
жесткость, с	осадка конуса, см	1,4	1,8	2,2	2,6
30—50	—	0,97	0,96	0,95	0,94
	1—3	0,95	0,94	0,94	0,93
	4—6	0,94	0,93	0,93	0,92
	7—9	0,93	0,93	0,93	0,92
	10—12	0,93	0,93	0,92	0,92

Примечание. Поправочные коэффициенты рассчитаны при НГ=27% и содержании СДБ — 0,25% массы цемента.

мальном твердении, так и при тепловой обработке. Небольшой пластифицирующий эффект в смесях одинаковой удобоукладываемости несколько сглаживает снижение прочности по мере

возрастания количества ПАВ, однако оно остается существенным особенно для смесей высокой подвижности.

Снижение прочности на 1% вовлеченного воздуха составляет в среднем 2...4% в бетонах нормального твердения и 3...5% в пропаренных. Деструктивное влияние вовлеченного воздуха в исследуемой области режимов тепловой обработки оказалось ненамного выше, чем при нормальном твердении, что согласуется с работами [67, 68].

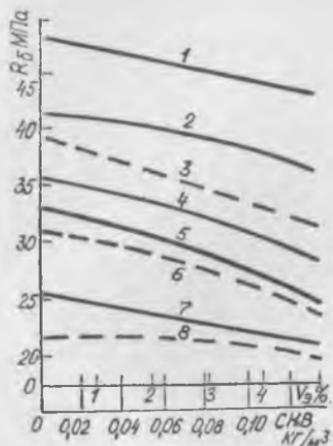


Рис. 3.4. Влияние добавки СНВ и объема эмульгированного воздуха на прочность бетона ($HГ=27\%$, $D_{шах} = 40$ мм, $R_{ц} = 40$ МПа):

1-3 проектная прочность бетона нормального твердения (1 — $Ц/B=2,9$; $V=180$ кг/м³; 2 — $Ж=30$ с; 3 — $OK=10 \div 12$ см); 4-6 проектная прочность пропаренного бетона (4 — $Ж=30$ с; 5 — $Ц/B=2,1$; $V=180$ кг/м³; 6 — $OK=10 \div 12$ см); 7-8 — отпускная прочность (7 — $Ж=30$ с; 8 — $OK=10 \div 12$ см).

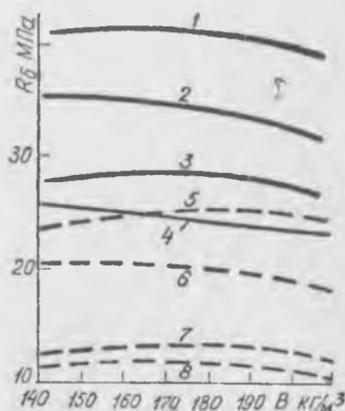


Рис. 3.5. Влияние водосодержания на прочность бетона при постоянном $Ц/B$ ($R_{ц} = 40$ МПа):

1, 5 — прочность бетона нормального твердения в возрасте 28 сут.; 2, 6 — прочность пропаренного бетона при $\tau_{т.0}=14$ ч в возрасте 28 сут.; 4, 8 — отпускная прочность пропаренного бетона при $\tau_{т.0}=14$ ч; 3, 7 — прочность бетона нормального твердения на гидрофобном цементе (сплошные линии — $Ц/B=2,1$; пунктирные — 1,3).

Для бетонов на гидрофобном цементе характерен некоторый недобор прочности (на 10...30%). Однако это происходит лишь при сравнительно высоких значениях $В/Ц$. С понижением $В/Ц$ до 0,5 прочность бетонов на обычном и гидрофобном цементах практически выравнивается. В последнем случае объем вовлеченного воздуха в бетонах колебался в сравнительно узком диапазоне 2,1...2,3%. Замедление роста прочности бетонов на гидрофобном цементе в раннем возрасте при повышении $В/Ц$, по-видимому, связано с усилением адсорбционного влияния добавок на процесс структурообразования. Интенсивность увеличения прочности бетона от 28-к 180-суточному возрасту на гидрофобном цементе более высокая, чем на обыч-

содержания, цементно-водного отношения, содержания добавки, нормальной густоты, активности цемента и длительности твердения.

Преобразование моделей производили следующим образом. В соответствии с условиями варьирования факторов (табл. 3.1) рассчитывали для шестифакторных планов B_6 с полурепликой

Таблица 3.7. ОБОБЩЕННЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СВОЙСТВ ПРОПАРЕННОГО БЕТОНА

Выходной параметр	Уравнение регрессии
Отпускная прочность (y_5') , МПа	$21,98 - 0,93x_8 + 10,5x_2 - 1,03x_4 - 1,61x_5 + 2,32x_6 + 2,65x_7 - 0,49x_8^2 - 0,81x_2^2 - 0,09x_4^2 - 0,09x_5^2 - 0,06x_6^2 - 0,96x_7^2 - 2x_8x_2 - 0,88x_8x_4 - 1,37x_8x_5 - 1,43x_8x_6 + 2,68x_2x_6 + 2,6x_2x_7 - 0,91x_4x_5 - 0,82x_4x_6 - 1,01x_4x_7 + 1,18x_5x_7 + 1,22x_6x_7. \quad (3.23)$
Проектная прочность (y_6') , МПа	$30,6 - 2,24x_8 + 13,03x_2 - 2,86x_4 - 0,99x_5 + 3,97x_6 + 1,94x_7 - 0,05x_8^2 - 1,75x_2^2 - 0,5x_4^2 - 0,35x_5^2 + 0,1x_6^2 - 0,2x_7^2 - 1,29x_8x_2 + 1,18x_2x_4 - 0,63x_2x_5 + 2,71x_2x_6 + 0,97x_2x_7. \quad (3.24)$
Морозостойкость (y_7') , циклы	$281,9 - 38,3x_8 + 145,4x_2 + 89,2x_4 - 16x_5 + 17,7x_7 + 8,3x_8^2 - 15,7x_2^2 - 12,2x_4^2 - 5,2x_5^2 + 9,3x_6^2 - 2,2x_7^2 - 13,3x_8x_2 + 14,8x_8x_4 + 7,3x_2x_4 + 21,2x_6x_7. \quad (3.25)$
Водонепроницаемость (y_8') , МПа	$0,57 + 0,07x_8 + 0,43x_2 + 0,03x_5 + 0,06x_6 + 0,05x_7 - 0,02x_8^2 + 0,08x_2^2 + 0,02x_4^2 - 0,006x_7^2 + 0,07x_8x_2 + 0,03x_8x_6 - 0,04x_2x_4 + 0,03x_2x_5 + 0,06x_2x_6 - 0,02x_4x_6 - 0,02x_4x_7 + 0,01x_5x_6 + 0,02x_6x_7. \quad (3.26)$

(для бетонов на гидрофобном цементе — планов Ha_5) выходные параметры y_i' (т. е. прочность при сжатии, морозостойкость и водонепроницаемость бетона). При планируемых значениях показателей удобоукладываемости x_8 и нормальной

Таблица 3.8. ОБОБЩЕННЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ
СВОЙСТВ БЕТОНА НОРМАЛЬНОГО ТВЕРДЕНИЯ

Вид цемента	Выходной параметр	Уравнение регрессии
Портланд-цемент	Прочность при сжатии \hat{y}_9' , МПа	$36,93 - 1,88x_8 + 14,73x_2 - 3,62x_4 - 0,86x_5 + 4,97x_6 + 6,08x_7 - 0,05x_8 - 1,85x_2^2 - 0,2x_4^2 - 0,3x_5^2 + 0,05x_8^2 - 0,8(x_7)^2 - 0,61x_8x_4 - 0,45x_8x_5 + 1,23x_8x_6 + 0,97x_2x_4 - 0,63x_2x_5 + 2,12x_2x_6 + 2,14x_2x_7 + 0,99x_4x_6 - 0,46x_5x_6 + 0,88x_6x_7. \quad (3.27)$
	Морозостойкость \hat{y}_{10}' , циклы	$378,9 - 67,8x_8 + 162,3x_2 + 147,7x_4 - 27,4x_5 + 21,8x_6 + 63,2x_7 + 9,7x_8 - 38,8x_2^2 + 6,7x_4^2 - 9,8x_5^2 + 11,7x_6^2 + 2,2(x_7)^2 + 29,4x_8x_2 + 15,2x_8x_4 - 8,7x_8x_5 - 16,6x_8x_7 + 26,6x_2x_4 - 15,8x_2x_5 + 18,7x_2x_7 + 7,1x_4x_6 + 23,7x_4x_7 + 13,8x_6x_7. \quad (3.28)$
	Водонепроницаемость \hat{y}_{11}' , МПа	$0,92 + 0,04x_8 + 0,56x_2 + 0,02x_4 + 0,01x_5 + 0,06x_6^2 + 0,25x_7 - 0,05x_8 + 0,08x_2^2 - 0,01x_4^2 + 0,004x_5^2 + 0,03x_6^2 - 0,02(x_7)^2 + 0,02x_8x_2 + 0,01x_8x_4 - 0,02x_8x_5 + 0,04x_2x_6 + 0,14x_2x_7. \quad (3.29)$
Гидрофобный	Прочность при сжатии \hat{y}_{12}' , МПа	$39 - 2,32x_8 + 15,03x_2 - 0,15x_5 + 5,33x_6 + 8,7x_7 + 0,1x_8 - 2,65x_2^2 - 0,95x_5^2 - 0,8x_6^2 - 0,8(x_7)^2 - 1,06x_8x_2 - 1,47x_2x_5 - 1,7x_8x_6 + 0,75x_8x_7 - 1,53x_2x_5 + 0,93x_2x_6 + 2,78x_2x_7 - 1,42x_6x_5 + 1,77x_6x_7 + 1,25x_5x_7. \quad (3.30)$

Вид цемента	Выходной параметр	Уравнение регрессии
	Морозостойкость (y_{13}') , циклы	$370 - 29,1x_8 + 170,7x_2 - 10,5x_5 + 16x_6 +$ $+ 93,2x_7 + 3,5x_8^2 - 25x_2^2 - 6,5x_5^2 +$ $+ 19,5x_6^2 - 8,5(x_7)^2 + 14,8x_8x_2 -$ $- 1,4x_8x_5 + 2,4x_8x_6 - 17,3x_8x_7 -$ $- 5,3x_2x_5 + 3,3x_2x_6 + 43,8x_2x_7 +$ $+ 4,3x_6x_7 - 6,3x_5x_7. \quad (3.31)$
	Водонепроницаемость (y_{14}') , МПа	$0,93 + 0,04x_8 + 0,56x_2 + 0,08x_6 + 0,29x_7 -$ $- 0,02x_8^2 + 0,11x_2^2 + 0,04x_6^2 +$ $+ 0,03(x_7)^2 - 0,09x_8x_2 - 0,03x_2x_5 +$ $+ 0,07x_2x_6 + 0,17x_2x_7. \quad (3.32)$

Таблица 3.9. РАСЧЕТНЫЙ РАСХОД ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА ДЛЯ БЕТОНОВ РАЗЛИЧНЫХ МАРОК ПО ПРОЧНОСТИ В ВОЗРАСТЕ 28 СУТ. (ТВЕРДИЕ В НОРМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ)

Марка бетона	OK=10-12 см		OK=4+6 см		Ж=30+50 с	
	портланд-цемент	гидрофоб-ный цемент	портланд-цемент	гидрофоб-ный цемент	портланд-цемент	гидрофоб-ный цемент
200	283	315	249	270	220	244
	—	—	—	—	—	—
250	351	388	303	328	265	285
	338	360	280	300	235	252
300	433	461	366	396	314	337
	399	434	327	348	273	288
350	—	—	444	469	374	396
	470	502	380	408	314	332
400	—	—	—	—	—	—
	536	594	442	460	362	368
500	—	—	—	—	—	—
	—	—	580	592	484	493

Примечание. Расходы цемента для НГ=27% в числителе марки 400, знаменателе — марки 500 ($D_{\max}=20$ мм).

густоты x_5 , задаваясь крупностью щебня 5...20 мм ($x_3 = -0,5$), из модели водопотребности (табл. 3.2) определяли сначала необходимое водосодержание бетонной смеси x_1 , а затем по соответствующим моделям табл. 3.3, 3.4 расчетные

значения прочности, морозостойкости и водонепроницаемости в каждой строчке матриц. Произведя обычным путем статистическую обработку полученных расчетных параметров, находим обобщенные модели свойств бетона (табл. 3.7, 3.8). Все расчеты выполнены на ЭВМ «Мир-1».

Таблица 3.10. РАСЧЕТНЫЙ РАСХОД ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА ДЛЯ БЕТОНОВ, ПОДВЕРГАЕМЫХ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКЕ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ОТПУСКНОЙ ПРОЧНОСТИ

Проектная марка бетона	Расход цемента при			
	$OK=10 \div 12$ см	$OK=4 \div 6$ см	$OK=1 \div 3$ см	$Ж=30 \div 50$ с
	Отпускная прочность 70% проектной			
200	313	289	266	251
250	365	308	285	263
300	418	340	310	283
350	474	380	345	318
400	535	428	394	363
500	—	573	522	475
	Отпускная прочность 100% проектной			
200	436	371	344	320
250	482	386	351	319
300	514	451	407	367
400	—	—	543	484

Примечание. В числителе расход цемента для марки 400, в знаменателе — 500; $НГ=27\%$, длительность тепловой обработки — 14 ч.

Представив математические модели в форме квадратных уравнений, можно, воспользовавшись обычной формулой извлечения корня, решить их относительно любого из факторов, задавшись значением выходного параметра и фиксируя остальные факторы на определенном уровне.

Практический интерес представляет решение обобщенных уравнений вида (3.22) относительно цементно-водного отношения x_2 . Затем, зная водосодержание x_1 , можно определить

Вид цемента	Выходной параметр	Уравнение регрессии
	Морозостойкость (y_{13}^{\wedge}) , циклы	$370 - 29,1x_3 + 170,7x_2 - 10,5x_5 + 16x_6 +$ $+ 93,2x_7 + 3,5x_8^2 - 25x_2^2 - 6,5x_5^2 +$ $+ 19,5x_6^2 - 8,5(x_7)^2 + 14,8x_3x_2 -$ $- 1,4x_3x_5 + 2,4x_3x_6 - 17,3x_3x_7 -$ $- 5,3x_2x_5 + 3,3x_2x_6 + 43,8x_2x_7 +$ $+ 4,3x_6x_7 - 6,3x_5x_7. \quad (3.31)$
	Водонепроницаемость (y_{14}^{\wedge}) , МПа	$0,93 + 0,04x_3 + 0,56x_2 + 0,08x_6 + 0,29x_7 -$ $- 0,02x_8^2 + 0,11x_2^2 + 0,04x_6^2 +$ $+ 0,03(x_7)^2 - 0,09x_3x_2 - 0,03x_2x_5 +$ $+ 0,07x_2x_6 + 0,17x_2x_7. \quad (3.32)$

Таблица 3.9. РАСЧЕТНЫЙ РАСХОД ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА ДЛЯ БЕТОНОВ РАЗЛИЧНЫХ МАРОК ПО ПРОЧНОСТИ В ВОЗРАСТЕ 28 СУТ. (ТВЕРЖДЕНИЕ В НОРМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ)

Марка бетона	OK=10±12 см		OK=4±6 см		Ж=30±50 с	
	портланд-цемент	гидрофоб-ный цемент	портланд-цемент	гидрофоб-ный цемент	портланд-цемент	гидрофоб-ный цемент
200	283	315	249	270	220	244
	—	—	—	—	—	—
250	351	388	303	328	265	285
	338	360	280	300	235	252
300	433	461	366	396	314	337
	399	434	327	348	273	288
350	—	—	444	469	374	396
	470	502	380	408	314	332
400	—	—	—	—	—	—
	536	594	442	460	362	368
500	—	—	—	—	—	—
	—	—	580	592	484	493

Примечание. Расходы цемента для НГ=27% в числителе марки 400, знаменателе — марки 500 ($D_{\max}=20$ мм).

густоты x_5 , задаваясь крупностью щебня 5...20 мм ($x_3=0,5$), из модели водопотребности (табл. 3.2) определяли сначала необходимое водосодержание бетонной смеси x_1 , а затем по соответствующим моделям табл. 3.3, 3.4 расчетные

значения прочности, морозостойкости и водонепроницаемости в каждой строчке матриц. Произведя обычным путем статистическую обработку полученных расчетных параметров, находим обобщенные модели свойств бетона (табл. 3.7, 3.8). Все расчеты выполнены на ЭВМ «Мир-1».

Таблица 3.10. РАСЧЕТНЫЙ РАСХОД ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА ДЛЯ БЕТОНОВ, ПОДВЕРГАЕМЫХ ТЕПЛОЙ ОБРАБОТКЕ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ОТПУСКНОЙ ПРОЧНОСТИ

Проектная марка бетона	Расход цемента при			
	$OK=10 \div 12$ см	$OK=4 \div 6$ см	$OK=1 \div 3$ см	$Ж=30 \div 50$ с
	Отпускная прочность 70% проектной			
200	313	289	266	251
250	365	308	285	263
300	418	340	310	283
350	474	380	345	318
400	535	428	394	363
500	—	573	522	475
	Отпускная прочность 100% проектной			
200	436	371	344	320
250	482	386	351	319
300	514	451	407	367
400	—	—	543	484

Примечание. В числителе расход цемента для марки 400, в знаменателе — 500; $W/C=27\%$, длительность тепловой обработки — 14 ч.

Представив математические модели в форме квадратных уравнений, можно, воспользовавшись обычной формулой извлечения корня, решить их относительно любого из факторов, задавшись значением выходного параметра и фиксируя остальные факторы на определенном уровне.

Практический интерес представляет решение обобщенных уравнений вида (3.22) относительно цементно-водного отношения x_2 . Затем, зная водосодержание x_1 , можно определить

расход цемента. Таким образом найдены расчетные значения необходимого расхода цемента для достижения заданных показателей свойств бетона при различных значениях продолжительности тепловой обработки или нормального твердения удобоукладываемости, активности и нормальной плотности цемента, а также содержания вовлеченного воздуха. Такие зависимости позволяют решить многие важные практические задачи и, в частности, количественно оценить:

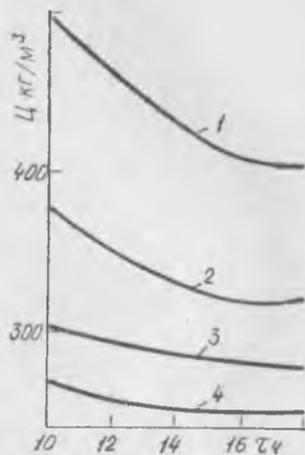
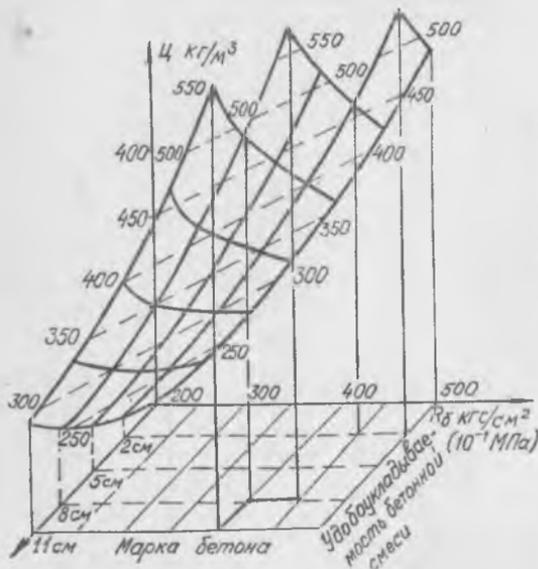


Рис. 3.8. Расход цемента в зависимости от марки бетона нормального твердения и удобоукладываемости бетонной смеси (пунктирными показаны изолинии расхода цемента).

Рис. 3.9. Влияние длительности тепловой обработки на расход цемента ($HГ = 27\%$, $R_{II} = 40 \text{ МПа}$): 1 — бетон М 300, $OK = 10 \pm 12 \text{ см}$; 2 — М 300, $Ж = 30 \pm 50 \text{ с}$; 3 — М 200, $OK = 10 \pm 12 \text{ см}$; 4 — М 200, $Ж = 30 \pm 50 \text{ с}$ (отпускная прочность — 70% проектной).

1) перерасход цемента для получения необходимой отпускной прочности и проектной прочности по мере сокращения длительности тепловой обработки или нормального твердения, повышения подвижности смеси и нормальной плотности цементного теста (табл. 3.9, 3.10, рис. 3.8, 3.9);

2) эффективность снижения отпускной прочности и удлинения марочного возраста при различных проектных марках бетона и цементах разной активности (табл. 3.9);

3) расход цемента для обеспечения необходимых показателей морозостойкости и прочности при оптимальном содержании вовлеченного воздуха и техническую целесообразность введения воздуха в бетон при различном содержании требуемых свойств как при нормальном твердении, так и в условиях тепловой обработки (рис. 3.10);

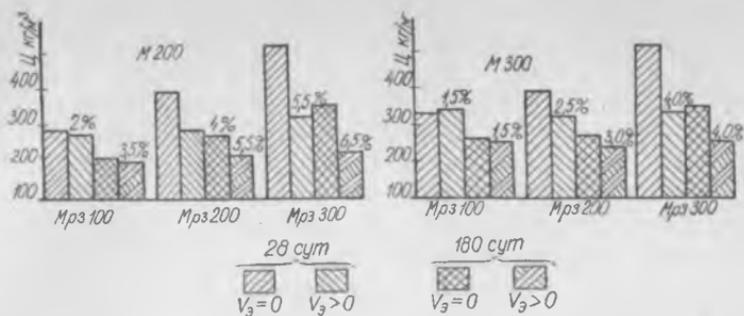


Рис. 3.10. Диаграммы эффективности эмульгированного воздуха в бетонах различных марок по прочности и морозостойкости.

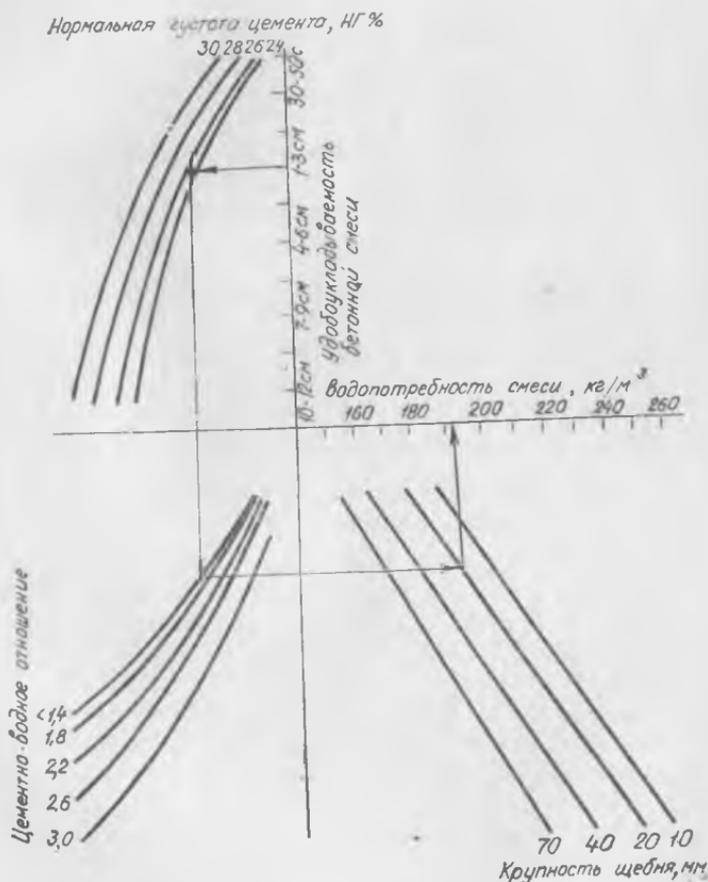


Рис. 3.11. Номограмма для определения водопотребности бетонной смеси на портландцементе (снижение расхода воды на каждый процент эмульгированного воздуха составляет 3...5 л).

4) рациональность применения цемента разных марок в бетоне нормального и ускоренного твердения в различном возрасте (табл. 3.9, 3.10).

Каждая из указанных задач при традиционном подходе требует трудоемкого и длительного исследования. Применение же комплекса математических моделей позволяет решить их при минимально необходимом объеме экспериментальных работ и дать системное представление об основных аспектах исследуемых многофакторных зависимостей.

3.4. Решение задач оптимизации составов бетона на основе комплекса полиномиальных моделей

Комплекс обобщенных полиномиальных моделей позволяет сравнительно просто с помощью ЭВМ решать задачи оптимизации составов бетона в широком диапазоне обеспечивающих комплекс проектных свойств.

Решение задач целесообразно осуществлять в два этапа:

Первый этап. Определение необходимого цементно-водного отношения, обеспечивающего комплекс заданных свойств бетона.

Если для проектных свойств бетона $\sum_{i=1}^m y_i^0$ получены полиномиальные модели вида (3.6), где $x_1, x_2, x_n, \dots, x_k$ — исследуемые факторы, из которых x_n является исходным цементно-водным отношением в кодированной форме, то, очевидно, задача первого этапа — поиск такого минимально возможного значения x_n , при котором удовлетворяется условие $\hat{y}_1 > y_1^0, \hat{y}_2 > y_2^0$ и т. д. Представив полиномиальные модели в виде квадратных уравнений,

$$b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j - \hat{y} = 0, \quad (3.33)$$

задавшись $\hat{y} = y^0$ и стабилизировав все другие факторы на определенном уровне, легко записать значения x_n как корня квадратного уравнения вида (3.33)

$$x_n = -c_n \pm \sqrt{c_n^2 - 4b_{nn} \cdot l / 2b_{nn}}, \quad c_n = b_n + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^k b_{ni} x_i, \quad (3.34)$$

где

$$l = b_0 + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^k b_i x_i + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{\substack{i+j \\ i \neq n}} b_{ij} x_i x_j - \hat{y}.$$

Переход к значению цементно-водного отношения в натуральных единицах достигается с помощью формулы преобразования

$$x_i = (\tilde{x}_i - \tilde{x}_{i0}) / \Delta \tilde{x}_i, \quad (3.35)$$

где x_i — кодированное значение фактора; \tilde{x}_i — значение фактора в натуральных единицах; \tilde{x}_{i0} — значение фактора на основном уровне в натуральных единицах; $\Delta \tilde{x}_i$ — интервал варьирования фактора в натуральных единицах.

Получив требуемые значения C/B при помощи решения моделей последовательно для каждого из проектных показателей, окончательно выбираем наибольшую из полученных величин, т. е. значение C/B , обеспечивающее все нормируемые проектные свойства.

Второй этап. Определение необходимого содержания компонентов в 1 м³ бетонной смеси.

Расход воды для достижения требуемой удобоукладываемости бетонной смеси находим из моделей водопотребности (табл. 3.2), которые легко можно интерпретировать в виде номограмм (рис. 3.11).

Окончательно расход воды ищем по формуле

$$B = k_B \hat{B}, \quad (3.36)$$

где k_B — поправочный коэффициент, учитывающий влияние факторов, не нашедших отражение в модели, например действие пластификаторов, водопотребность песка, щебня и др. ($k_B = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \dots$); \hat{B} — расчетное значение водопотребности бетонной смеси при заданных значениях удобоукладываемости и других исследуемых факторов.

Расход цемента получаем из выражения

$$C = C/B \cdot B. \quad (3.37)$$

Примеры расчетных значений расхода цемента при определенных исходных условиях приведены в табл. 3.9, 3.10.

Для определения расходов песка и щебня из соответствующей математической модели (табл. 3.2) находим расчетное значение оптимальной доли песка в смеси заполнителей при заданных значениях исследуемых факторов. Как известно, в технологии бетона под оптимальным r понимают такое его значение, которое обеспечивает минимально возможный расход воды для заданной удобоукладываемости бетонной смеси. Это допущение при построении модели оптимальной доли песка в смеси заполнителей принимаем и мы, хотя в некоторых исследованиях такой принцип оспаривается. Например, в работе [7] утверждается, что оптимальная доля песка из условия наибольшей водонепроницаемости значительно выше, чем из условия получения бетонов наибольшей прочности, и следовательно, наименьшей водопотребности. Однако практика подбора состава

вов гидротехнического бетона не подтверждает этого [83]. При нормировании прочности на сжатие, морозостойкости и водонепроницаемости допущение об оптимальности r при минимизации водопотребности и получении нерасслаивающейся бетонной смеси заданной подвижности или жесткости можно считать достаточно строгим, хотя не исключено, что для другого набора

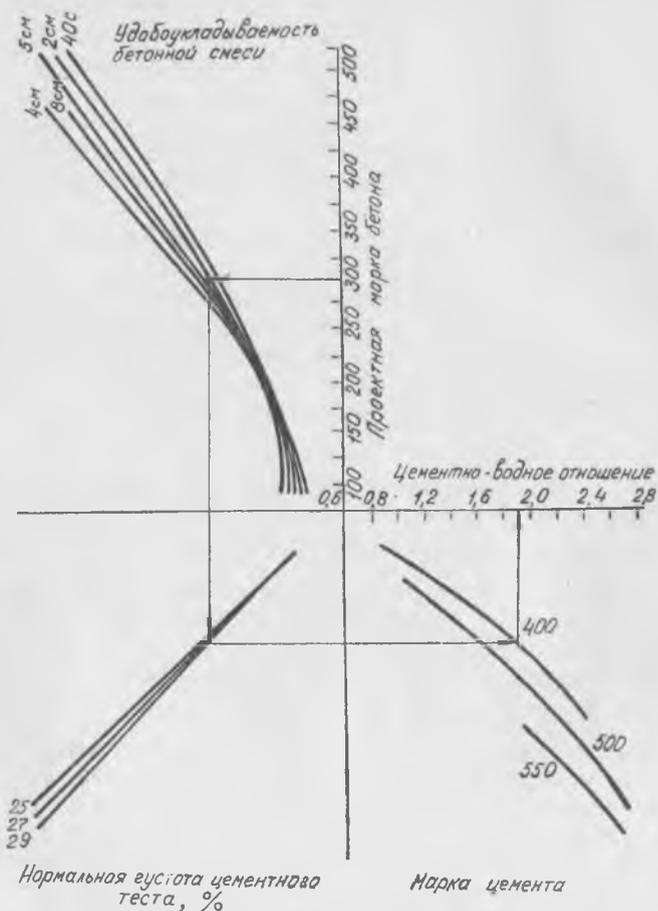


Рис. 3.12. Номограмма определения Ц/В для бетонов 28 сут. возраста (без воздухововлекающих добавок).

нормируемых свойств бетона такое допущение принять нельзя. В случаях, когда минимально необходимый расход цемента не обязательно должен иметь составы с минимальным водосодержанием при заданной удобукладываемости, задачи оптимизации существенно усложняются и для их решения необходимо привлекать специальные методы нелинейного программирования. Один из таких методов предложен в работе [26].

В некоторых исследованиях [26, 90] доля песка в смеси заполнителей входит как один из факторов в уравнение подвижности или жесткости. Оптимальное значение r находят методами дифференциального анализа [26]. Однако такой подход возможен лишь при получении адекватной квадратичной модели удобоукладываемости, что сопряжено часто с серьезными затруднениями экспериментального характера. Построение специальной модели $r_{\text{опт}}$ существенно упрощает всю процедуру проектирования оптимальных составов бетона на основе полиномиальных моделей.

Расход песка и щебня ищут по обычным формулам метода абсолютных объемов

$$P = (1 - C/\rho_{\text{ц}} - B/\rho_{\text{в}} - v_{\text{в}}) \rho_{\text{п}} r, \quad (3.38)$$

$$\text{Щ} = (1 - C/\rho_{\text{ц}} - B/\rho_{\text{в}} - P/\rho_{\text{п}} - v_{\text{в}}) \rho_{\text{щ}}, \quad (3.39)$$

где $\rho_{\text{ц}}$, $\rho_{\text{в}}$, $\rho_{\text{п}}$, $\rho_{\text{щ}}$ — соответственно плотности цемента, воды, песка и щебня, кг/м³; $v_{\text{в}}$ — объем вовлеченного воздуха, л/м³.

Объем вовлеченного воздуха складывается из эмульгированного и неэмульгированного (защемленного) $v_{\text{в}} = v_{\text{э}} + v_{\text{з}}$. Объем защемленного воздуха определяется при оптимальном времени уплотнения удобоукладываемостью бетонной смеси (рис. 2.20). Необходимый объем воздуха, специально эмульгированного добавками ПАВ, зависит, главным образом, от требуемой морозостойкости. Предварительно с помощью математических моделей свойств бетона (табл. 3.3, 3.4) выбирают оптимальное количество добавки, т. е. такое количество ПАВ, которое обеспечивает требуемые свойства при минимальном C/B . Применяя ЭВМ, этого легко достичь способом перебора расхода добавки в исследованном диапазоне с определением минимального возможного C/B , обеспечивающего набор нормируемых выходных параметров (y_1 , y_2 и т. д.). Возможны и другие способы расчета оптимального содержания ПАВ [26]. При оптимальном содержании ПАВ, найденных расходах цемента и воды, а также фиксированных значениях других факторов из соответствующей модели (табл. 3.2) можно получить объем эмульгированного воздуха.

Рассмотренную процедуру проектирования оптимальных составов бетона легко алгоритмизировать и реализовать с применением ЭВМ.

Рассмотрим характерные задачи проектирования оптимальных составов бетона, решенные с применением кибернетического метода.

Задача 3.1. Определить типовые составы гидротехнического бетона водохозяйственных сооружений в возрасте 28 и 180 сут. при нормальном твердении (воздухововлекающие добавки не применяются). На первом этапе устанавливаем значения C/B ,

необходимые для достижения различных марок бетона по прочности на сжатие.

Исходными для расчетов являются обобщенные шестифакторные модели прочности бетона нормального твердения при использовании портландцемента и гидрофобного цемента, приведенные в табл. 3.8, где $x_3, x_2, x_4, x_5, x_6, x_7'$ — соответственно условная удобоукладываемость, цементно-водное отношение, расход воздухововлекающей добавки, нормальная плотность, активность цемента и длительность нормального твердения в кодированных величинах согласно табл. 3.5.

Представив выражения (3.22) в виде квадратных уравнений, решаем их относительно C/B , фиксируя остальные факторы на требуемых уровнях и задавая определенную проектную прочностью \hat{y}_9 или \hat{y}_{12} .

Определив значение x_2 при принятых значениях других факторов, по моделям $\hat{y}_{10}, \hat{y}_{13}$ и $\hat{y}_{11}, \hat{y}_{14}$ (табл. 3.8) находим морозостойкость и водонепроницаемость бетона, соответствующие маркам бетона по прочности на сжатие.

Далее из уравнений (табл. 3.2) подсчитываем расход воды по моделям \hat{y}_2, \hat{y}_4 и оптимальную долю песка в смеси заполнителей \hat{y}_3 , а затем по обычным формулам расход цемента, песка и щебня на 1 м^3 бетонной смеси. Оптимальную долю песка в смеси заполнителей для бетонов на гидрофобном цементе можно найти из соответствующей модели, учитывая, что объем эмульгированного воздуха составляет 2...3%. На ЭВМ ЕС-1020 по рассмотренной схеме рассчитаны типовые составы бетонов в широком диапазоне марок (100—500) с удобоукладываемостью от 50 с до 12 см при использовании портландцемента и гидрофобного портландцемента марок 400 и 500 с нормальной плотностью 25...29% в возрасте 28 и 180 сут. Их можно рассматривать как базовые или унифицированные. Применительно к местным материалам составы следует уточнять. Учет влияния особенностей конкретных заполнителей при привязке типовых составов производят по известным рекомендациям [83, 85] или с помощью специально найденных коэффициентов.

Анализ полученных данных позволяет определить высокую эффективность составов морозостойких бетонов на гидрофобном цементе. При получении, например, бетона с $M_{рз} 200$ на гидрофобном цементе требуется расход вяжущего на 10...30% меньше, чем при использовании обычного портландцемента с минеральными добавками.

По данным расчетов, выполненных с помощью математических моделей (табл. 3.7, 3.8), построены номограммы (рис. 3.11—3.13), используя которые можно определять расход воды, C/B и r при заданных исходных условиях.

При назначении марок гидротехнического бетона в процессе проектирования бетонных и железобетонных конструкций важно учесть реальное соотношение его свойств, которое является функцией многочисленных технологических факторов, в том числе вида и особенностей исходных компонентов, их соотношения, характера и концентрации добавок, режимных параметров изготовления изделий, условий и длительности тверде-

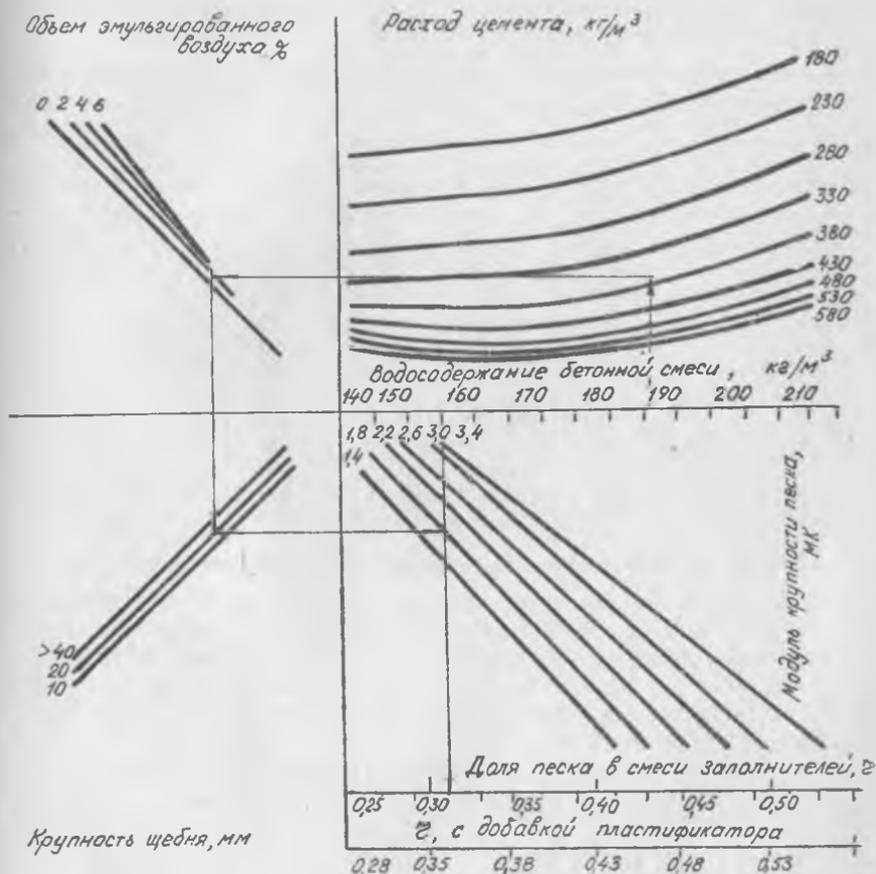


Рис. 3.13. Номограмма для определения оптимальной доли песка в смеси заполнителей (при назначении γ для бетонов на гидрофобном цементе следует принимать объем эмульгированного воздуха, равный 2...3%).

ния. Как вытекает из правила створа, выражающего тесную связь свойств конгломератов с их оптимальной структурой [79], при некотором определенном наборе технологических факторов бетон имеет вполне однозначное соотношение свойств. Недифференцированный подход к установлению единого ориентировочного соотношения между прочностью, морозостойкостью и

водонепроницаемостью бетона, предлагаемый ранее СНиП II-И. 14-69, был явно ошибочный [36]. В действующих СНиП II-56-77 такого соотношения нет, однако не предлагается и новых рекомендаций.

Выбирая из конструктивного расчета марку бетона по прочностю, а затем из условия долговечности и предотвращения фильтрации морозостойкость и водонепроницаемость, проекти-

Таблица 3.11. СООТНОШЕНИЕ ПРОЕКТНЫХ СВОЙСТВ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО БЕТОНА ПРИ НОРМАЛЬНОМ ТВЕРДЕНИИ БЕЗ ВОЗДУХОВОВЛЕКАЮЩИХ ДОБАВОК (ПОРТЛАНДЦЕМЕНТ ОБЫЧНЫЙ)

Удобоукладываемость бетонной смеси		Марки бетона в возрасте, сут					
		28			180		
ОК см	Ж с	прочность на сжатие	морозостойкость	водонепроницаемость	прочность на сжатие	морозостойкость	водонепроницаемость
—	30—50	200	50—75	2	200	50—75	2—4
4—6	—	200	50—75	2	200	50—75	2—4
10—12	—	200	50	2	200	50	2—4
—	30—50	300	100—150	2—4	300	150—200	4—6
4—6	—	300	100—150	2—4	300	100—150	4—6
10—12	—	300	75—100	2—4	300	75—100	4—6
—	30—50	400	200—250	6—8	400	250—300	8—10
4—6	—	400	200—250	6—8	400	200—250	8—10
10—12	—	400	100—150	6—8	400	150—200	8—10
—	30—50	500	250—300	10—12	500	350—400	12—16
4—6	—	500	250—300	10—12	500	300—350	12—16
10—12	—	500	200—250	10—12	500	250—300	12—16

ровщик должен привести указанные свойства в соответствие с их возможным соотношением в бетоне при заданных условиях, а при необходимости скорректировать параметры конструкций. В противном случае возможно превышение фактической прочности бетона по сравнению с проектируемой и, как следствие, перерасход цемента.

Разработка оптимальных составов бетона требуемых марок по прочности, морозостойкости и водонепроницаемости позволяет одновременно найти при различных условиях (определенном возрасте, подвижности и жесткости бетонной смеси и др.) соотношение указанных свойств для бетонов на исследуемых материалах.

Применительно к данной задаче расчетное соотношение проектных свойств бетона на обычном и гидрофобном портландцементе приведено в табл. 3.11, 3.12.

Разумеется, при моделировании показателей свойств бетона невозможно учесть все многообразие технологических факторов, поэтому данные соотношения справедливы при определенных допущениях (содержание C_3A в цементе 6...8%, щебень гранитный, песок кварцевый по ГОСТ 8736-77).

Соотношение прочности, морозостойкости и водонепроницаемости бетона на гидрофобном цементе особенно благоприятно для конструкций гидротехнических сооружений, подвергаемых интенсивному попеременному замораживанию и оттаиванию. Результаты, полученные при анализе и совместном решении математических моделей, подтверждают исследования эффективности гидрофобного и гидрофобно-пластифицированного

Таблица 3.12. СООТНОШЕНИЕ ПРОЕКТНЫХ СВОЙСТВ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО БЕТОНА ПРИ НОРМАЛЬНОМ ТВЕРДЕНИИ БЕЗ ВОЗДУХОВОВЛЕКАЮЩИХ ДОБАВОК (ПОРТЛАНЦЕМЕНТ ГИДРОФОБНЫЙ)

Удобоукладываемость бетонной смеси		Марки бетона в возрасте, сут.					
		28			180		
ОК см	Ж с	прочность на сжатие	морозостойкость	водонепроницаемость	прочность на сжатие	морозостойкость	водонепроницаемость
—	30—50	200	100—150	2—4	200	100—150	4—6
4—6	—	200	100	2—4	200	100	4—6
10—12	—	200	75—100	2—4	200	75—100	4—6
—	30—50	300	200—250	6	300	300	8
4—6	—	300	200	6	300	250	8
10—12	—	300	150—200	6	300	200—250	8
—	30—50	400	300	8—10	400	400	12
4—6	—	400	250	8—10	400	350	12
10—12	—	400	200—250	8—10	400	300—350	12
—	30—50	500	350	12—14	500	500	16
4—6	—	500	300	12—14	500	450	16
10—12	—	500	250—300	12—14	500	400—450	16

ного цементов в гидротехническом бетоне, выполненные нами ранее. Повышенная морозостойкость и водонепроницаемость бетонов на гидрофобном цементе дополняются более высокой прочностью на растяжение, ее интенсивным возрастанием со временем, улучшенными деформативными характеристиками [35].

Для массивного гидротехнического бетона важным преимуществом гидрофобного цемента является пониженная экзотермия. Эксперименты показали [38], что гидрофобизирующие ПАВ оказывают наиболее сильное тормозящее действие на процесс гидратации трехкальциевого алюмината, протекающего с самым высоким тепловым эффектом. В зависимости от структурно-минералогической природы цементного клинкера и количества добавки снижение тепловыделения варьирует в широкой области и достигает 20% к трех- и семисуточному возрасту. Введение гидрофобизирующих ПАВ позволяет, существенно снизив экзотермию цемента, в то же время сохранять приемлемое содержание трехкальциевого силиката и улучшить структуру цементного камня. При этом уменьшается не только абсолютное значение экзотермии, но и скорость ее роста во времени.

В «СибНИипроектцементе» автором совместно с Р. П. Ивановой разработана технология гидрофобного гидротехнического цемента [55]. В 1968 г. на Красноярском цементном заводе на основе клинкера по ТУ 21-21-2-71 выпущена промышленная партия гидрофобного портландцемента с применением жирных кислот, который пошел на строительство Хантайской ГЭС. Цемент использован в бетоне после хранения в течение 9...10 мес. в естественных условиях Севера. Пятилетний срок службы бетона на основе гидрофобного цемента подтвердил его высокую стойкость и эксплуатационные качества [56].

Лабораторные и натурные исследования показали целесообразность использования в гидротехническом строительстве гидрофобного портландцемента с применением в качестве гидрофобизирующей добавки жирных кислот (особенно в Сибири и на Севере). При использовании гидрофобного гидротехнического портландцемента М 300 по ТУ 21-21-4-73 достигается по сравнению с обычным по ТУ 21-21-4-73 снижение тепловыделения в бетоне на 15...20%, улучшение удобоукладываемости бетонной смеси, повышение морозостойкости и водонепроницаемости бетона при сохранении требований по прочности; экономия 10...15% цемента за счет сохранения активности при длительном хранении.

Нами совместно с И. Г. Прессманом [35, 74] на Здолбуновском цементно-шиферном комбинате изготовлена опытно-промышленная партия гидрофобно-пластифицированного портландцемента, содержащего комплексную добавку, включающую жирные кислоты и СДБ. Как показали наши исследования [35], гидрофобно-пластифицированный цемент, удовлетворяя одновременно требованиям ГОСТ 10178-76 на гидрофобный и пластифицированный цемент, обеспечивает улучшение свойств бетона. Бетон на основе гидрофобно-пластифицированного портландцемента уложен в конструкции Киевской ГАЭС, которые работают в сложных эксплуатационных условиях.

Задача 3.2. Определить типовые составы бетона водохозяйственных сооружений, подвергаемого тепловлажностной обработке, при различных значениях отпускной прочности (воздухововлекающие добавки не вводятся).

Комплекс обобщенных математических моделей (табл. 3.7, 3.8) позволяет решить эту задачу, задаваясь любым уровнем отпускной прочности, изменяя в широком диапазоне общую длительность процесса тепловой обработки, удобоукладываемость смесей, активность и нормальную плотность цемента.

Алгоритм решения данной задачи отличается от предыдущего лишь тем, что относительно Ц/В решается не только модель проектной \hat{y}_6' , но и отпускной прочности y_5' (табл. 3.7). Для определения расхода цемента выбирается большее из двух найденных значений цементно-водного отношения. На рис. 3.14

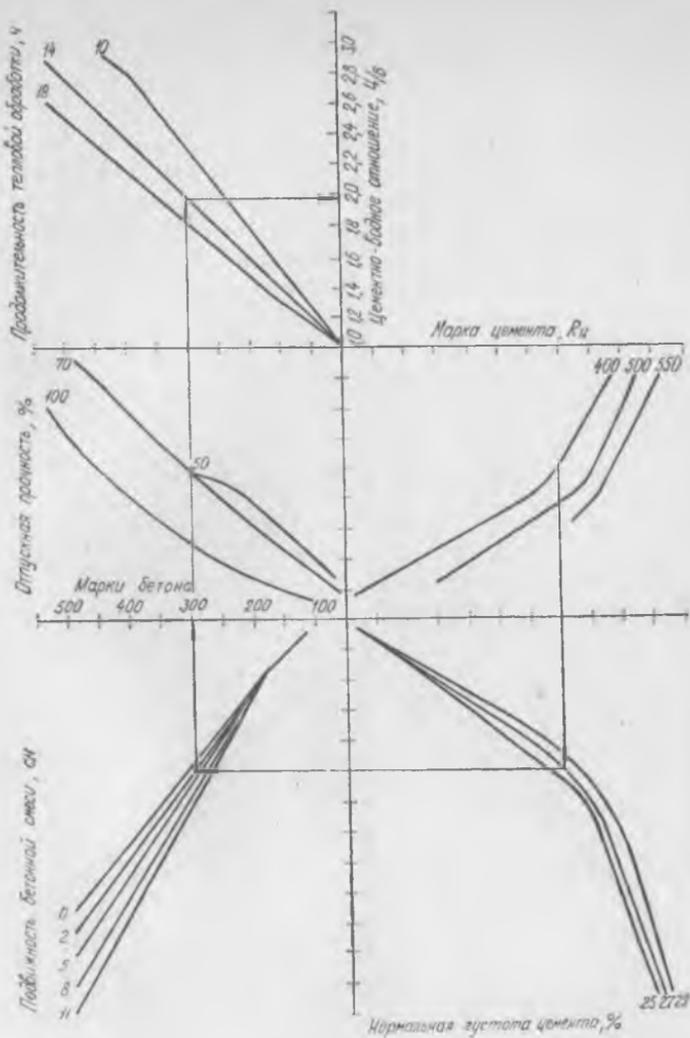


Рис. 3.14. Номограмма определения цементно-водного отношения для бетонов, подвергаемых тепловой обработке.

представлена номограмма для поиска C/V , обеспечивающего проектную прочность и удобоукладываемость бетона при заданном уровне отпускной прочности. Режимные параметры тепловой обработки в этой и последующих таблицах взяты из руководства [82].

Анализ полученных результатов показывает, что в зависимости от длительности тепловой обработки при различном сочетании исследуемых параметров свойством, определяющим расход цемента, может быть отпускная или проектная прочность. Первый случай наиболее типичен. Он характерен для

обычных марок бетона при сравнительно высоком уровне отпускной прочности ($\geq 70\%$). Второй возможен при невысокой отпускной прочности и удлиненных режимах тепловой обработки.

Практический интерес представляет анализ зависимости необходимого расхода цемента для получения бетона определенных марок при различном уровне отпускной прочности и заданной длительности тепловой обработки. Из него следует, что экономия цемента при снижении отпускной прочности

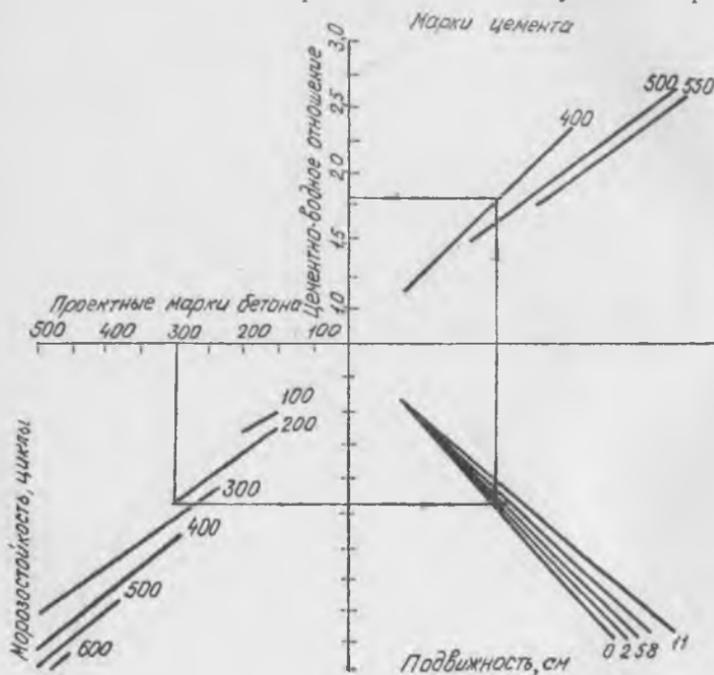


Рис. 3.15. Номограмма определения Ц/В для бетонов при оптимальном содержании эмульгированного воздуха.

особенно существенна для высокопрочных бетонов при коротких режимах тепловой обработки.

С помощью номограмм (рис. 3.11, 3.12, 3.13, 3.14) нетрудно рассчитать расходы основных компонентов на 1 м^3 бетонной смеси при заданных проектных требованиях проектной и отпускной прочности бетона, а затем, как и в задаче 3.1, привязать их к особенностям заполнителей и скорректировать при введении пластифицирующих ПАВ. Решение системы полиномиальных моделей на ЭВМ позволяет непосредственно выдавать на печать требуемые составы.

Задача 3.3. Определить типовые составы гидротехнического бетона водохозяйственных сооружений при введении воздухововлекающих ПАВ.

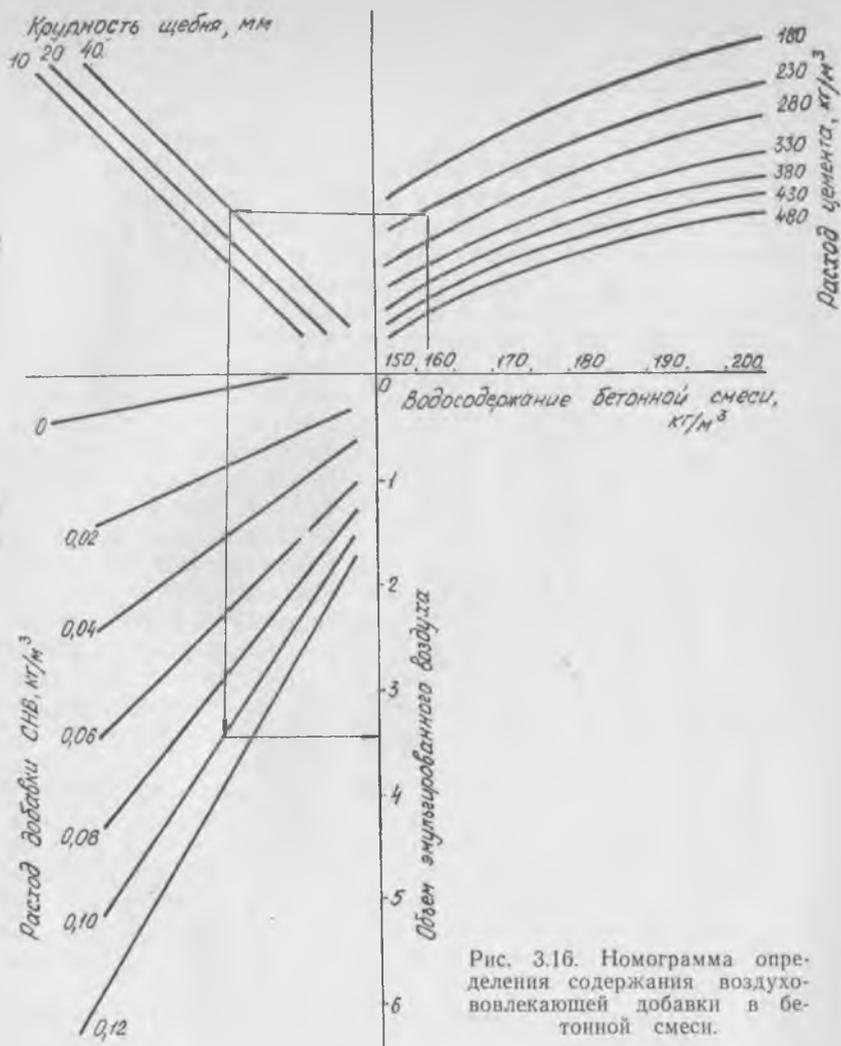


Рис. 3.16. Номограмма определения содержания воздухововлекающей добавки в бетонной смеси.

Введение добавок ПАВ является эффективным технологическим приемом регулирования соотношения проектных свойств гидротехнического бетона с уменьшением разрыва между значениями Ц/В, необходимыми по условиям прочности, морозостойкости и водонепроницаемости. Алгоритм решения задачи с помощью рассмотренных полиномиальных моделей предполагает на первом этапе определение такого содержания воздухововлекающей добавки, при котором свойства бетона обеспечивались при минимально возможном Ц/В. Для этого при фиксировании других факторов последовательно изменяется содержание до-

бавки, ЭВМ выдает на печать C/V для каждого из набора выходных параметров, а затем последовательно — расход воды, цемента, оптимальный объем эмульгированного воздуха, расход песка и щебня.

На рис. 3.15, 3.16 представлены номограммы, по которым можно производить расчеты C/V и содержания воздухововлекающей добавки для обеспечения заданного комплекса свойств, а в табл. 3.13 приведено оптимальное содержание эмульгированного воздуха. При введении комплексных добавок ПАВ типа

Таблица 3.13. ОПТИМАЛЬНОЕ СОДЕРЖАНИЕ
ВОВЛЕЧЕННОГО ВОЗДУХА ДЛЯ БЕТОНА
С РАЗЛИЧНЫМИ ПРОЕКТНЫМИ ТРЕБОВАНИЯМИ

Проектные марки бетона			Необходимый объем эмуль- гированного воздуха, %
прочность при сжатии	морозо- стойкость	водонепро- ницаемость	
200	100	4	1,5—2
	200	4—6	2,5—3,5
	300	4—6	4—4,5
300	200	6	1,5—2
	300	6—8	2,5—3
	400	6—8	3,5—4
400	300	8—10	2,5—3
	400	10	3,5—4
	500	10—12	4—4,5

СДБ+СНВ необходимо дополнительно учесть возможное снижение водосодержания бетонной смеси с помощью коэффициентов (табл. 3.6). Долю песка в смеси заполнителей можно находить на номограмме (рис. 3.13).

Рассмотренные задачи реализованы на ЭВМ. Полученные расчетные составы гидротехнического бетона рекомендованы как базовые для заводов и строительных организаций Минсельстроя УССР.

В отличие от СН 386-74 они позволяют получить развернутую систему нормативных расчетных показателей по расходу цемента для бетонов с проектными требованиями по удобоукладываемости смеси, проектной и отпускной прочности, морозостойкости и водонепроницаемости при различной длительности как нормального, так и ускоренного твердения на цементах различных марок и нормальной густоты без и при введении добавок ПАВ.

В СН 386-74 расход цемента для бетонов изделий, к которым предъявляются требования по морозостойкости и водонепроницаемости, указан без учета рассмотренных нами факторов и, как показывает практический опыт, он существенно завышен.

Экспериментальный подбор составов бетона необходимой морозостойкости и водонепроницаемости очень трудоемок. Поэтому заводы и строительные организации, обладающие мало-мощными лабораториями, не осуществляют подбор составов в необходимом объеме, а руководствуются типовыми нормами, что ведет к значительному перерасходу цемента и не стимулирует внедрение прогрессивных технологических способов повышения морозостойкости и водонепроницаемости бетона. Кроме того, применение бетонов с большим содержанием цемента,

например в условиях мелиоративного строительства в сухую и жаркую погоду, приводит к значительному ухудшению качества конструкций вследствие развития пластической усадки и трещинообразования. Стремление довести водоцементное отношение до требуемого условиями морозостойкости и водонепроницаемости вызывает обычно завышение фактической марки бетона по сравнению с проектной, обесценивает конструктивные расчеты, ведет к неоптимальности запроектированных сечений элементов конструкций и их армирования.

Таким образом, практическая важность учета реального соотношения свойств и проектирования оптимальных составов бетона с требуемым комплексом свойств очевидна. Строгое решение сформулированных выше задач в широком плане возможно лишь с привлечением математической теории эксперимента и на основе комплекса математических моделей.

Система номограмм, полученных при решении математических моделей, позволяет легко найти для заданных условий состав бетонной смеси. При отклонении фактических условий от принятых необходимо экспериментальное корректирование расчетных составов. Если в бетонную смесь не вводятся специальные добавки-регуляторы свойств, то при помощи табл. 3.11 с учетом требуемых проектных марок (морозостойкости и водонепроницаемости) устанавливается необходимая проектная марка бетона по прочности. Для бетона, подвергаемого тепловой обработке, учитывается при этом также требуемая отпускная прочность. Если известен для предприятия коэффициент вариации, то можно требуемую прочность установить по формуле

$$R_{28} = k_{c_v} R_6, \quad (3.40)$$

где R_6 — нормируемая проектная марка бетона; k_{c_v} — коэффициент, устанавливаемый в зависимости от коэффициента вариации по рекомендациям ГОСТ 18105-75:

c_v	K_{c_v}	c_v	K_{c_v}	c_v	K_{c_v}
6	0,83	12	0,96	18	1,14
8	0,87	14	1,02	20	1,22
10	0,91	16	1,08		

При использовании воздухововлекающей добавки типа СНВ по табл. 3.13 устанавливают оптимальный объем эмульгированного воздуха. Используя номограммы (рис. 3.11—3.16), определяют необходимые значения $Ц/В$, $В$, r и расход добавки, а затем по известным формулам легко найти расход цемента, песка и щебня.

Пример 3.1. Требуется запроектировать составы бетона для сооружений Ровенской атомной электростанции на тракайском песке ($M_R=2,6$; $V_n=7\%$) и местном мелком песке без добавок ПАВ, а также с применением

добавки СДБ и композиций СДБ+СНВ. Применяется портландцемент с минеральными добавками Здолбуновского цементно-шиферного комбината и гранитный щебень 5...40 мм. Проектные требования к бетонам приведены в табл. 3.14.

В этом примере предлагается запроектировать составы на тех же материалах, на которых разработаны математические модели (табл. 3.2, 3.4), поэтому нет необходимости вводить специальные «привязочные» коэффициенты.

Таблица 3.14. СОСТАВЫ БЕТОНА ДЛЯ СООРУЖЕНИЙ РОВЕНСКОЙ АЭС

Проектные марки бетона			Подвижность смеси, см	Составы бетона на 1 м ³					
Прочность при сжатии	Морозостойкость	Водонепроницаемость		Ц/В	В	ш	цемент, кг	песок, кг	щебень, кг
Без добавок									
200	150	6	3—5	1,95	178	0,34	347	616	1219
300	200	8	3—5	2	181	0,33	362	590	1223
300	300	8	3—5	2,5	190	0,31	475	519	1178
Добавка СНВ (0,02%)									
200	150	6	3—5	1,4	168	0,37	235	694	1258
300	200	8	3—5	1,8	173	0,34	311	630	1246
300	300	8	3—5	2,1	181	0,31	380	560	1249
Добавка СДБ (0,25%)									
200	150	6	3—5	1,95	160	0,35	312	660	1250
300	200	8	3—5	2,0	163	0,34	326	635	1256
300	300	8	3—5	2,5	171	0,34	428	599	1186
Добавка СДБ+СНВ (0,25%+0,02%)									
200	150	6	3—5	1,4	152	0,41	213	815	1195
300	300	8	3—5	1,8	156	0,37	281	711	1234
300	300	8	3—5	2,1	161	0,34	344	641	1232

Примечание. Составы бетона приведены на портландцементе с минеральными добавками марки 500 (НГ=27%). Дозировки добавок приведены в процентах от массы цемента (в пересчете на сухое вещество).

При назначении составов бетона без воздухововлекающих добавок по табл. 3.11 устанавливаем необходимые марки бетона по прочности на сжатие, которые обеспечивают требуемые (табл. 3.14) показатели по морозостойкости и водонепроницаемости. Затем последовательно по номограммам рис. 3.11—3.13 определяем необходимые значения цементно-водного отношения, расхода воды, доли песка в смеси заполнителей и рассчитываем расходы цемента, песка и щебня на 1 м³ бетона. При введении добавок СДБ и СДБ+СНВ представляется возможным уменьшить водопотребность бетонной смеси и соответственно расход цемента. Снижение водопотребности бетонной смеси при введении СДБ можно оценить с помощью поправочных коэффициентов (табл. 3.6). Для назначения составов бетона с воздухововлекающей добавкой предварительно по табл. 3.13 находим требуемый объем эмульгированного воздуха, а затем по номограммам рис. 3.11, 3.12, 3.15 определяем Ц/В, В и ш.

Расчетные составы бетона приведены в табл. 3.14.

Пример 3.2. Требуется запроектировать составы бетона для сооружений Стрыйского гидроузла на песке и щебне из местной песчано-гравийной смеси без добавок ПАВ, а также с применением добавки СДБ и композиции СДБ+СНВ. Применяется портландцемент с минеральными добавками Здолбуновского цементно-шиферного комбината.

Для назначения составов бетона с применением местных заполнителей необходимо установить «привязочные коэффициенты». С этой целью для двух-трех составов, рассчитанных по номограммам (рис. 3.11—3.16), экспериментально определяют фактическую подвижность смеси и свойства бетона.

Таблица 3.15. СОСТАВЫ БЕТОНА ДЛЯ СООРУЖЕНИЙ СТРИЙСКОГО ГИДРОУЗЛА (ПЕСОК И ЩЕБЕНЬ ИЗ МЕСТНОЙ ПЕСЧАНО-ГРАВИЙНОЙ СМЕСИ)

Проектные марки бетона			По- дви- ж- ность смеси, см	Составы бетона на 1 м ³					
проч- ность при сжатии	моро- зостой- кость	водоне- прони- цае- мость		Ц/В	В	с	цемент, кг	песок, кг	щебень, кг
Добавка СДБ 0,3%									
200	—	—	4—6	1,68	177	0,38	297	670	1140
300	—	—	4—6	2,12	183	0,35	388	665	1125
Добавка СНВ 0,02%									
200	100	4	4—6	1,5	186	0,35	279	686	1074
Добавка СНВ+СДБ (0,3%+0,02%)									
200	100	4	4—6	1,5	170	0,39	255	710	1110
Без добавок									
200	—	—	4—6	1,68	197	0,35	331	609	1132
300	—	—	4—6	2,12	208	0,32	474	511	1087

Примечание. Дозировки добавок даны в процентах от массы цемента в пересчете на сухое вещество.

«Привязочные коэффициенты» $k_{пр}$ для водопотребности $k_{пр.в}$ и цементно-водного отношения $k_{пр.Ц/В}$ находят как усредненные отношения фактических и расчетных значений V и $Ц/В$, необходимых для обеспечения определенных показателей подвижности и прочности бетона.

В нашем случае $k_{пр.в} = 1,18$; $k_{пр.Ц/В} = 1,14$. Откорректированные составы бетона приведены в табл. 3.15.

Пример 3.3. Требуется запроектировать составы бетона для Здолбуновского завода железобетонных изделий на тракайском и местном мелком кварцевом песке ($M_R = 1,2$; $V_n = 13\%$), обеспечивающие при тепловлажностной обработке 70%-ную отпускную прочность. Длительность пропаривания 14 ч. Щебень 5...20 мм и портландцемент с минеральными добавками Здолбуновского цементно-шиферного комбината.

Повышение водопотребности бетонной смеси за счет применения мелкого песка можно предварительно оценить по известным рекомендациям [4, 85], учтя модуль крупности или водопотребность, а затем окончательно откорректировать с помощью «привязочного» коэффициента. Рекомендованные составы бетона приведены в табл. 3.16.

Таблица 3.16. СОСТАВЫ БЕТОНА ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ,
ИЗГОТОВЛИВАЕМЫХ НА ЗДОЛБУНОВСКОМ ЗАВОДЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Проектная марка бетона	Подвижность смеси, см	Составы бетона на 1 м ³					
		Ц/В	В	ч	цемент, кг	песок, кг	щебень, кг
100	4	1	185	0,45	185	637	1347
		1	200	0,39	200	678	1170
200	0	1,5	165	0,40	248	775	1222
		1,5	175	0,33	263	576	1290
200	3	1,5	180	0,36	270	686	1220
		1,5	197	0,32	296	589	1251
200	6	1,5	190	0,36	285	672	1195
		1,5	206	0,32	309	578	1227
300	3	2	183	0,34	366	618	1199
		2	201	0,30	402	522	1218
300	6	2,1	196	0,33	412	576	1169
		2,1	212	0,29	445	486	1190
350	3	2,3	190	0,31	437	539	1200
		2,3	213	0,27	490	441	1194
400	7—9	2,2	210	0,34	462	554	1129
		2,2	238	0,30	524	430	1109

Примечание. В числителе составы для тракийского песка, знаменателе — мелкого местного песка. Расчетная нормальная густота цемента 27%. Составы бетона марок 400 приведены на портландцементе с минеральными добавками М 500.

В приведенных выше примерах оптимальные составы бетона определены с помощью номограмм, полученных при решении многофакторных математических моделей. Рассмотренные задачи при реализации их на ЭВМ могут входить в комплекс задач автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) строительных организаций и заводов строительной индустрии.

ГЛАВА 4

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРИ ОПТИМАЛЬНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ СОСТАВОВ БЕТОНА

Математическое моделирование зависимостей, определяющих свойства бетона — необходимая основа системного анализа при оптимальном проектировании его составов. Количественные зависимости, адекватно описывающие взаимосвязи между свойствами бетона и технологическими факторами, позволяют

решить первую задачу системного анализа (рис. 1.1'), т. е. установить составы бетона, обеспечивающие комплекс проектных показателей при минимальном расходе цемента на определенных исходных материалах и заданном режиме твердения. Вместе с тем возможно, как мы уже показали, использовать структурно-критериальный и кибернетический методы. В условиях производственного процесса оптимальные составы бетона могут изменяться в зависимости от вида исходных материалов, добавок, режимов нормального и ускоренного твердения, принятого уровня отпускной прочности, удобоукладываемости бетонной смеси и т. д. Таким образом, при системном подходе, основанном на комплексном анализе объекта с учетом конечных критериев его эффективности, оптимизация составов бетона связана с альтернативной оценкой ряда других технологических решений (рис. 1.1). Ее выполнение возможно при установлении количественных зависимостей между критериями оптимальности и исследуемыми технологическими параметрами.

В данной главе на основе принципов системного анализа рассмотрены решения задач выбора оптимальных видов и марок портландцемента для бетона с различными проектными требованиями, сравнительной эффективности портландцемента и гидроробного цемента, выбора оптимальной продолжительности тепловлажностной обработки и значения удобоукладываемости бетонной смеси. Выполнен анализ эффективности нормальной густоты цемента, воздухововлекающих и пластифицирующих добавок, марочного возраста бетона, значения отпускной прочности. Разработана методика оптимизации проектных марок бетона на примере ряда конструкций. Результаты решения этих задач опубликованы в ряде работ [36, 37, 39—48] и апробированы на практике.

При анализе полученных выводов необходимо учитывать, что они справедливы для исследованной системы с ее исходными условиями и ограничениями.

4.1. Построение и анализ моделей приведенных затрат

Для решения сформулированных выше задач построены полиномиальные модели приведенных затрат на материалы бетонной смеси S_1 и S_1' , суммарных затрат на материалы и тепловую обработку S_2 , перемешивание S_3 и уплотнение бетонной смеси S_4 . Для построения моделей затрат S_1 использован план Ha_5 , S_2 — план B_6 и S_4 — трехфакторный план второго порядка [3]. Модель S_3 получена аппроксимацией зависимости затрат на перемешивание от удобоукладываемости бетонной смеси по данным работы [84].

Изучали влияние на значение затрат S_1 следующих основных факторов (табл. 4.1): удобоукладываемости бетонной

смеси x_8 , цементно-водного отношения x_2 , нормальной густоты цементного теста x_5 , удельных приведенных затрат на цемент x_9 и добавки x_{10} . Последние два фактора являются интегральными показателями, позволяющими в одной модели затрат учесть влияние вида и марки цемента для разных поясов цен, а также различных добавок. При получении модели S_2 допол-

Таблица 4.1. УСЛОВИЯ ПЛАНИРОВАНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРИВЕДЕННЫХ ЗАТРАТ

Факторы	Уровни варьирования			Интервалы варьирования
	-1	0	+1	
Цементно-водное отношение (x_2)	1,3	2,1	2,9	0,8
Нормальная густота цементного теста (x_5), %	24,6	27,2	29,8	2,6
Удобоукладываемость (x_8) по условной шкале	-1	0	+1	1
Продолжительность тепловой обработки (x_7), ч	10	14	18	4
Приведенные затраты на цемент (x_9), руб/кг	0,01	0,025	0,04	0,015
Приведенные затраты на добавку (x_{10}), руб/кг	0	1	2	1
Вид сечения конструкции (x_{11})	-1	0	+1	1
Степень армирования (x_{12})	-1	0	+1	1

нительно анализировали воздействие длительности тепловой обработки x_7 .

Для универсализации моделей затрат все факторы планировали (табл. 4.1) в широком диапазоне. Технологические факторы x_2 , x_5 , x_8 варьировали в тех же интервалах, что и при построении моделей свойств бетона (табл. 3.1).

Расчет приведенных затрат в каждой строке матрицы плана производили по формуле 1.2.

Применительно к затратам на материалы S_1 , применяемые при изготовлении бетонной смеси (без учета стоимости воды), формула принимает вид

$$S_1 = S_{ц} + S_{п} + S_{щ} + S_{д}, \quad (4.1)$$

или

$$S_1 = Ц(C_{ц} + 0,15 k_{ц}) + П(C_{п} + 0,15 k_{п}) + Щ(C_{щ} + 0,15 k_{щ}) + Д(C_{д} + 0,15 k_{д}),$$

где $S_{ц}$, $S_{п}$, $S_{щ}$, $S_{д}$ — соответственно удельные приведенные затраты на цемент, песок, щебень и добавки, руб. на 1 м³ бетонной смеси; $C_{ц}$, $C_{п}$, $C_{щ}$, $C_{д}$ — стоимость цемента, песка, щебня и добавки на 1 м³ бетонной смеси; $k_{ц}$, $k_{п}$, $k_{щ}$, $k_{д}$ — удельные капиталовложения соответственно в цементную промышленность, производство песка и щебня и химических добавок ($k_{ц} = 35$ руб/т; $k_{п} = 3,7$ руб/м³; $k_{щ} = 5,6$ руб/м³ [84]).

Суммарные затраты на материалы и тепловую обработку находили по формуле

$$S_2 = S_1 + S_{т.о.}, \quad (4.2)$$

где $S_{т.о.}$ — затраты собственно на тепловую обработку, включающие усредненные [100] затраты на содержание и эксплуа-

тацию камер твердения, форм и занимаемой камерами площади цеха по наиболее распространенной поточно-агрегатной технологии.

Расчеты, выполненные И. И. Цыганковым [100], позволили вывести формулу усредненных приведенных затрат на тепловую обработку 1 м³ изделий в ямных камерах, руб/м³

$$S_{т.о} = 0,267 \beta S + 0,95. \quad (4.3)$$

В расчетах приняты [100]: масса формы 4 т/м³, балансовая стоимость форм 600 руб/т, стоимость пара 3,5 руб/т, удельные капиталовложения в производство металлических форм 300 руб/т.

Значение βS находили для условий двухсменного формирования по данным работы [100].

Для определения расхода цемента при планируемой величине Ц/В по номограмме (рис. 3.11) находили расход воды, обеспечивающий требуемую подвижность или жесткость смеси.

Долю песка в смеси заполнителей устанавливали по номограмме (рис. 3.13), а затем из условия абсолютных объемов вычисляли расход песка и щебня в 1 м³ бетонной смеси.

Таблица 4.2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРИВЕДЕННЫХ ЗАТРАТ

Выходные параметры	Уравнения регрессии
Приведенные затраты на материалы бетонной смеси (S_1), руб/м ³ (портландцемент)	$S_1 = 20,88 + 0,49x_8 + 4,03x_2 + 0,34x_5 + 6,46x_9 + 1,03x_{10} + 0,25x_2^2 + 0,46x_2x_8 + 0,87x_8x_9 + 2,77x_2x_9 + 0,31x_5x_9 + 0,36x_5x_{10}. \quad (4.7)$
Приведенные затраты на материалы бетонной смеси (S_1'), руб/м ³ (гидрофобный портландцемент)	$S_1' = 20 + 0,19x_8 + 3,17x_2 + 6,08x_9 + 1,15x_2^2 + 1,08x_5^2 + 1,17x_9^2 + 0,2x_8x_2 + 1,05x_8x_9 + 2,54x_2x_9 + 0,77x_2x_5 + 0,26x_9x_5. \quad (4.8)$
Приведенные затраты на материалы и тепловую обработку бетона (S_2), руб/м ³	$S_2 = 26,74 + 0,84x_8 + 3,93x_2 + 0,35x_5 + 6,53x_9 + 0,95x_{10} + 0,66x_7 - 0,19x_8^2 + 0,12x_2^2 - 0,52x_7^2 + 0,36x_8x_2 + 0,81x_8x_9 + 0,06x_8x_{10} + 0,06x_8x_7 + 0,1x_2x_5 + 0,06x_2x_{10} + 2,71x_2x_9 + 0,46x_2x_7 + 1,76x_9x_7. \quad (4.9)$
Приведенные затраты на перемешивание (S_3), руб/м ³	$S_3 = 2,2 - 0,4x_8. \quad (4.10)$
Приведенные затраты на уплотнение бетонной смеси (S_4), руб/м ³	$S_4 = 8,57 - 0,52x_8 + 0,75x_{11} + 2x_{12} + 0,55x_8^2 - 1,22x_{11}^2 - 0,24x_8x_{12} - 0,32x_8x_{12} + 0,25x_{11}x_{12}. \quad (4.11)$

Примечание. Все расчеты с применением моделей приведенных затрат выполнены для второго пояса цен.

Модель затрат на формирование бетонной смеси S_4 получали при варьировании трех факторов (табл. 4.1): удобоукладываемости x_8 , сложности сечения x_{11} и степени армирования x_{12} . В соответствии с трудоемкостью изготовления классифицировали характерные конструкции водохозяйственного и сельскохозяйственного назначения на три группы:

1) простого сечения $x_{11} = -1$ (плиты крепления откосов каналов, элементы подпорных стенок, линейные изделия прямоугольного сечения, формуемые горизонтально и т. п.);

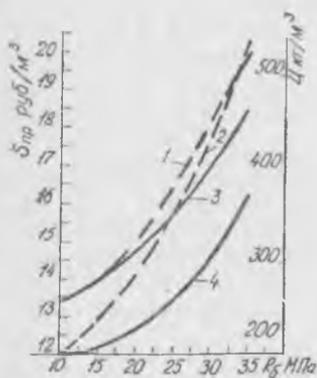


Рис. 4.1. Влияние подвижности бетонной смеси и прочности пропаренного бетона на приведенные затраты и расход цемента ($\tau_{т.о} = 14$ ч., $R_n = 40$ МПа, $НГ = 27\%$, отпускная прочность бетона 70% проектной):

1, 3 — приведенные затраты соответственно при $OK = 5$ см и 11 см; 2, 4 — расход цемента при $OK = 5$ и 11 см.

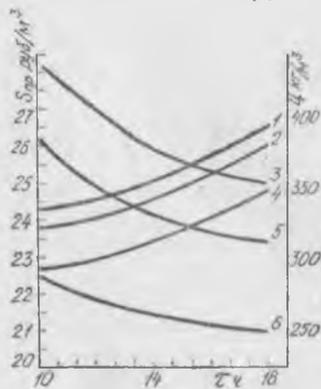


Рис. 4.2. Влияние продолжительности тепловой обработки на приведенные затраты и расход цемента ($OK = 4 \div 6$ см, $НГ = 27\%$, отпускная прочность бетона — 70% проектной):

1, 2 — приведенные затраты на бетон М 300 соответственно при $R_n = 40$ и 50 МПа; 3, 5 — расход цемента при $R_n = 40$ и 50 МПа; 4 — приведенные затраты на бетон М 200 при $R_n = 40$ МПа.

2) сечения средней сложности $x_{11} = 0$ (плоские изделия высотой более 50 см, формуемые вертикально, балки двутаврового профиля высотой до 1 м, кольца, лотки и т. п.);

3) сложного сечения $x_{11} = +1$ (криволинейные элементы резервуаров, прямоугольные трубы, балки двутаврового профиля высотой более 1 м и т. п.).

В пределах каждой группы конструкции разделяли по степени армирования в зависимости от расхода арматурной стали на слабоармированные $x_{12} = -1$ — расход стали менее 80 кг/м³; среднеармированные $x_{12} = 0$ — 80 ÷ 180 кг/м³ и густоармированные $x_{12} = +1$ — более 180 кг/м³.

Приведенные затраты на формирование рассчитывали в соответствии с руководством [84] для типовых технологических

линий, работающих по поточно-агрегатному способу, размещаемых в полете УП-1.

В каждой строчке матрицы плана приведенные затраты (руб/м³) находили по формуле

$$S_4 = (3,2 \Sigma A_{об} + \mathcal{E} + \mathcal{Z} + Ц \cdot P) / Pr, \quad (4.4)$$

где $\Sigma A_{об}$ — сумма амортизационных отчислений по оборудованию; 3,2 — коэффициент, учитывающий затраты на текущий ремонт; \mathcal{E} — стоимость электроэнергии, необходимой для работы

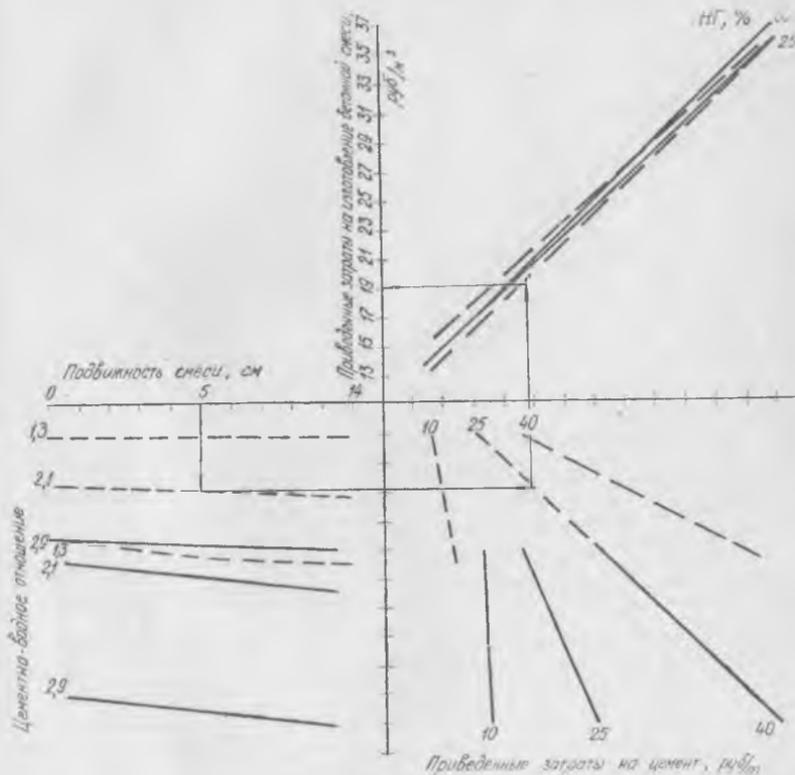


Рис. 4.3. Номограмма приведенных затрат на материалы бетонной смеси (сплошные линии — затраты на портландцемент с минеральными добавками; штриховые — гидрофобный портландцемент с минеральными добавками).

формовочного и транспортного оборудования линии; \mathcal{Z} — полная заработная плата производственных рабочих формовочного цеха; $Ц \cdot P$ — цеховые расходы, включающие заработную плату цехового персонала и сумму отчислений на амортизацию здания и спецоборудований; Pr — годовая производительность линии тыс. м³, Pr рассчитывали по формуле

$$Pr = \frac{60 hc}{t} v, \quad (4.5)$$

где h , s и v — соответственно число рабочих часов и дней в году, а также объем одновременно формируемых изделий [84]; t — цикл формирования на посту укладки и уплотнения бетона, мин.

Продолжительность цикла формирования устанавливали в зависимости от сложности сечения, густоты армирования и удобоукладываемости по усредненным нормативным данным и результатам хронометражных наблюдений на заводах.

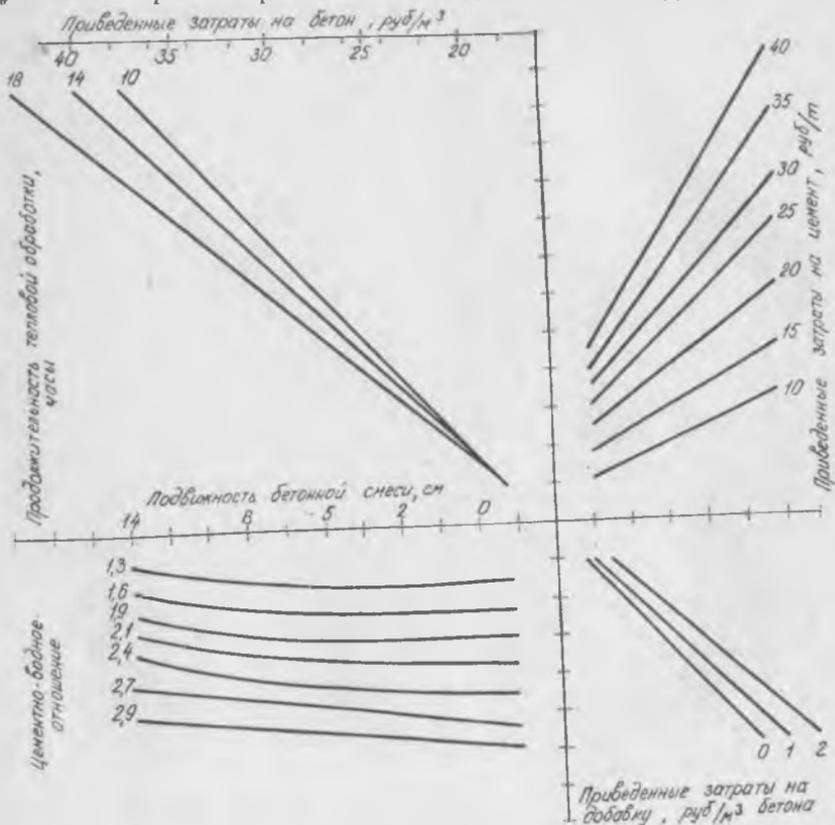


Рис. 4. 4. Номограмма приведенных затрат на материалы и тепловую обработку бетона.

Математические модели затрат S_1 , S_1' , S_2 , S_3 , S_4 приведены в табл. 4.2. Кроме того, для оптимизации проектных параметров конструкций построены модели затрат на их изготовление в зависимости от марки бетона, класса арматурной стали и геометрических размеров, которые рассмотрим немного дальше.

При построении математических моделей приведенных затрат методы планирования эксперимента использованы для сокращения и формализации инженерных и технико-экономических расчетов, что является сравнительно новым и перспективным

направлением применения математической теории эксперимента [44, 47].

В приведенных математических моделях затрат (табл. 4.2) значения факторов даются в кодированном виде. Для перехода к натуральным необходимо использовать следующие формулы:

$$x_6 = \frac{y - 1}{1}, \quad x_2 = \frac{Ц/В - 2,1}{0,8}, \quad x_5 = \frac{НГ - 27,2}{2,6},$$

$$x_7 = \frac{\tau_{т.о} - 14}{4}, \quad x_9 = \frac{S_{ц} - 0,025}{0,015}, \quad x_{10} = \frac{S_{д} - 1}{1}, \quad (4.6)$$

где $У$ — условная удобоукладываемость; $Ц/В$ — цементно-водное отношение; $НГ$ — нормальная густота цемента, %; $\tau_{т.о}$ —

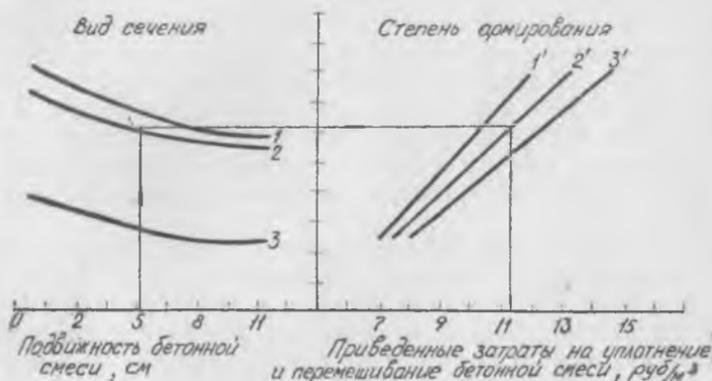


Рис. 4.5. Номограмма приведенных затрат на уплотнение и перемешивание бетонной смеси:

1—3 — соответственно сложное, среднее и простое сечение; 1'—3' — соответственно слабо-, средне- и густоармированные конструкции.

длительность тепловой обработки, ч; $S_{ц}$ — приведенные затраты на цемент, руб/кг; $S_{д}$ — приведенные затраты на добавку, расходуемую на 1 м^3 бетонной смеси, руб/кг.

Из анализа моделей (рис. 4.1, 4.2) можно проследить как совместное, так и индивидуальное влияние каждого из исследуемых факторов на размер затрат. Оно будет различным в зависимости от конкретных исходных условий. Для практических расчетов удобно использовать номограммы (рис. 4.3—4.5), принимая во внимание условия, при которых они справедливы.

4.2. Анализ эффективности составов бетонных смесей

При совместном решении технологических моделей свойств бетона и экономических моделей затрат представляется возможным выполнить анализ эффективности видов и марок цемента, воздухововлекающих и пластифицирующих добавок, изменения

нормальной густоты, длительности нормального и ускоренного твердения и выбрать оптимальные варианты.

В общем случае, когда в задаче проектирования составов бетона наряду с выбором количественного соотношения компонентов включается и установление их наиболее рациональных качественных характеристик, оптимизация должна сводиться к обеспечению минимума затрат при заданных проектных свойствах бетона (рис. 1.1).

Учитывая дефицитность цемента и важность его эффективного использования при оценке оптимальности составов вместе с главным критерием (суммарными приведенными затратами на изготовление бетона) необходимо принимать во внимание и дополнительный — коэффициент рационального использования цемента $K_{р.и.ц.}$.

При оценке эффективности составов бетона под коэффициентом рационального использования цемента, определяемым по формуле (1.3), следует понимать отношение затрат на цемент, условно считаемый эталонным, для получения бетона с необходимыми проектными требованиями к суммарным затратам на применяемый цемент и технологические приемы, направленные на снижение его расхода (введение добавок, активизация и т. д.).

Примем при оценке эффективности цементов в качестве эталонного чистоклинкерный портландцемент с нормальной густотой 27% марки 400 для бетонов марок до 350 включительно и марки 500 для бетонов более высоких марок. Стоимости портландцемента, портландцемента с минеральными добавками и гидрофобного портландцемента принимаем для второго пояса цен соответственно: марки 400 — 16,1; 14,7 и 14,95 руб/т; марки 500 — 18,5; 16,8 и 17,05 руб/т [85].

Для анализа эффективности различных видов и марок цемента исследуем зависимости расхода и коэффициента рационального использования цемента, а также приведенных затрат на изготовление бетона с определенными проектными требованиями.

Расход цемента находим по номограммам (рис. 3.11—3.16), которые можно получить, решив технологические модели, рассмотренные в главе 3. При оценке сравнительной эффективности портландцемента и портландцемента с минеральными добавками принимаем допущение (табл. 4.3, 4.4), что при одинаковой активности и нормальной густоте их расход в бетонах практически одинаков. Из данных табл. 4.3, 4.4. следует, что если главное требование к бетону — прочность, то при одинаковой марке и нормальной густоте как в случае нормального твердения, так и тепловой обработке, экономически наиболее эффективно применение портландцемента с минеральными добавками. Чистоклинкерный портландцемент при действующих ценах может быть эффективен по сравнению с равномарочным порт-

ландцементом с минеральными добавками уже при расходе на 10% меньше. На сравнительную эффективность этих цементов, очевидно, влияют многие факторы: состав клинкера, вид добавок, дисперсность и др. При нормировании прочности в 180-суточном

Таблица 4.3. ЗНАЧЕНИЯ $K_{р.и.ц}$ ДЛЯ БЕТОНОВ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ $НГ$ И МАРКИ ЦЕМЕНТА (ТВЕРДЕНИЕ НОРМАЛЬНОЕ, 28 сут.)

Вид цемента	$НГ$, %	Марка цемента	Марка бетона				
			150	200	250	300	350
Портландцемент	25	400	1	1,02	1,04	1,04	1,05
			1,01	1,02	1,03	1,04	1,06
	27	400	1	1	1	1	1
			0,96	0,96	0,95	0,94	0,93
	29	400	0,97	0,96	0,95	0,94	0,92
			—	—	1,04	1,07	1,12
	25	500	—	—	0,96	1,02	1,08
			—	—	1,02	1,04	1,08
	27	500	—	—	0,94	0,98	1,04
			—	—	0,98	0,99	1,02
	29	500	—	—	0,90	0,93	0,98
			—	—	0,90	0,93	0,98
Портландцемент с минеральными добавками	25	400	1,06	1,09	1,10	1,10	1,11
			1,08	1,09	1,10	1,11	1,13
	27	400	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06
			1,02	1,02	1,01	1,00	0,99
	29	400	1,03	1,02	1,01	1,00	0,98
			—	—	1,12	1,15	1,19
	25	500	—	—	1,03	1,09	1,16
			—	—	1,09	1,12	1,16
	27	500	—	—	1,01	1,05	1,11
			—	—	1,05	1,06	1,09
	29	500	—	—	0,96	1,00	1,04
			—	—	0,93	0,94	0,97
Гидрофобный портландцемент с минеральными добавками	27	400	0,90	0,91	0,93	0,94	0,97
			0,89	0,91	0,93	0,95	0,97
	27	500	—	—	0,98	1,00	1,00
			—	—	0,91	0,93	0,94

Примечание. В числителе приведено значение $K_{р.и.ц}$ для бетонов с $Ж=30 \div 50$ с, в знаменателе с $ОК=10 \div 12$ см.

возрасте значение приведенных затрат и $K_{р.и.ц}$ для бетонов на гидрофобном цементе приближается к аналогичным показателям для бетонов на портландцементе с минеральными добавками (рис. 4.6). Этот вывод справедлив, если нет необходимости

Таблица 4.4. ЗНАЧЕНИЯ $K_{р и ц}$ ДЛЯ БЕТОНОВ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ $НГ$,
 МАРКИ ЦЕМЕНТА И ВЕЛИЧИНЫ ОТПУСКНОЙ ПРОЧНОСТИ
 (ТВЕРЖДЕНИЕ В УСЛОВИЯХ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ, 28 СУТ. ОК=4 ... 6 СМ)

Вид цемента	$НГ$, %	Марка цемента	Марка бетона				
			150	200	250	300	350
Портландцемент	25	400	1,12	1,11	1,11	1,11	—
			1,11	1,11	—	—	—
	27	400	1	1	1	1	—
			1	1	—	—	—
	29	400	0,88	0,88	0,88	0,87	—
			0,88	0,88	—	—	—
	25	500	—	1,01	1,08	1,16	1,08
			1,03	1,25	1,08	1,08	—
27	500	—	0,94	1	1,07	1	
		0,86	1,05	0,90	—	—	
Портландцемент с минеральными добавками	25	400	1,19	1,19	1,18	1,18	—
			1,18	1,01	—	—	—
	27	400	1,06	1,06	1,06	1,06	—
			1,06	1,06	—	—	—
	29	400	0,93	0,93	0,93	0,93	—
			0,94	0,80	—	—	—
	25	500	—	1,08	1,15	1,24	1,16
			1,10	1,21	1,16	1,16	—
	27	500	—	1,00	1,07	1,15	1,07
			1,02	1,12	1,07	1,06	—
	29	500	—	0,91	0,97	1,04	0,97
			0,93	1,02	0,97	—	—

Длительность тепловой обработки 14 ... 16 ч,
 отпускная прочность — 70% проектной

Портландцемент	27	400	1,04	1,04	1,04	1,04	1,03
			1,04	1,05	1,05	1,06	—
27	400	1	1	1	1	1	
		1	1	1	1	—	
29	400	0,94	0,94	0,94	0,93	0,93	
		0,94	0,94	0,93	—	—	
25	500	—	0,99	1,03	1,07	1,12	
		1,00	1,06	1,12	1,20	1,04	
27	500	—	0,96	1	1,03	1,08	
		0,97	1,03	1,08	1,16	1	
29	500	—	0,91	0,94	0,97	1,01	
		0,92	0,97	1,02	1,09	1,06	

Вид цемента	НГ, %	Марка цемен- та	Марка бетона				
			150	200	250	300	350
Портландцемент с ми- неральными добавка- ми	25	400	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11
			1,11	1,11	1,11	1,12	—
	27	400	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06
			1,06	1,06	1,06	1,06	—
	29	400	1,00	1,00	1,00	0,99	0,99
			1,00	1,00	0,99	—	—
	25	500	—	1,06	1,10	1,15	1,20
			1,18	1,14	1,20	1,29	1,11
	27	500	—	1,03	1,07	1,11	1,15
			1,14	1,10	1,16	1,24	1,07
	29	500	—	0,97	1,00	1,04	1,09
			1,07	1,04	1,09	1,17	1,01

Примечание. В числителе приведены значения $K_{р.п.п}$ для бетонов с отпускной прочностью 70% проектной, а в знаменателе — 100%.

использовать специальные свойства гидрофобного цемента. Известно, что одно из главных преимуществ гидрофобного цемента — его высокая сохранность. Как показали исследования [56], гигроскопичность гидрофобного портландцемента в сравнении с портландцементом при хранении в помещении как при 60%-ной, так и при 90%-ной относительной влажности меньше в 1,3—1,5 раза в 90 сут. и 2—3,6 раза в 180 и 360 сут. Гигроскопичность негидрофобного портландцемента резко увеличивается после трех месяцев хранения, к 180 сут. он сильно комкуется, а к годовичному сроку при 90%-ной относительной влажности превращается в твердый камень. Испытания показали [56], что гидрофобный портландцемент после десяти месяцев хранения в условиях строительства Хантайской ГЭС не потерял своей активности, в то время, как снижение прочности портландцемента составило 10...12 МПа. Фактическая экономия гидрофобного цемента за счет сохранения активности составила 10...15%. В условиях, когда неизбежно длительное хранение цемента, например при строительстве гидротехнических сооружений в отдаленных районах, применение гидрофобного цемента становится бесспорно предпочтительнее.

В еще большей мере эффективно применение гидрофобного цемента в гидротехническом бетоне с нормируемой морозостойкостью и водонепроницаемостью (табл. 4.5).

При постоянном B/C морозостойкость и водонепроницаемость бетона в значительно меньшей степени зависят от активности цемента, чем прочность. Проектируя бетон по комплексу

пел, диатомит и т. д. снижается себестоимость, цена цемента — однако увеличивается его нормальная плотность и расход в бетоне.

Как следует из табл. 4.4, даже при некотором различии нормальной плотности обычного портландцемента и портландцемента с минеральными добавками по ГОСТ 10178-76 последний в большинстве случаев экономически все же более выгоден при допущении принято выше, если свойством, определяющим расход цемента, является прочность бетона. Эффективность цементов с пониженной нормальной плотностью возрастает по мере сокращения длительности тепловой обработки и повышения уровня отпускной и проектной прочности.

Имеются данные [104], что даже при содержании до 8...10% активные минеральные добавки снижают морозостойкость портландцементов. По рекомендациям С. В. Шестоперова [104], при $M_{рз} \geq 500$ минеральные добавки в цементе не допускаются, что обусловлено прежде всего повышенной водопотребностью цементов, содержащих минеральные добавки. Коэффициент рационального использования цемента при заданной морозостойкости и водонепроницаемости бетона уменьшается более существенно, чем при заданной прочности (табл. 4.5, 4.6) с увеличением нормальной плотности. Таким образом, в бетонах, для которых устанавливаются марки как по прочности, так и по морозостойкости и водонепроницаемости, применение цементов с повышенной нормальной плотностью особенно нежелательно.

Учет влияния воздухововлекающих и пластифицирующих добавок в моделях показателей свойств бетона и затрат на его производство позволяет не только оценить их технологическую эффективность, но дать развернутый технико-экономический анализ целесообразности их введения в бетон в широком диапазоне составов и режимов его твердения. Экономический эффект от введения ПАВ можно оценить снижением расхода цемента и приведенных затрат на изготовление бетона с требуемым комплексом строительно-технических свойств, а также повышением $K_{р.и.д.}$ В выражении $K_{р.и.д.}$ при этом целесообразно взять в числителе приведенные затраты на цемент определенной марки и нормальной плотности для получения бетона с необходимыми проектными свойствами без введения добавок, в знаменателе — с добавками при учете дополнительных затрат, обусловленных их стоимостью.

Введение добавок эффективно в том случае, если $K_{р.и.д.} > 1$. В общем случае оптимальный такой расход добавки, который обеспечивает максимальное значение этого критерия. При сравнительно невысокой стоимости добавок СНВ, СПД, СДБ и др. их оптимальный расход из условия максимального $K_{р.и.д.}$ практически совпадает с расходом, найденным из условия минимально необходимого C/V для обеспечения требуемых свойств. При сравнительно высокой стоимости добавки, например, суперпластификаторов, максимальное значение $K_{р.и.д.}$ может не сов-

падать с минимальным расходом цемента. Наиболее высокие значения при введении воздухововлекающих и комплексных пластифицирующе-воздухововлекающих добавок характерны для бетонов, где свойством, определяющим C/B , является морозостойкость (табл. 4.7). Так, для бетона М 200 с $OK=4\div 6$ см при нормальном твердении в 28-суточном возрасте по мере повышения морозостойкости от 100 до 300 $K_{р.и.ц}$ при введении добавки СНВ увеличивается от 1,19 до 2,02. При тепловой обра-

Таблица 4.6. ПРИВЕДЕННЫЕ ЗАТРАТЫ И $K_{р.и.ц}$ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ПРОЕКТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЯХ ПРОПАРЕННОГО БЕТОНА В ВОЗРАСТЕ 28 СУТ.

Пропаривание, г	Удобоукладываемость смеси		Марки бетона										
			прочность при сжатии				морозостойкость			водонепроницаемость			
	Ж, с	OK, см	200	300	400	500	100	200	300	2	4	6	8
10	30—50	—	21,32	22,82	24,00	25,37	21,32	22,82	24,37	21,42	21,95	24,00	25,37
			0,78	0,79	0,86	0,91	0,94	0,90	0,90	0,78	0,78	0,86	0,86
—	10—12	—	22,47	23,42	—	—	22,98	23,42	—	22,47	22,47	23,00	23,42
			0,76	0,78	—	—	0,89	0,82	—	0,76	0,78	0,8	0,81
14	30—50	—	22,89	23,80	26,80	28,06	22,89	26,80	28,06	22,89	23,29	24,55	27,40
			0,88	0,94	0,99	1,02	0,98	0,89	0,88	0,88	0,92	0,93	0,97
—	10—12	—	23,02	24,33	27,87	—	24,33	27,87	—	23,02	23,66	25,00	—
			0,88	0,94	0,99	—	0,94	0,89	—	0,84	0,86	0,91	—
18	30—50	—	24,21	25,49	27,32	28,47	24,21	26,10	27,50	25,49	27,32	28,41	—
			0,91	0,98	1,03	1,03	1,01	0,98	0,96	0,90	0,96	0,95	—
—	10—12	—	25,31	26,95	28,91	—	26,01	28,91	29,47	25,31	26,95	28,91	—
			0,97	0,96	1,03	—	0,97	0,98	0,96	0,87	0,92	0,98	—

Примечания. В числителе значения изменяемых приведенных затрат, в знаменателе — $K_{р.и.ц} = S_{ц.п.т.} / S_{ц.т.о.}$, где $S_{ц.п.т.} / S_{ц.т.о.}$ — соответственно затраты на цемент для обеспечения заданных свойств при нормальном твердении и заданной длительности тепловой обработки; 2. Отпускная прочность принята 70% проектной; 3. При расчете приведенных затрат и $K_{р.и.ц}$ принят портландцемент с минеральными добавками марки 400 для бетонов до марки 300 включительно, а также всех марок по морозостойкости и водонепроницаемости, марки 500 для бетонов М 400 и 500 с $НГ=27\%$; 4. При увеличении и уменьшении нормальной густоты цемента на 1% $K_{р.и.ц}$ соответственно возрастает или понижается для бетонов, нормируемых по прочности на 1,5...2%, морозостойкости и водонепроницаемости на 2...3%.

ботке продолжительностью 10—12 ч и отпускной прочности 70% $K_{р.и.ц}$ возрастает соответственно от 1,26 до 1,64, а при отпускной прочности 100% от 0,92 до 1,29. Эффективность введения эмульгированного воздуха при одинаковой морозостойкости для подвижных смесей, как правило, более высокая, чем для жестких (табл. 4.7). Для бетона марки 300 при введении воздухововлекающих добавок $K_{р.и.ц} > 1$ лишь при $Мрз > 200$. Бетоны особо высокой морозостойкости ($Мрз \geq 500$), по мнению ряда исследователей, нельзя получить без введения эмульги-

Таблица 4.7. ЗНАЧЕНИЯ $K_{р.и.ц}$ ДЛЯ БЕТОНА В ВОЗРАСТЕ 28 СУТ.
ПРИ ВВЕДЕНИИ ВОЗДУХОВОВЛЕКАЮЩЕЙ ДОБАВКИ СНВ

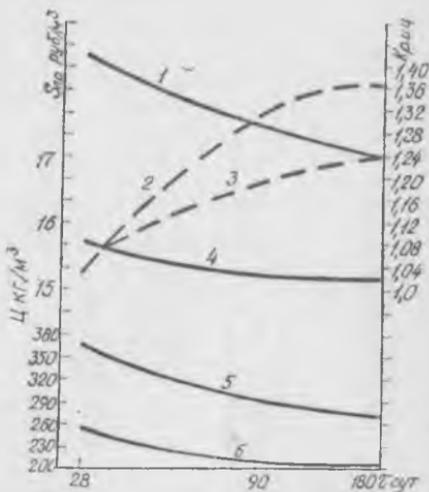
Удобоукладываемость смеси		Проектные марки бетона по прочности								
		200			300			400		
					морозостойкость					
ОК см	Ж с	100	200	300	200	300	400	300	400	500
Нормальное твердение										
—	30—50	1,21	1,63	1,98	0,87	1,86	1,82	1,39	1,39	1,39
1—3	—	1,19	1,63	2,02	0,85	1,86	1,82	1,39	1,39	1,39
4—6	—	1,19	1,64	2,02	0,83	1,86	1,82	1,39	1,39	1,39
7—9	—	1,19	1,65	2,03	0,83	1,87	1,83	1,39	1,39	1,39
Тепловая обработка 10—12 ч										
—	30—50	1,23	1,39	—	1,10	1,37	—	0,99	0,99	—
		0,92	1,10	1,27	0,80	1,12	—	0,60	0,83	—
1—3	—	1,23	1,38	—	1,11	1,40	—	0,88	1,00	—
		0,92	1,10	1,29	0,80	1,14	—	0,58	0,83	—
4—6	—	1,26	1,45	—	1,11	1,40	—	0,89	1,01	—
		0,92	1,10	1,29	0,81	1,15	—	0,56	0,82	—
7—9	—	1,30	1,50	—	1,12	1,41	—	0,89	1,01	—
		0,93	1,11	1,30	0,86	1,17	—	—	—	—
Тепловая обработка 14—16 ч										
—	30—50	1	1,23	—	1	1,77	—	0,99	1,30	—
		1	1,16	1,30	1	1,30	—	0,76	1	—
1—3	—	1	1,25	—	1	1,64	—	0,99	1,30	—
		1	1,16	1,30	1	1,30	—	0,76	1	—
4—6	—	1	1,26	—	1	1,64	—	0,99	1,30	—
		1	1,17	1,33	1	1,30	—	0,82	1	—
7—9	—	1	1,29	—	1	1,64	—	0,99	1,30	—
		1	1,18	1,37	1	1,30	—	0,85	1,01	—

Примечание. В числителе приведены значения $K_{р.и.ц}$ для бетонов с отпускной прочностью 70%, в знаменателе — 100% проектной. Расчеты выполнены при условии применения портландцемента с минеральными добавками и НГ=27% $K_{р.и.ц} = S_{ц.п.т.} / (S_{ц.п.т.} + S_{д.})$, где $S_{ц.п.т.}$ — приведенные затраты на цемент для получения бетона с требуемым комплексом свойств при нормальном твердении без введения добавки СНВ; $S_{д.}$ — при нормальном твердении или тепловой обработке и введении оптимального содержания СНВ; $S_{д.}$ — приведенные затраты на добавку СНВ.

ванного воздуха. Из решения рассмотренных технологических моделей также следует, что даже при $Ц/В=2,6$ и $В=184 \text{ кг/м}^3$ в бетоне 28-суточного возраста, т. е. при весьма низкой капиллярной пористости максимальная морозостойкость достигает 300 циклов. При введении 4% эмульгированного воздуха она

возрастает до 600 циклов. Экономическая оценка введения воз-
духововлекающих и комплексных добавок в таких случаях,
когда она не поддается прямому расчету, например эконом-
ленного цемента, должна производиться с определением допол-
нительного народнохозяйственного эффекта за счет повышения
долговечности конструкций и обеспечения их надежности. Опти-
мальным следует считать такой уровень надежности бетона
и железобетонных конструкций, при котором суммарные при-
веденные затраты на разработку, изготовление, эксплуатацию
и ремонт сооружения окажутся минимальными [48].

Рис. 4.7. Влияние продол-
жительности нормального
твердения на приведенные
затраты, расход и коэффи-
циент рационального ис-
пользования портландце-
мента с минеральными добав-
ками ($HГ=27\%$, $OK=$
 $=4\div6$ см, $R_{ц}=40$ МПа):
1, 2, 5 — соответственно зат-
раты, $K_{р.и.ц}$ и расход цемента для
бетона М 300; 3, 4, 6 — то же
для М 200.



Важным технико-экономическим аспектом проектирования
составов бетона является определение рационального возраста
бетона, при котором устанавливаются его проектные свойства,
а при тепловой обработке и нахождение уровня эффективной
отпускной прочности. Как известно, одно из таких рациональных
технологических решений — удлинение марочного возраста при
установлении нормативных требований к гидротехническому
бетону по прочности и водонепроницаемости, что отражено
в действующих ГОСТах. Решение комплекса технологических
моделей относительно $Ц/В$ при изменении длительности твер-
дения позволяет определить экономию цемента различной ак-
тивности и нормальной плотности по мере удлинения марочного
возраста для подвижных и жестких смесей как без добавок,
так и при введении ПАВ, а затем найти соответствующие изме-
нения экономических показателей (рис. 4.7). Особенно суще-
ственно с удлинением марочного возраста улучшение этих пока-
зателей для бетонов с повышенной водонепроницаемостью. Так,
 $K_{р.и.ц}$ для бетона на портландцементе с минеральными добав-
ками водонепроницаемостью В4÷В8 при переходе от 28 до
180-суточного возраста повышается на 50...100%. Увеличение
 $K_{р.и.ц}$ при нормировании прочности в 180-суточном возрасте

по сравнению с 28-суточным относительно меньше и составляет 20...50%. Для бетонов на гидрофобном портландцементе увеличение марочного возраста в еще большей мере сказывается на значении $K_{р.и.ц}$ (табл. 4.8). Из анализа моделей (табл. 4.7) также видно, что определенный технико-экономический эффект достигается при увеличении возраста бетона, предшествующего началу его испытания на морозостойкость. Полученные результаты согласуются с экспериментальными [81]. Повышение $K_{р.и.ц}$

Таблица 4.8. ЗНАЧЕНИЯ $K_{р.и.ц}$ ДЛЯ БЕТОНА НОРМАЛЬНОГО ТВЕРДЕНИЯ В 180-СУТОЧНОМ ВОЗРАСТЕ

Удобукладываемость смеси		Проектные марки бетона								
		прочность при сжатии			водонепроницаемость			морозостойкость		
		200	300	400	4	6	8	100	200	300
OK см	Ж с									

Портландцемент с минеральными добавками

—	30—50	1,22	1,32	—	1,47	1,83	—	1,30	1,38	1,36
		—	1,34	1,38	—	1,81	1,74	1,31	1,36	1,47
1—3	—	1,29	1,34	—	1,55	1,89	—	1,31	1,40	1,42
		—	1,36	1,40	—	1,82	1,89	1,35	1,38	1,52
4—6	—	1,30	1,36	—	1,58	1,94	—	1,32	1,42	—
		—	1,37	1,43	—	1,84	1,93	1,36	1,40	1,56

Гидрофобный портландцемент с минеральными добавками

—	30—50	1,21	1,38	—	1,70	1,81	—	1,46	1,76	2,21
		—	1,49	1,49	—	1,89	2,0	—	1,48	2,36
1—3	—	1,28	1,41	—	1,82	1,89	—	1,58	1,89	2,30
		—	1,49	1,59	—	1,82	2,12	—	1,72	2,48
4—6	—	1,32	1,47	—	1,91	1,98	—	1,79	2,01	—
		—	1,50	1,70	—	1,85	2 22	—	1,96	2,62

Примечания. В числителе $K_{р.и.ц}$ при использовании цемента марки 400, знаменателе — 500; 2. $K_{р.и.ц}$ находим по формуле $S_{от.ц28}/S_{д180}$ где $S_{от.ц28}$ — приведенные затраты на портландцемент, расходуемый на изготовление $1м^3$ бетона с требуемыми свойствами в 28-суточном возрасте, руб; $S_{д180}$ — приведенные затраты на данный цемент для бетонов в 180-суточном возрасте, руб; 3. В расчетах принята $НГ=27\%$. При увеличении или уменьшении нормальной плотности цемента на 1% $K_{р.и.ц}$ соответственно возрастает или понижается для бетонов, нормируемых по прочности на 1,5...2%, морозостойкости и водонепроницаемости на 2...3%.

при увеличении марочного возраста морозостойкости до 180 сут. без воздухововлекающих ПАВ достигает, например при $M_{рз}$ 200 для бетонов на портландцементе с минеральными добавками, 45%, а при $M_{рз}$ 300 более чем 50%. Как известно, 28-суточный возраст образцов, предусматриваемый ГОСТом при определении морозостойкости гидротехнического бетона, в значительной мере обусловлен длительной процедурой самих испытаний. Разра-

ботка ускоренных методов испытания морозостойкости способствует в отдельных случаях увеличению марочного возраста морозостойкости бетона, что является одним из путей снижения расхода цемента и повышения эффективности составов бетона.

На экономику производства сборных железобетонных изделий влияет отпускная прочность, которая назначается в зависимости от конструктивных особенностей изделий, климатических условий и т. д. Как показывает анализ математических

Таблица 4.9. ЗНАЧЕНИЯ ОТПУСКНОЙ ПРОЧНОСТИ, ОБЕСПЕЧИВАЕМЫЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МАРКАХ БЕТОНА (БЕЗ ДОБАВОК ПАВ)

Марка бетона	Удобоукладываемость смеси		Отпускная прочность в % от проектной при длительности тепловой обработки, г			
	ОК см	Ж с	10—12		14—16	
			М 400	М 500	М 400	М 500
200	—	30—50	72	83	85	100
	1—3	—	72	78	85	100
	4—6	—	71	72	85	94
	10—12	—	70	71	84	85
300	—	30—50	61	69	72	86
	1—3	—	60	65	72	81
	4—6	—	59	61	71	77
	10—12	—	56	58	69	69
400	—	30—50	56	63	66	76
	1—3	—	55	59	65	72
	4—6	—	54	55	64	69
	10—12	—	50	51	62	62
500	—	30—50	54	59	63	70
	1—3	—	52	56	62	68
	4—6	—	51	53	61	65
	10—12	—	47	48	59	60

Примечание. Нормальная густота цемента в расчетах принята 27%.

моделей, при определении отпускной прочности следует учитывать также реальное соотношение между фактическими значениями прочности бетона после пропаривания и в марочном возрасте, которые тесно взаимосвязаны и зависят от характеристики исходных материалов, режима тепловой обработки. Получив при помощи решения моделей (табл. 3.7) необходимое U/B для обеспечения требуемого сочетания проектных свойств бетона, можно найти из соответствующего уравнения (табл. 3.7), задаваясь значениями исследованных факторов, необходимое значение отпускной прочности при той или иной длительности тепловой обработки.

Из табл. 4.9 следует, что для марок бетона 200—300 при сравнительно мягкой тепловой обработке (14...16 ч) и рекомендованных режимных параметрах при исследованных материалах отпускная прочность обеспечивается не менее 70%

проектной. Очевидно, в таких случаях снижение значения отпускной прочности бетона за счет изменения состава в технических требованиях к изделиям приведет неизбежно к недобору проектной прочности. Уменьшение отпускной прочности имеет здесь смысл при сокращении длительности процесса. Для бетонов марок 400—500 особенно при форсировании режимов тепловой обработки целесообразен 50%-ный уровень отпускной прочности, который не требует перерасхода цемента. Как известно [46], наиболее эффективно уровень отпускной прочности повышать при введении в бетонную смесь добавок-ускорителей твердения и учете последующего за тепловой обработкой нарастания прочности. При форсированных режимах тепловой обработки и высоком уровне отпускной прочности выпуск изделий пониженных марок может стать нерациональным [46].

Эффективность назначения отпускной прочности удобно оценить с помощью $K_{р.и.ц}$. При таком анализе в числителе следует принимать приведенные затраты на цемент, необходимые для обеспечения проектной прочности в конкретной производственной ситуации, в знаменателе — приведенные затраты на цемент и добавки для достижения требуемого уровня отпускной прочности при заданной марке бетона. Экономически наиболее выгодно, когда $K_{р.и.ц} = 1$. При $K_{р.и.ц} < 1$ желательны технологические средства ускорения твердения бетона при тепловой обработке без изменения расхода цемента (применение более жестких смесей, введение эффективных ускорителей, применение быстротвердеющих цементов и т. д.). При $K_{р.и.ц} > 1$ фактическая отпускная прочность может быть больше обусловленной и тогда вероятно, например, сокращение длительности или снижение температуры тепловой обработки. Такой случай возможен при введении добавок-ускорителей твердения. Повышение требований к отпускной прочности вызывает существенный перерасход цемента и снижение $K_{р.и.ц}$ по мере сокращения режима тепловой обработки, возрастания подвижности смесей и марки бетона.

4.3. Выбор оптимальной длительности тепловой обработки

При оптимизации режимов тепловой обработки приходится решать как технологические, так и технико-экономические задачи [8, 18, 59, 64, 68, 75, 100]. Мы рассматриваем их на основе принципов системного анализа применительно к бетону, подвергаемому пропариванию до достижения определенного комплекса проектных свойств.

Многочисленные исследования по оптимизации режимов тепловой обработки бетона отличаются прежде всего критериями оценки оптимальной длительности процесса. Ряд иссле-

дователей связывают их лишь с качеством бетона. Примерами таких критериев являются максимально достижимая прочность, отношение прочности пропаренного бетона к прочности бетона нормального твердения и удельный расход цемента на единицу продукции. Некоторые авторы считают, что оптимальными являются наиболее короткая продолжительность процесса при заданной прочности бетона или режим, который обеспечивает максимальную относительную прочность бетона при минимальной продолжительности процесса. Однако такие критерии считать показателями эффективности тепловой обработки в условиях конкретного предприятия нельзя, поскольку при этом не учитываются экономические параметры. Известно, что увеличение продолжительности тепловой обработки на 1 ч приводит к снижению себестоимости изделий примерно на 1...2% [100].

Эффективность тепловой обработки железобетонных изделий неразрывно связана с расходом цемента, металлоемкостью форм, затратами на тепловые агрегаты. Наряду с технологическими, предложен ряд экономических критериев эффективности тепловой обработки: приведенные затраты, себестоимость продукции, уровень рентабельности, отношение экономии затрат труда при новом варианте к общественно необходимым затратам.

Некоторые исследователи предлагают считать оптимальной такую продолжительность тепловой обработки, которая соответствует экстремальным значениям двух или более критериев. Например, руководство рекомендует, что режимы тепловой обработки должны быть направлены на достижение максимального ускорения твердения бетона при минимально возможных затратах энергетических ресурсов и цемента, соблюдении требований к качеству и долговечности изделий. Однако такая постановка задач математически некорректна, так как практически невозможно, чтобы два произвольно заданных критерия достигали экстремума одновременно [3].

Тесное переплетение технологических и экономических факторов, определяющих эффективность тепловой обработки, привело к тому, что нахождение здесь оптимальных решений стало одной из наиболее сложных задач в технологии сборного железобетона. Вместе с тем сложность задачи оптимизации тепловой обработки не позволяет считать ее неразрешимой на основании вывода о несоизмеримости критериев оптимальности — качества бетона и длительности процесса тепловой обработки. Правильным будет, очевидно, при оптимизации любого технологического процесса, в том числе и тепловой обработке бетона, исходить не из понятия качества вообще, а из заданного уровня качества продукции.

Наиболее общим экономическим критерием оптимальности является значение приведенных затрат. Их минимум соответствует сравнительно коротким режимам тепловой обработки.

Так, для поточно-агрегатного производства при использовании портландцемента марок 400 и 500 минимум приведенных затрат на тепловую обработку (включая стоимость цемента) по данным [100] находится при продолжительности пропаривания в пределах 8...9 ч. Однако по мере сокращения длительности тепловой обработки растет перерасход цемента. По данным И. И. Цыганкова [100], общая продолжительность пропаривания, при которой расход портландцемента приближается к минимальному, составляет 13 ч.

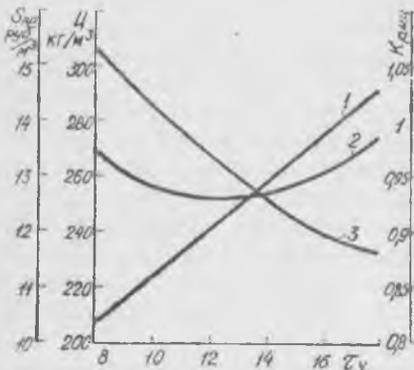


Рис. 4.8. Выбор оптимальной продолжительности тепловой обработки бетона по данным работы [40]:

1 — коэффициент рационального использования цемента; 2 — приведенные затраты на тепловую обработку (включая стоимость материалов); 3 — расход цемента.

Выбор критерия эффективности зависит от конкретной производственной ситуации (способа производства, организации работ, наличия материальных ресурсов). Для конвейерного, круглосуточного производства таким критерием должен быть минимум приведенных затрат, на величину которых главным образом влияет металлоемкость форм. Для станочных и поточно-агрегатных линий, работающих в одну-две смены с бригадным разделением форм и камер рациональнее более удлиненные режимы тепловой обработки. Критерием эффективности при этом может быть значение расхода цемента, которое должно приближаться к минимальному при обеспечении комплекса требуемых свойств.

Чаще всего рассматриваемая задача сводится к выбору продолжительности тепловой обработки в компромиссной зоне, где за счет некоторого увеличения приведенных затрат достигается снижение расхода цемента (рис. 4.8). По И. И. Цыганкову [100], оптимальную продолжительность тепловой обработки надо искать в промежуточных точках, когда кривая расхода цемента начинает выравниваться, а себестоимость пропаривания еще не успела вырасти. Однако для определенной технологической линии такой подход требует конкретизации, исходя из нормируемых ограничений материальных ресурсов и прежде всего цемента. В простейшем случае, применяя цемент одного вида, марки и неизменной технологии, с этой целью можно использовать коэффициент, равный отношению расхода цемента при

нормальном твердении и нормируемого расхода при тепловой обработке. Для сравнительной оценки эффективности использования цементов разных видов и марок, снижения расхода цемента при использовании добавок и других технологических приемов необходим интегральный стоимостной критерий. Им может служить коэффициент рационального использования цемента $K_{р.и.ц}$:

$$K_{р.и.ц} = S_{эт.ц.и.т} / (S_{ц.т.о} + S_{т.п}), \quad (4.12)$$

где $S_{эт.ц.и.т}$ — приведенные затраты на эталонный цемент для получения бетона с заданными техническими требованиями при нормальных условиях твердения; $S_{ц.т.о}$ — приведенные затраты на данный цемент и расход его для получения бетона с тем же комплексом свойств при тепловой обработке; $S_{т.п}$ — суммарные приведенные затраты на технологические приемы, приводящие к сокращению нормативных расходов цемента при тепловой обработке.

Если применяется цемент одного вида и активности, а также бетон без применения добавок и других технологических приемов ускорения твердения, то $K_{р.и.ц}$ равен отношению расходов цемента, необходимых для обеспечения требуемых показателей при нормальном твердении и тепловой обработке. Обратное значение $K_{р.и.ц}$ показывает коэффициент перерасхода цемента при использовании того или иного режима твердения.

Этот критерий при оптимизации режима тепловой обработки может служить как ограничением, так и быть главным. В первом случае режим должен обеспечивать минимальные затраты ($S \rightarrow \min$) при $K_{р.и.ц}$ не меньше заданного ($K_{р.и.ц} \geq K_{р.и.ц}^0$) [40], во втором — должно достигаться максимально возможное значение $K_{р.и.ц}$ ($K_{р.и.ц} \rightarrow \max$) при ограниченных затратах ($S \leq S^0$). Вместе с тем нельзя согласиться с тем [96], что оптимальность режимов тепловой обработки в общем случае определяется лишь двумя этими критериями. $K_{р.и.ц}$ — это один из возможных критериев оптимизации технологических решений в условиях ограничения материальных ресурсов. Наряду с ним возможны и другие критерии рационального использования ресурсов $K_{р.и.ц}$: топлива, металла, рабочей силы и т. д. Для действующего предприятия следует учитывать и ограничение по производительности технологической линии. При использовании системы любых критериев оптимальности обязательным условием является обеспечение требуемых проектных свойств бетона. Допустимое значение $K_{р.и.ц}$ следует устанавливать для каждого предприятия с учетом особенностей технологии и в результате анализа фондов снабжения цементом. На рис. 4.8 в качестве примера представлен график [43] для анализа эффективности тепловой обработки плит пустотного настила (марка бетона 200, жесткость бетонной смеси 60 с) на Хмельницком комбинате стройматериалов. Для изготовления

бетона применяли портландцемент марки 500, гранитный щебень фракции 5...20 мм, речной песок с $M_k=1,32$. График построен в результате решения уравнений регрессии расхода цемента, приведенных затрат на тепловую обработку и коэффициента рационального использования цемента в зависимости от требуемой прочности, жесткости бетонной смеси и продолжительности тепловой обработки. Из графиков (рис. 4.8) видно, что минимальные приведенные затраты обеспечиваются при $\tau_{т.о}=12 \div 12,5$ ч, а минимальный расход цемента при $\tau_{т.о}=18$ ч. Сокращение продолжительности тепловой обработки с 18 до 12,5 ч при условии получения заданной прочности вызывает перерасход цемента до 30 кг/м³. Анализ фондов снабжения показал, что бесперебойную работу предприятия можно обеспечить при $K_{р.и.д} \div 0,95$. Это соответствует (рис. 4.8) продолжительности тепловой обработки 14 ч и расходу цемента $253 \div 255$ кг/м³.

Повышение $K_{р.и.д}$ при тепловой обработке без увеличения длительности пропаривания возможно за счет комплекса технологических решений: применения быстротвердеющих высокопрочных цементов, введения добавок-ускорителей твердения, электро- и пароразогрева смесей, учета следующего роста прочности и др. Особенно существенно влияние на $K_{р.и.д}$ этих технологических приемов при форсированных режимах тепловой обработки. Например, анализ эффективности производства плит перекрытий и панелей внутренних стен 16-этажных жилых домов на прокатном стане БПС-6 показал [46], что при использовании добавок-ускорителей и последующего нарастания прочности перерасход цемента можно снизить в два раза (с 30—40 до 15% по сравнению с нормативным). Соответственно повышается и значение $K_{р.и.д}$.

Выбор оптимальной продолжительности тепловой обработки с применением комплекса математических моделей свойств бетона (табл. 3.7), а также модели затрат S_2 (табл. 4.2) можно выполнять двумя способами.

Первый способ заключается в том, что по модели S_2 (табл. 4.2) и формуле (4.12) $K_{р.и.д}$ [37] рассчитывают затраты и коэффициент рационального использования цемента, необходимые для обеспечения требуемого комплекса свойств бетонной смеси и бетона при различной продолжительности тепловой обработки. С этой целью, решая модели (табл. 3.7) или по номограммам (рис. 3.11, 3.14), определяют цементно-водное отношение, расход цемента и при необходимости добавки, а затем находят затраты и $K_{р.и.д}$ при нескольких значениях продолжительности тепловой обработки в исследуемом диапазоне. Графическим способом или с помощью ЭВМ выбирают длительность тепловой обработки, обеспечивающую сформулированные выше условия оптимизации. На рис. 4.9 представлены примеры графического выбора оптимальных значений продол-

жительности тепловой обработки при различных исходных условиях и условиях оптимизации.

Общие закономерности, прослеживаемые из графиков рис. 4.9 и 4.10, согласуются с известными представлениями о влиянии основных технологических факторов на эффективность тепловой обработки [100]. Компромиссная зона между минимальными значениями необходимого расхода цемента и приведенными затратами расширяется и смещается в сторону большей продолжительности по мере повышения подвижности бетонных

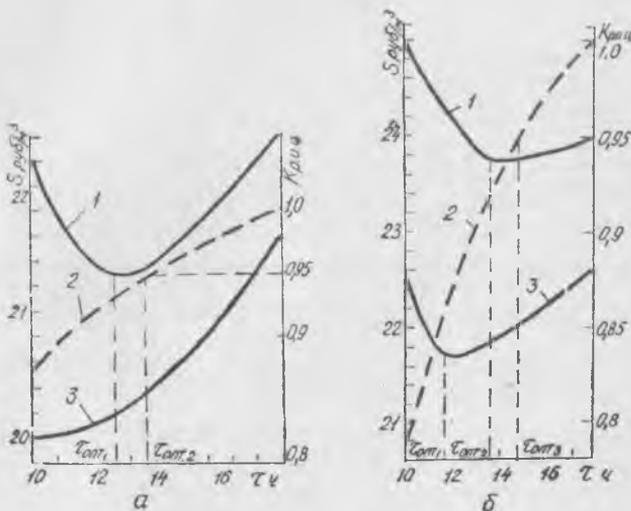


Рис. 4.9. Графический выбор оптимальной продолжительности тепловой обработки ($OK=4+6$ см): а) — для марки бетона М 200; б) — для марки бетона М 300;

1, 3 — приведенные затраты на изготовление 1 м³ бетона при затратах на цемент соответственно 15 и 20 руб/т; 2 — $K_{р.и.ц}$ по формуле (4.12).

смесей и марки бетона. При сокращении длительности тепловой обработки особенно существенным становится увеличение затрат при повышении подвижности для бетонов высоких проектных марок.

Второй способ более рациональный. Он основан на использовании формулы определения длительности тепловой обработки (4.13), обеспечивающей минимум затрат и полученной дифференцированием уравнения S_2 (табл. 4.2) по фактору x_7

$$x_7 = (0,66 + 0,06 x_8 + 0,46 x_2 + 1,76 x_9) / 1,04. \quad (4.13)$$

Номограмма, построенная по формуле (4.13) показана на рис. 4.10. Из анализа формулы (4.13) и номограммы (рис. 4.10) следует, что продолжительность тепловой обработки, обеспечи-

вающая минимум усредненных суммарных затрат, колеблется в широком интервале, наиболее существенно сдвигаясь в большую сторону по мере увеличения стоимости цемента. На рис. 4.11 показана блок-схема выбора длительности тепловой обработки при различных условиях оптимальности. При отсутствии ограничения по $K_{р.и.ц}$ для поиска $\tau_{опт}$ по номограмме рис. 4.10 используют значение C/B , необходимое для достижения требуемого комплекса свойств при тепловой обработке (рис. 3.14).



Рис. 4.10. Номограмма выбора оптимальной продолжительности тепловой обработки, обеспечивающей минимум затрат.

Изменение C/B в пределах широкой области варьирования длительности тепловой обработки (10...18 ч) при неизменных значениях проектной марки и отпускной прочности не сказывается существенно на положении минимума затрат. После определения $\tau_{опт}$ по рис. 3.14 устанавливают скорректированное значение C/B . При выборе $\tau_{опт}$ в условиях ограничения по $K_{р.и.ц}$ значение C/B находят по формуле $C_{н.т}/(K_{р.и.ц} \cdot B)$, где $C_{н.т}$ — необходимый расход цемента при нормальном твердении; B — расход воды для достижения требуемой подвижности или жесткости смеси. В этом случае $\tau_{опт}$, обеспечивающую минимально возможные затраты при заданном $K_{р.и.ц}$, получают по номограмме рис. 4.4. Оно, как правило не совпадает с $\tau_{опт}$ по рис. 4.10 при отсутствии ограничений. Эффект эмульгированного воздуха, как и эффект других добавок, улучшающих свойства бетона, служит также рычагом сокращения оптимальной длительности пропаривания при обеспечении проектных свойств. Это возможно, в частности, в тех случаях, когда необходимый расход цемента для достижения требуемой морозостойкости без воздухововлекающих добавок выше, чем расход при введении воздуха и сокращении длительности тепловой обработки. Такой вывод имеет, очевидно, принципиальное практическое значение. В конкретной производственной ситуации системный анализ позволяет перечисленные выше и другие технологические рычаги интенсификации производства изделий

направить или на повышение коэффициента рационального использования цемента, или на сокращение длительности тепловой обработки.

Системный анализ на основе совокупности математических моделей дает возможность решить также ряд других альтернативных задач и выбрать оптимальные варианты.

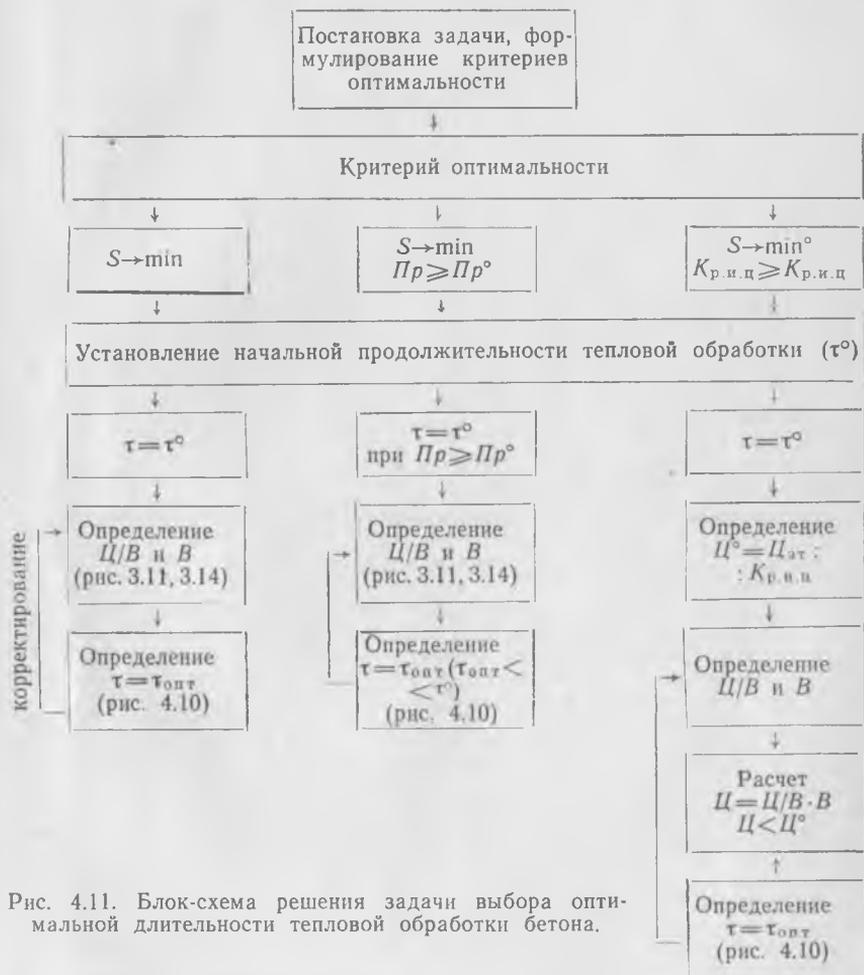


Рис. 4.11. Блок-схема решения задачи выбора оптимальной длительности тепловой обработки бетона.

Рассмотрим ряд примеров выбора оптимальной продолжительности тепловой обработки и уточнения параметров состава бетона.

Пример 4.1. Определить оптимальную продолжительность тепловой обработки, обеспечивающую минимум затрат при получении бетонов марок 200, 300 и 400 (отпускная прочность 70% проектной) из смесей с $Ж=30÷50$ с

и $OK=4\div 6$ см. Портландцемент М 500 $НГ=27\%$ стоимостью 15 и 20 руб/т. Расчеты выполняем в соответствии с блок-схемой (рис. 4.11). Результаты расчетов сведены в табл. 4.10.

Пример 4.2. Определить оптимальную продолжительность тепловой обработки, обеспечивающую минимально возможные затраты и $K_{р.и.д}=0,95$ и 0,90 при получении бетона марок 200 и 300 с $Ж=30\div 50$ с; $OK=4\div 6$ см. Портландцемент М 400 с $НГ=27\%$.

Таблица 4.10. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ПО ВЫБОРУ $\tau_{опт}$

Марка бетона	Удобоукладываемость смеси		Стоимость цемента, руб/т	$Ц/В$ при $\tau=14$ ч	Оптимальная продолжительность	Скорректированное $Ц/В$ при $\tau_{опт}$
	Ж с	OK см				
200	30—50	—	15	1,3	10	1,4
	30—50	—	20	1,3	12	1,35
	—	4—6	15	1,3	10,5	1,4
	—	4—6	20	1,3	12,5	1,35
300	30—50	—	15	1,7	11	1,85
	30—50	—	20	1,7	13	1,75
	—	4—6	15	1,8	11,5	1,95
	—	4—6	20	1,8	13,5	1,84
400	30—50	—	15	2,0	11,5	2,2
	30—50	—	20	2,0	13,5	2,04
	—	4—6	15	2,1	12	2,3
	—	4—6	20	2,1	14	2,1

Расчеты выполняем в соответствии с блок-схемой (рис. 4.11), результаты сводим в табл. 4.11.

Пример 4.3. Определить оптимальную продолжительность тепловой обработки, обеспечивающую минимальные затраты при получении бетона $Мрз$ 200 без применения и с применением воздухововлекающих добавок (в последнем случае марка бетона по прочности М 200). Осадка конуса бетонной смеси $OK=4\div 6$ см. Портландцемент М 400, $НГ=27\%$, стоимостью 20 руб/т.

Морозостойкость бетона $Мрз$ 200 на исследованных материалах без применения добавок обеспечивается при марке по прочности М 400 с $Ц/В=2,6$ (табл. 3.14). По номограмме (рис. 4.10) оптимальная продолжительность тепловой обработки, обеспечивающая минимум затрат составляет 15 ч. Для данной продолжительности откорректированное $Ц/В$ равно 2,7 (рис. 3.14).

Бетон М 200 с применением воздухововлекающей добавки обеспечивает $Мрз$ 200 при $Ц/В$, равном 1,5 (табл. 3.13) (рис. 3.15). Оптимальная продолжительность тепловой обработки составляет 13 ч, при этом откорректированное $Ц/В=1,54$. Таким образом, при высоких требованиях по морозостойкости бетона применение воздухововлекающих добавок позволяет не только существенно сократить расход цемента, но и уменьшить оптимальную продолжительность тепловой обработки.

Пример 4.4. Выбрать оптимальную продолжительность тепловой обработки и марку цемента при $K_{р.и.д}=0,95$ для бетона М 300 с 70%-ной отпускной прочностью ($OK=4\div 6$ см). Возможно применение цементов марки 400 с $НГ=27\%$ и 500 с $НГ=28\%$. Стоимость цементов соответственно 20 и 25 руб/т.

Марка цемента 400 обеспечивает марку бетона 300, как следует из рис. 3.14, при $Ц/В=2,1$ ($K_{р.и.д}=0,95$). Для данных условий оптимальная продолжительность тепловой обработки 14 ч, а приведенные затраты равны 24,1 руб.

Эту же прочность цемент марки 500 обеспечит при $C/B=1,8$ для заданного $K_{р.и.ц}$ (рис. 3.14). По номограмме рис. 4.4 вследствие более высокой стоимости портландцемента М 500 оптимальная продолжительность тепловой обработки, обеспечивающая минимум затрат, составляет 16 ч. Необходимое C/B при оптимальной продолжительности — 1.75. Приведенные затраты на бетон при этом 23,6 руб.

Сравнивая результаты, можно сделать вывод, что рациональнее с позиций общих затрат использовать при заданных условиях цемент марки 400, что позволяет получить экономию до 0,5 руб/м³ бетона.

Таблица 4.11. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ПО ВЫБОРУ τ_{opt}
ПРИ $K_{р.и.ц}=K_{р.и.ц.}$

Марка бетона	Удобукладываемость		C/B	$K_{р.и.ц.}$	Оптимальная продолжительность, ч
	Ж с	ОК см			
200	30—50	—	1,37	0,95	14,5
	30—50	—	1,44	0,90	13,5
		4—6	1,47	0,95	13,5
		4—6	1,56	0,90	11
300	30—50	—	2,0	0,95	12,5—13
	30—50	—	2,11	0,90	12
	—	4—6	2,11	0,85	13,5
	—	4—6	2,22	0,90	12

Пример 4.5. Определить оптимальную продолжительность тепловой обработки, обеспечивающую минимум затрат при производстве ребристых плит покрытия ПКЖ $6 \times 1,5$ м, изготавливаемых из бетона М 200, а также изделий из бетона М 300 (отпускная прочность — 70%) с осадкой конуса 4—6 см на Здолбуновском заводе железобетонных изделий. Принятая на заводе длительность тепловой обработки 13...14 ч.

Уравнения табл. 4.2 отражают усредненные затраты на материалы, переработку бетонной смеси, содержание и эксплуатацию камер твердения, форм и занимаемой площади цеха по наиболее распространенной поточно-агрегатной технологии [84]. При оптимизации длительности тепловой обработки определенных видов изделий в условиях конкретного производства необходимо исходить, очевидно, из уточненных реальных затрат. Анализ затрат на тепловую обработку на предприятии позволил ввести поправочный коэффициент в модель $k_{т.о}=0,95$, равный отношению фактических затрат к расчетным.

Формулу оптимальной длительности тепловой обработки, обеспечивающей минимум затрат, получаем дифференцированием уравнения S_2 (табл. 4.2) с уточненными коэффициентами по x_7 .

$$x_7 = \frac{0,63 + 0,06x_8 + 0,44x_2 + 1,67x_{10}}{0,99}$$

Исходя из реальных составов бетона и принятой на заводе длительности тепловой обработки 13 ч, находим необходимые значения C/B для марок бетона 200 и 300. Они равны 1,5 и 2,0 или в кодированном выражении (табл. 3.1) x_2 соответственно равен $-0,75$, $-0,125$. При подвижности $OK = 4 \div 6$ см ($x_8 = 0$) и стоимости цемента М 400 15 руб. 21 к. ($x_9 = -0,65$) оптимальное значение x_7 в кодированном выражении составит для марок бетона 200 и 300 соответственно $-0,75$ и $-0,5$ или в натуральных величинах 11 и 12 ч. Уточнение значения C/B при x_{7opt} — 1,6 и 2,1.

4.4. Выбор оптимальной удобоукладываемости бетонной смеси

Удобоукладываемость бетонной смеси, оцениваемая показателями подвижности или жесткости, назначается в соответствии со способом и условиями формования изделий. Вместе с тем выбор удобоукладываемости существенно влияет на экономические показатели производства конструкций: расход цемента, энерго- и трудозатраты, приготовление бетонной смеси и формование. Основным технологическим приемом повышения подвижности смесей является пока увеличение водосодержания. При этом наряду с уменьшением затрат на уплотнение требуется увеличение необходимого расхода цемента и длительности тепловой обработки бетона для достижения нужных проектных показателей. Оптимальной удобоукладываемостью можно считать показатель подвижности или жесткости смеси, который при данном способе формования обеспечивает получение бездефектных изделий с требуемыми свойствами и минимальными приведенными затратами. При этом могут учитываться ограничения по $K_{р.и.ц}$ и производительности в условиях конкретной производственной ситуации. Возможные варианты постановки задачи и схемы ее решения при системном подходе представлены на рис. 4.12.

При оценке показателей удобоукладываемости с позиций эффективного использования цемента выражение $K_{р.и.ц}$ должно иметь следующий вид:

$$K_{р.и.ц} = S_{эт.д.у_0} / (S_{ц.у} + S_{т.п}), \quad (4.14)$$

где $S_{эт.д.у_0}$ — приведенные затраты на эталонный цемент при получении бетона с требуемым комплексом свойств из бетонной смеси с удобоукладываемостью, минимально возможной из условий формования; $S_{ц.у}$ — затраты на цемент при данной удобоукладываемости смеси; $S_{т.п}$ — затраты на добавки и другие технологические приемы, направленные на экономию цемента.

Приведенное определение оптимальной удобоукладываемости бетонной смеси справедливо и при введении пластифицирующих добавок. Различие заключается в том, что добавки пластификаторов, улучшая удобоукладываемость бетонных смесей, не ведут к значительному увеличению расхода цемента. Для таких новейших добавок как суперпластификаторы необходимо учитывать наряду с уменьшением расхода цемента и трудозатрат затраты на добавку, влияющие на стоимость бетонной смеси и значение $K_{р.и.ц}$.

При оптимизации исходных параметров производства бетонных и железобетонных конструкций в конкретных условиях необходимо проанализировать возможности изменения удобоукладываемости бетонной смеси. В некоторых случаях изменить удобоукладываемость по сравнению с проектной невозмож-

но по технологическим соображениям (необходимость применения литых смесей для заливки густоармированных штраб, пазовых конструкций, спиральных камер, турбин и т. д. или жестких смесей для изделий с немедленной распалубкой и др.).

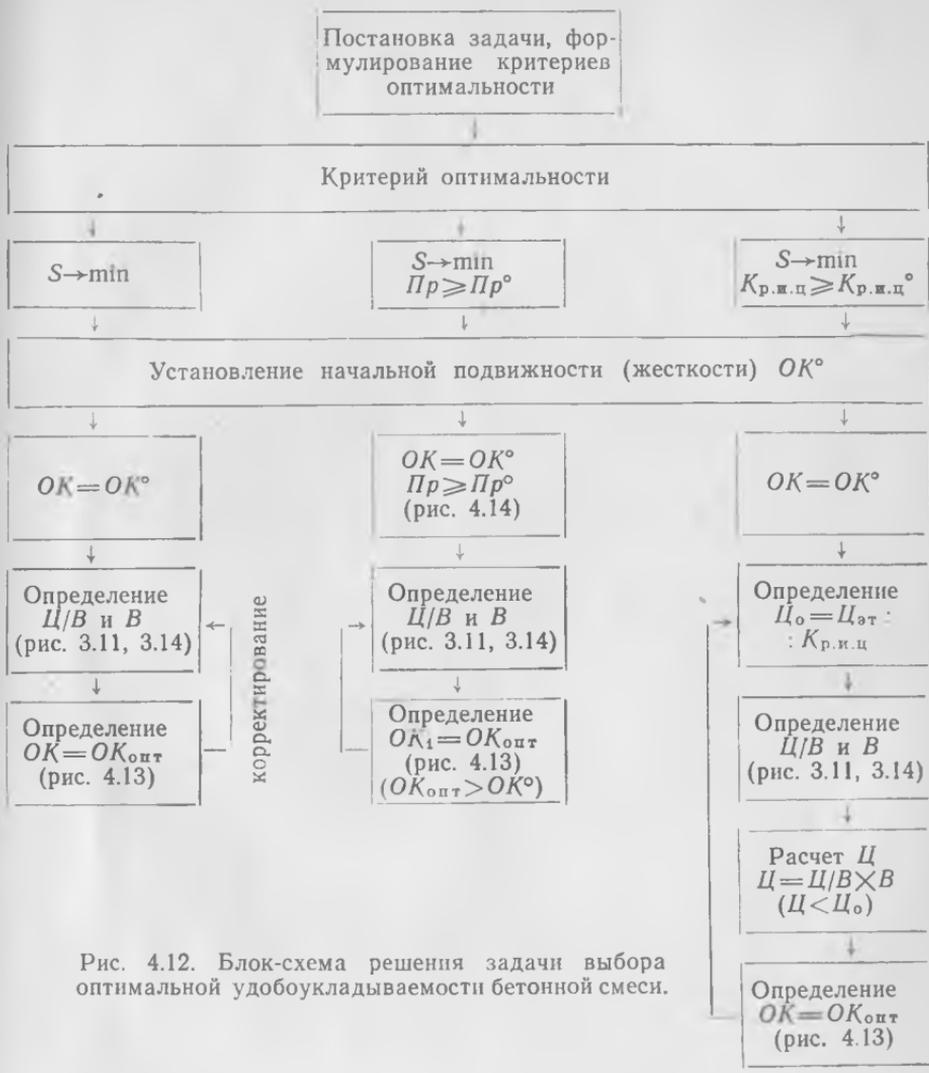


Рис. 4.12. Блок-схема решения задачи выбора оптимальной удобоукладываемости бетонной смеси.

Впервые задача выбора оптимальной удобоукладываемости бетонной смеси с позиций анализа затрат сформулирована Б. В. Прыкиным [75]. Приведенное им решение возможно для частного варианта, когда критерием оптимизации служит минимум удельных приведенных затрат без дополнительных ограничений.

Мы приводим более общее решение этой задачи применительно к конструкции с заданной прочностью, морозостойкостью и водонепроницаемостью, при формировании на виброплощадках по поточно-агрегатной технологии. С помощью уравнений приведенных затрат в отличие от работы [75] представляется возможным выбрать оптимальную удобоукладываемость с учетом требуемых значений C/B , активности це-

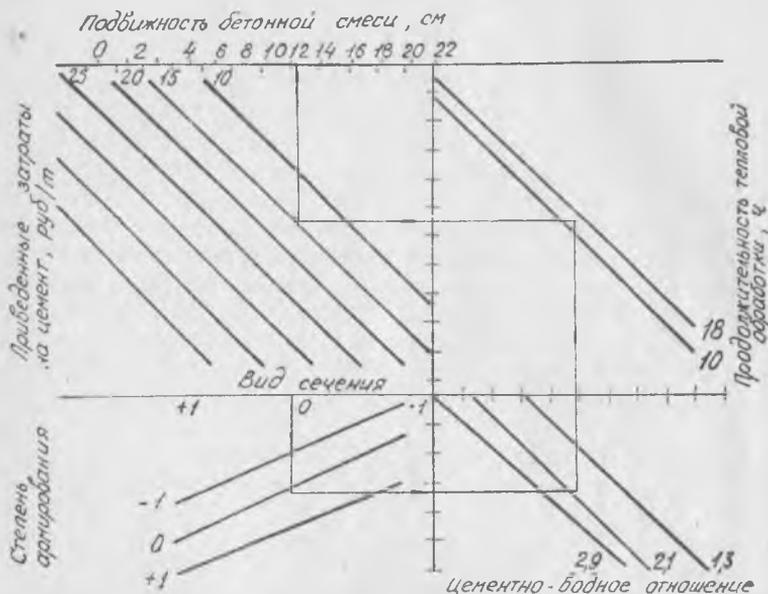


Рис. 4.13. Номограмма определения оптимальной удобоукладываемости бетонной смеси, обеспечивающей минимум затрат:

+1, 0, -1 — соответственно конструкции сложного сечения густоармированные, среднего (среднеармированные) и простого (слабоармированные).

мента и длительности тепловой обработки, необходимых для достижения комплекса проектных показателей бетона для конструкций, классифицированных по степени сложности и густоте армирования.

Обобщенные приведенные затраты на изготовление конструкций, зависящие от значения удобоукладываемости бетонной смеси определяем по формуле

$$S_{06} = S_2 + S_3 + S_4, \quad (4.15)$$

где S_2 — удельные приведенные затраты на исходные компоненты бетонной смеси и тепловую обработку; S_3 — на перемешивание; S_4 — на уплотнение бетонной смеси (табл. 4.2).

Анализ выражения (4.15) позволяет установить экстремальный характер обобщенных приведенных затрат в зависимости

от показателя удобоукладываемости. Формулу для определения удобоукладываемости, обеспечивающей минимум затрат при заданных значениях C/B , активности цемента и длительности тепловой обработки, легко находим, дифференцируя уравнение (4.15) по x_8 , предварительно раскрыв его с помощью выражений, приведенных в табл. 4.2, и приравнявая первую производную нулю.

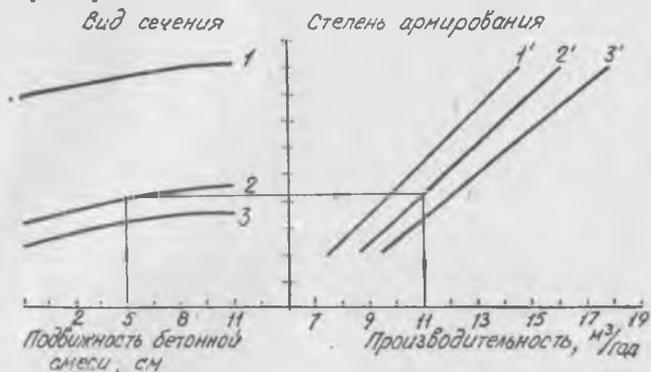


Рис. 4.14. График определения производительности технологической линии (тыс. м³/год) в зависимости от сложности сечения и степени армирования конструкций, а также удобоукладываемости бетонной смеси:

1—3 — соответственно простое, среднее, сложное сечение;
1'—3' — соответственно густо-, средне- и слабоармированные конструкции.

Для пропаренного бетона сборных конструкций

$$x_8 = (0,08 + 0,24 x_{12} + 0,32 x_{11} - 0,36 x_2 - 0,81 x_9 - 0,06 x_7) / 0,72. \quad (4.16)$$

Из формулы (4.16) следует, что при заданном C/B минимум затрат смещается в сторону более подвижных смесей по мере насыщения конструкций арматурой и усложнения их сечения. На положение минимума затрат влияет изменение технологических факторов, сказывающихся на расходе цемента, необходимом для обеспечения требуемого комплекса свойств бетона, и через значение C/B сами проектные требования к свойствам. По мере роста показателей проектных марок бетона, а также повышения уровня отпускной прочности и сокращения длительности пропаривания, расчетные значения удобоукладываемости, соответствующие минимуму затрат, сдвигаются в сторону более жестких смесей.

На основании выражения (4.16) построена номограмма выбора удобоукладываемости бетонной смеси, обеспечивающей минимум затрат в зависимости от основных технологических факторов (рис. 4.13). Для учета ожидаемой производительности получен также график в зависимости от удобоукладываемости, сложности сечения конструкций и степени армирования

(рис. 4.14). Производительность рассчитывали по формуле, рекомендуемой руководством при усредненных значениях длительности цикла формования [84] и варьировании указанных выше факторов в определенной области (табл. 4.1). Последовательность выбора оптимальной удобоукладываемости в зависимости от постановки задачи показана на блок-схеме (рис. 4.12). Приведем примеры выбора удобоукладываемости бетонной смеси при различных условиях оптимальности.

Пример 4.6. Необходимо определить на стадии проектирования технологической линии производительностью 8,5 тыс. м³ в год удобоукладываемость бетонной смеси, обеспечивающую минимальные затраты при изготовлении густоармированных конструкций средней сложности из бетона М 300 с 70%-ной отпусковой прочностью с использованием портландцемента М 400, $НГ=27\%$, среднего песка и гранитного щебня фракции 5...20 мм (приведенные затраты на цемент составляют 25 руб/т). Длительность тепловой обработки 14 ч.

Из номограммы рис. 4.14 устанавливаем при заданных исходных условиях подвижность бетонной смеси, обеспечивающую требуемую производительность, $ОК=5$ см. По рис. 3.11 и 3.12 находим соответственно необходимые цементно-водное отношение и расход воды: $Ц/В=2,0$, $В=195$ кг/м³. Расход цемента $Ц=390$ кг/м³. Доля песка в смеси заполнителей (рис. 3.13); $r=0,35$; $П=558$ кг/м³; $Щ=1265$ кг/м³. По рис. 4.13 определяем оптимальную удобоукладываемость бетонной смеси $ОК=8\div 9$ см. После корректирования по рис. 3.11—3.13 состава бетонной смеси получаем окончательный результат: $Ц/В=2,1$; $В=208$ кг/м³; $Ц=436$ кг/м³; $П=535$ кг/м³; $Щ=1214$ кг/м³. Производительность технологической линии при оптимальной подвижности бетонной смеси равна 9,5 тыс. м³ в год (рис. 4.14).

Пример 4.7. Установить оптимальные значения удобоукладываемости, обеспечивающие минимально возможные затраты и $K_{р.и.д.}=0,95$ и 0,90 при изготовлении на типовой технологической линии изделий из бетона М 200 средней сложности густоармированных, длительность тепловой обработки 14 ч.

Решение задачи осуществляем в соответствии с блок-схемой (рис. 4.12). Максимальное значение $Ц/В=1,35$ при $K_{р.и.д.}=0,95$ и 1,43 при $K_{р.и.д.}=0,9$. По номограмме (рис. 4.13) находим оптимальную удобоукладываемость бетона. Она равна $Ж=30\div 50$ с в первом случае и $ОК=4\div 6$ см — во втором.

При переходе к конкретному предприятию рекомендации по оптимальной удобоукладываемости следует давать с учетом реальных затрат.

Пример 4.8. Определить оптимальную удобоукладываемость бетонной смеси для изготовления ребристой плиты покрытия ПКЖ 6×1,5 м из бетона М 200 на Здоблбуновском заводе железобетонных изделий.

Известно (пример 4.5), что оптимальная длительность тепловой обработки при изготовлении рассматриваемых изделий на заводе должна составлять 11 ч. Исходя из принятой классификации, изготавливаемое изделие можно отнести к среднеармированным конструкциям с простым сечением. Для привязки модели S_4 к реальным условиям находим поправочный коэффициент k_y , равный отношению фактических затрат на уплотнение бетонной смеси к расчетным: $k_y=0,95$. Суммируя уточненные модели затрат на материалы и тепловую обработку, а также на уплотнение бетонной смеси, получаем обобщенное уравнение, отражающее изменяющиеся статьи затрат при изготовлении изделий в условиях конкретного предприятия. Дифференцируя обобщенное уравнение затрат по фактору удобоукладываемости x_8 и приравняв полученное выражение нулю, записываем формулу $x_8=0,243-0,42x_2+0,023x_5-0,068x_{10}-0,93x_9-0,068x_{10}+0,31x_{11}+0,42x_{12}$, где $x_2, x_5, x_7, x_8, x_{10}, x_{11}, x_{12}$ — соответственно значения цементно-водного отношения, нормальной густоты цемента, продолжительности тепловой обработки, затрат

на цемент и добавки, а также сложности сечения и степени армирования (в кодированном виде).

Для изделий простого сечения ($x_{11}=-1$), среднеармированных ($x_{12}=0$), приготавливаемых из бетона марки 200 ($C/B=1,68$; $x_2=-0,16$) без введения добавок пластификаторов ($x_{10}=-1$) при стоимости цемента 15 руб. 21 к. за тонну ($x_8=-0,65$) и продолжительности тепловой обработки 11 ч ($x_7=-0,75$ условная удобоукладываемость, обеспечивающая минимум затрат, составляет $x_8=0,74$, т. е. $OK=10$ см).

Повышение подвижности с 4 до 10 см позволяет заводу при изготовлении плит снизить суммарные затраты на 0,5 руб/м³, повысить производительность на 5%. При этом расход цемента увеличивается на 11%.

Первоначальный (до оптимизации длительности тепловой обработки и удобоукладываемости) и окончательный составы бетона марки 200 равны:

- 1) $B=190$ кг; $C=285$ кг, $P=711$ кг, $Щ=1170$ кг.
- 2) $B=190$ кг, $C=323$ кг, $P=663$ кг, $Щ=1187$ кг.

Аналогично можно найти оптимальную удобоукладываемость и других изделий, изготавливаемых на заводе.

4.5. Проектирование оптимальных проектных марок бетона

Важнейшей и завершающей (рис. 1.1) стадией системного анализа при оптимальном проектировании составов бетона является обоснование экономически наиболее выгодных проектных марок, при которых конструкции удовлетворяют условиям прочности, устойчивости, трещиностойкости, водонепроницаемости и т. д. при заданных нагрузках и минимальных затратах. Задача выбора оптимальных марок бетона по прочности — одна из задач оптимального проектирования железобетонных конструкций и решается во взаимосвязи с оптимизацией других конструктивных параметров: геометрических размеров сечения, расчетного сопротивления арматуры, коэффициента армирования и др. Определение оптимальных значений марки бетона по прочности и геометрических размеров конструкции при необходимости позволяет одновременно найти напорный градиент и установить оптимальную марку по водонепроницаемости.

В окончательном варианте проектные марки бетона по прочности, водонепроницаемости, морозостойкости и т. д. должны быть увязаны как между собой, так и с другими параметрами конструкции.

Без оптимизации проектных требований к бетону, принимая во внимание конечные критерии эффективности, теряет практический смысл оптимизация составов бетона. Логика системного анализа обуславливает необходимость единого рассмотрения как технико-экономических, так и конструктивных аспектов данной задачи. Сравнение стоимости конструкций из типовых проектов с соответствующими оптимизированными их вариантами показывает [78], что для простейших железобетонных конструкций (балок и балочных плит) среднее отклонение от

оптимального решения составляет примерно 5...7%, для более сложных — типа предварительно-напряженных балок 10...12%, а при проектировании железобетонных рам, плит и в особенности оболочек оно достигает 30...40%.

При системном подходе к оптимизации как технологических, так и конструктивных параметров бетона целесообразно применять методы оптимизации, основанные на математической теории эксперимента. Они позволяют получить математическую модель целевой функции для исследуемого комплекса факторов и графическим или аналитическим способом определить их сочетание, обеспечивающее оптимальное решение. При этом построение моделей осуществляется на основе либо алгоритмизированных экспериментов (технологические модели), либо алгоритмизированных расчетов (технико-экономические модели).

Первые попытки оптимизации железобетонных конструкций на основе теории планирования эксперимента сделаны в работах М. Б. Краковского [61]. Однако, он использовал линейные модели, которые в многофакторной ситуации обычно не адекватны. Процесс оптимизации предлагается завершать по мере выхода в почти стационарную область «крутым восхождением». Главная особенность нашего подхода состоит в том, что рассматриваемая задача тесно связана с другими технологическими задачами (рис. 1.1), являясь одной из подсистем оптимального проектирования составов бетона.

В отличие от других работ [61] целевую функцию — приведенные затраты на конструкцию — мы предлагаем выражать полиномиальным уравнением регрессии второго порядка в зависимости от марки бетона и других сопряженных с ней конструктивных факторов. Полный полином второго порядка представляет собой функцию, дифференцируемую в точке x_{opt} , и необходимым условием экстремума является обращение в нуль первого дифференциала функции в этой точке или равенство нулю ее частных производных. Если целевая функция выражена полиномиальной статистической k -факторной моделью второго порядка, то приведенное выше условие экстремума можно записать следующим образом:

$$\frac{\partial y}{\partial x_1} = b_1 + 2b_{11}x_1 + \sum_{j=1}^k b_{1j}x_j = 0 \text{ и т. д.} \quad (4.17)$$

$$x_{1opt} = (b_1 + b_{12}x_2 + \dots + b_{1k}x_k)/(-2b_{11}). \quad (4.18)$$

Пусть x_1 — кодированное значение марки бетона. Выражение позволяет найти оптимальное значение марки бетона при фиксированных значениях других факторов. Если наряду с маркой бетона следует определить экстремальные значения других исследуемых факторов, минимизирующих затраты, то

необходимо решить систему, состоящую из k линейных неизвестных.

В общем случае при поиске оптимальных решений по k -факторным полиномиальным моделям второго порядка при $|x_i| \leq 1$ удобно применение диссоциативно-шагового метода [13].

Для того чтобы $x_{i \text{ opt}}$ находился в исследуемой зоне, т. е. $|x_{i \text{ opt}}| \leq 1$, необходимо выполнения условия

$$(|b_i| + \sum_{i \neq j} |b_{ij}|) \leq 2|b_{ii}|. \quad (4.19)$$

В противном случае проверяют следующие дополнительные условия:

$$(|b_i| - \sum_{i \neq j} |b_{ij}|) \geq 2|b_{ii}|, \quad (4.20)$$

$$(|b_i| - \sum_{i \neq j} |b_{ij}|) < 2|b_{ii}|. \quad (4.21)$$

Если выполняются условия (4.20, 4.21), то оптимальное значение x_i всегда находится вне исследуемой зоны и в зависимости от знака b_i принимается ± 1 .

Таким образом, сущность предлагаемой методики оптимизации проектной марки бетона по прочности и сопряженным с ней конструктивным фактором состоит в следующем. Определяют основные факторы, от которых зависит несущая способность, а также затраты на изготовление конструкции и назначают их уровни варьирования. Для данного числа факторов выбирают типовой план. В каждой строке матрицы планирования при помощи конструктивных расчетов по формулам СНиП находят обеспеченность несущей способности. Если для всех сочетаний факторов, характерных для данного плана, несущая способность конструкции обеспечивается, то подсчитывают для каждой строчки матрицы изменяемые статьи приведенных затрат на изготовление конструкций при необходимости с учетом транспортных и других расходов. Затем по рекомендуемым формулам [3] получают коэффициенты уравнения регрессии второго порядка, проверяют их значимость при требуемой точности и адекватность модели для 95- или 90%-ной доверительной вероятности. Полиномиальную модель при выполнении условия (4.19) дифференцируют по оптимизируемым факторам, решают систему линейных уравнений, ищут оптимальные значения требуемых факторов с учетом заданных ограничений. Если характерны условия (4.20, 4.21), то значения факторов, обеспечивающие минимум затрат, находятся на границе области их определения ($x_i = \pm 1$).

Ниже рассмотрим примеры оптимизации проектных марок.

Пример 4.9. Необходимо определить оптимальные марки бетона по прочности и водонепроницаемости, а также расчетное сопротивление арматурной стали и толщину статически определимых плит, находящихся под двусторонним давлением воды. Допустимая ширина раскрытия трещин 0,15 мм.

Назначаем (табл. 4.12) условия планирования расчетов. В качестве выходного параметра принимаем изменяющуюся часть приведенных затрат на 1 п. м. конструкции, руб.

Выбираем план типа B_4 — близкий по свойствам к D — оптимальным [3].

Таблица 4.12. УСЛОВИЯ ПЛАНИРОВАНИЯ РАСЧЕТОВ

Факторы	Уровни варьирования		
	-1	0	+1
x_1 — изгибающий момент от давления воды, Н. м	4500	7875	11250
x_2 — толщина плиты, см	8	11	14
x_3 — марка бетона по прочности на сжатие	200	300	400
x_4 — расчетное сопротивление арматуры, МПа	200	270	340

В состав изменяющихся статей приведенных затрат включаем затраты на материалы бетонной смеси, рассчитываемые по уравнению (табл. 4.2), и затраты на арматуру. При расчете затрат на материалы бетонной смеси руководствуемся номограммами (рис. 3.11—3.13), полученными при решении технологических моделей. Принимаем $OK=4$ см.

Определяем по каждой строке матрицы необходимую площадь арматуры по первому предельному состоянию и ширину раскрытия трещин по формулам СНиП II-56-77.

При точности расчетов до 1% получаем следующее уравнение регрессии приведенных затрат (руб/п. м.), описывающих исследуемую зависимость с 95%-ной доверительной вероятностью,

$$S = 9,25 + 1,48 x_1 + 0,22 x_2 + 0,4 x_3 - 0,63 x_4 + 0,37 x_2^2 + 0,43 x_3^2 + 0,68 x_4^2 - 0,39 x_1 x_2 - 0,13 x_1 x_3 - 0,2 x_1 x_4 + 0,26 x_2 x_3 + 0,3 x_2 x_4. \quad (4.22)$$

Оптимизируемыми факторами служат x_2 , x_3 и x_4 . В соответствии с условием (4.19) прогнозируем, что оптимальные значения x_3 и x_4 лежат в пределах исследуемой области. Для x_2 оно может принимать как предельно возможные значения (± 1), так и находиться внутри области в зависимости от значений x_1 .

Дифференцируя уравнение по x_2 , x_3 и x_4 и приравнявая полученные выражения к нулю, получаем следующую систему линейных уравнений:

$$\begin{cases} 0,22 + 0,74 x_2 - 0,39 x_1 + 0,26 x_3 + 0,29 x_4 = 0, \\ 0,40 + 0,86 x_3 - 0,73 x_1 + 0,26 x_2 = 0, \\ 0,63 + 1,36 x_4 - 0,2 x_1 + 0,29 x_2 = 0. \end{cases} \quad (4.23)$$

Задаваясь различными значениями x_1 , нетрудно найти экстремальные значения x_2 , x_3 и x_4 , а затем, перейдя к натуральным величинам, определить соответственно оптимальную толщину плиты, марку бетона и расчетное сопротивление арматуры. Получив напорный градиент при оптимальной толщине конструкции, можно найти и оптимальную марку бетона по водонепроницае-

мости. Результаты расчетов показывают, что с увеличением изгибающего момента оптимальная толщина возрастает. При изгибающем моменте 4500 Н. м. оптимальной является толщина конструкции 8 см, 8000 — 10 см, 12000 — 12 см, 14500 — 14 см. В то же время оптимальные прочность бетона и расчетное сопротивление арматурной стали практически не изменяются и равны соответственно 25 МПа (М 250) и 270 МПа.

Зная оптимальные значения марки бетона, толщины конструкции и класса арматурной стали, легко определить площадь поперечного сечения арматуры и запроектировать конструкцию, а также найти оптимальный состав бетона.

Таблица 4.13. УСЛОВИЯ ПЛАНИРОВАНИЯ РАСЧЕТОВ

Факторы	Уровни варьирования		
	-1	0	+1
x_1 — толщина стойки трубы, см	14	20	26
x_2 — толщина ригеля трубы, см	15	20	25
x_3 — марка бетона по прочности на сжатие	200	300	400
x_4 — расчетное сопротивление арматурной стали, МПа	200	270	340
x_5 — длина трубы, см	100	150	200

Пример 4.10. Оптимизировать марки бетона по прочности и водонепроницаемости, класс арматуры и толщину (d) башни глубинного водосброса Стрыйского гидроузла. Первоначальный проектный вариант Укринпродхоза: М 300; А-III, Мрз 100; $d=2$ м. Исходные материалы для изготовления бетона: песок и дробленый гравий из местной песчано-гравийной смеси фракции 5...40 мм, а также портландцемент с минеральными добавками Здолбуновского цементно-шиферного комбината.

Для статического расчета суммируем нагрузку согласно СНиП II-50-74 и II-57-75. Расчет производим для наибольшей плиты с размерами $10 \times \times 20,75$ м как для плиты, защемленной по трем сторонам, что позволяет найти значение наибольших изгибающих моментов.

В качестве варьируемых факторов принимаем марку бетона по прочности на сжатие x_1 [(+1) — М 350; (0) — М 300; (-1) — М 250], класс арматуры x_2 [(+1) — А-III; (0) — А-II; (-1) — А-I] и толщину конструкции в м x_3 [(+1) — 2; (0) — 1,5; (-1) — 1 м]. Расчеты производим в соответствии с трехуровневым планом второго порядка для трех факторов, включающим 17 точек [3]. На первом этапе рассчитываем конструкцию на прочность как для прямоугольного сечения с одиночной арматурой. Это позволяет найти для всех возможных сочетаний факторов в матрице планирования необходимую площадь арматуры и определить ее стоимость. На втором этапе вычисляем в каждой строчке матрицы планирования стоимость материалов на изготовление бетонной смеси и стоимости арматуры. При определении состава бетонной смеси принимаем подвижность бетонной смеси $OK=4$ см. Для учета особенностей местных материалов при помощи эксперимента находим поправочные коэффициенты. Составы бетонов приведены в табл. 3.15. При расчете затрат на материалы бетонной смеси стоимости портландцемента М 400, щебня и песка приняты по проекту соответственно: 23, 32 руб/т, 5,17 и 5,10 руб/м³.

Уравнение затрат имеет вид, руб/м³:

$$S = 84,92 + 6,8x_1 - 2,1x_2 + 21,2x_3 - 0,32x_1^2 + 0,18x_2^2 + 1,68x_3^2 + 0,12x_1x_2 + 0,88x_2x_3 + 2,38x_1x_3 \quad (4.24)$$

Легко находим, что минимум затрат обеспечивается при граничных значениях факторов: $x_1 = -1$ (М 250); $x_2 = +1$ (А-III) и $x_3 = -1$ ($d=1$ м).

При максимально возможном напоре воды 15 м и толщине стенки 1 м напорный градиент равен 15, что обуславливает необходимость назначения марки по водонепроницаемости В 12. Приняв толщину стенки 1,5 м, требуемую марку бетона по водонепроницаемости можно довести до В 6÷В 8. Окончательно из условия определенного соотношения свойств бетона на исследуемых материалах принимаем: М 300; В 6÷В 8, $d=1,5$ м. Обеспечиваемая морозостойкость $M_{рз}$ 150.

Экономия материалов (бетона и арматуры) при оптимальном варианте по сравнению с первоначальным проектным составляет 22,1%.

Таблица 4.14. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ
ДЛЯ ТРУБ ПТ И ПТУ

Наименование конструкции	Толщина стенки, см	Толщина ригеля, см	Марка бетона	Длина трубы, см	Расчетные приведенные затраты, руб/п. м.
Проектный вариант					
Труба ПТ 200×200	13	23	300	100	74,4
Труба ПТУ 200×200	13	23	300	100	83,94
Оптимальный вариант					
Труба ПТ 200×200	20—22	20—22	200	150	64,7
Труба ПТУ 200×200	20—22	20—22	200	150	70,8

Примечание. Класс арматуры А—Ш.

Пример 4.11. Определить оптимальные марки бетона, геометрические размеры и класс арматурной стали прямоугольных безнапорных труб ПТ и ПТУ, разработанных институтом Укринпроектхоз.

В качестве варьируемых факторов принимаем конструктивные параметры по табл. 4.13.

Для планирования расчетов выбираем план Na_5 , статический расчет производим по трем предельным состояниям для трех режимов работы конструкции (методика из СНиП): строительного, эксплуатационного и монтажного. При расчете модели целевой функции — приведенных затрат на 1 п. м. конструкции в деле — затраты на бетон рассчитываем по модели S_2 (табл. 4.2) с учетом разработанных составов (рис. 3.11—3.14) при $OK=4÷6$ см и продолжительности тепловой обработки 14 ч. Затраты на арматуру, формирование, монтаж, устройство стыков определяем по нормативным данным.

Математико-статистическая обработка полученных результатов позволяет получить следующее уравнение регрессии:

$$\begin{aligned} \text{для труб ПТ: } S_{ПТ} = & 70,42 - 0,15 x_1 + 1,42 x_2 + 3,99 x_3 - 3,36 x_4 - \\ & - 2,37 x_5 - 0,32 x_1^2 + 1,8 x_2^2 + 1,38 x_3^2 + 1,11 x_4^2 - 0,6 x_1 x_3 - 0,37 x_1 x_4 + \\ & + 0,32 x_1 x_5 + 0,39 x_2 x_3 - 0,29 x_2 x_5 - 0,62 x_4 x_5; \end{aligned} \quad (4.25)$$

$$\begin{aligned} \text{для труб ПТУ (усиленных) } S_{ПТУ} = & 80,23 + 0,21 x_1 - 1,55 x_2 + 0,81 x_3 - \\ & - 8,4 x_4 - 0,14 x_5 + 3,72 x_1^2 + 6,35 x_2^2 + 2,54 x_3^2 + 2,3 x_4^2 - 4,24 x_1 x_2 + 3,44 x_1 x_3 + \\ & + 0,58 x_1 x_4 - 0,73 x_1 x_5 + 2,23 x_2 x_3 + 1,96 x_2 x_4 - 0,33 x_2 x_5 + 1,98 x_3 x_4 + \\ & + 1,99 x_3 x_5 - 0,63 x_4 x_5. \end{aligned} \quad (4.26)$$

Проанализировав уравнения (4.25, 4.26) принимаем оптимальным класс арматурной стали А—Ш ($x_4=1$). Из условия особенностей технологии производства труб и монтажа длину целесообразно ограничить 1,5 м.

Дифференцируя полученные выражения по x_1 , x_2 и x_3 с учетом ограничений по классу арматуры и длине трубы, получаем системы из трех линейных уравнений, решая которые определяем с учетом унификации оптимальные значения марки бетона, толщины стойки и ригеля трубы.

Подставляя в модели значения проектных и оптимальных параметров в кодированных величинах, находим приведенные затраты на 1 п. м. конструкции трубопровода из элементов типового и оптимального вариантов (табл. 4.14). Анализ данных показывает, что выбор оптимальной марки бетона и других конструктивных параметров труб рассмотренного типа позволяет за счет корректирования состава бетонной смеси и снижения монтажных расходов получить экономический эффект по сравнению с типовым вариантом на 10...15%.

Решение задач проектирования оптимальных проектных параметров бетонной смеси и бетона завершает системный анализ при оптимальном проектировании составов бетона (рис. 1.1). В результате этого анализа представляется возможным в конечном счете запроектировать на основе необходимых количественных зависимостей бетон требуемого качества при установленных критериях эффективности производства.

Приведенные экспериментально-теоретические зависимости могут быть использованы на практике для прогнозирования свойств и оптимального проектирования составов бетона. Вместе с тем сложность, многообразие условий и процессов в технологии бетона не позволяют считать их универсальными и исчерпывающими. Главная задача нашей работы заключалась в том, чтобы показать новые возможности, которые открывают структурная теория бетона, математическое моделирование и системный анализ для развития и совершенствования технологических и оптимизационных расчетов.

42. Дворкин Л. И., Файнер М. Ш. Количественные зависимости при оценке эффективности добавок бетона. — Будівельні матеріали та конструкції, 1976, № 2.
43. Дворкин Л. И., Файнер М. Ш. Исследование технико-экономической эффективности тепловой обработки сборного железобетона методами математического планирования эксперимента. — Изв. вузов. Строительство и архитектура, 1976, № 3.
44. Дворкин Л. И., Файнер М. Ш. Пример применения методов математического планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. — Заводская лаборатория, 1976, № 5.
45. Дворкин Л. И., Файнер М. Ш. Выбор оптимальной удобоукладываемости бетонной смеси. — Энергетическое строительство, 1977, № 3.
46. Дворкин Л. И., Файнер М. Ш. Эффективность добавок при прокатном производстве. — Бетон и железобетон, 1978, № 6.
47. Дворкин Л. И., Файнер М. Ш., Мироненко А. В. Опыт применения математического планирования эксперимента в инженерных расчетах. — Заводская лаборатория, 1978, № 5.
48. Дворкин Л. И., Файнер М. Ш. Экономико-технологические вопросы надежности гидротехнического бетона. — В кн.: Вопросы надежности железобетонных конструкций. Куйбышев, 1976.
49. Десов А. Е. Некоторые вопросы структуры, прочности и деформации бетонов. — В кн.: Структура, прочность и деформация бетонов. М.: Стройиздат, 1966.
50. Десов А. Е. Вибрированный бетон. — М.: Стройиздат, 1961.
51. Довжик В. Г. О зависимости прочности бетона от V/C . — Бетон и железобетон, 1974, № 9.
52. Запорожец И. Д., Окроков С. Д., Парийский А. А. Тепловыделение бетона. — Л.: М.: Стройиздат, 1966.
53. Зедгинидзе И. Г. Математическое планирование эксперимента при исследовании и оптимизации свойств смесей. — Тбилиси: Мецниереба, 1971.
54. Иванов Ф. М., Ратинов В. Б., Тринкер Б. Д. Практический опыт и перспективы применения химических добавок для повышения качества бетона. — В кн.: Тезисы докладов VIII Всесоюзной конференции по бетону и железобетону. М.: Стройиздат, 1977.
55. Иванова Р. П., Дворкин Л. И. Гидрофобный гидротехнический цемент с применением местных химических добавок. — В кн.: Исследования по технологии цемента. Красноярск, 1968.
56. Иванова Р. П., Гальперина Т. Я., Старчевская Е. Я., Дворкин Л. И. Опыт применения гидрофобного портландцемента в гидростроительстве. — Гидротехническое строительство, 1979, № 4.
57. Кайсер Л. А., Чехова Р. С. Цементы и их рациональное использование при производстве сборных железобетонных изделий. — М.: Стройиздат, 1972.
58. Кищенко И. И. Исследование влияния тепловлажностной обработки на прочность бетона с помощью математико-статистических методов. — Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Одесса, 1973.
59. Колохов П. Г. Механико-технологические основы торможения процессов разрушения бетонов ускоренного твердения. Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Л., 1979.
60. Ковальская Н. Н., Малинина Л. А. Морозостойкость пропаренного бетона с добавками ПАВ. — Бетон и железобетон, 1980, № 3.
61. Краковский М. Б. Оптимальное проектирование изгибаемых железобетонных элементов. — Бетон и железобетон, 1975, № 2.
62. Красный И. М. Повышение морозостойкости бетона при введении алюминиевой пудры. — Бетон и железобетон, 1969, № 12.
63. Красный И. М. Исследование морозостойкости мелкозернистых бетонов. — Бетон и железобетон, 1969, № 12.
64. Крылов Б. А. Вопросы теории и производственного применения электрической энергии для бетонов в различных температурных условиях. — Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 1969.

65. *Кунцевич О. В.* Исследования физических и технологических основ проектирования морозостойких бетонов. — Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Л., 1968.
66. *Куннос Г. Я.* Реологические задачи вибрационной технологии бетона. — Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Рига, 1971.
67. *Лагойда А. В.* Применение воздухововлекающих добавок в сборном железобетоне. — Бетон и железобетон, 1974, № 5.
68. *Малинина Л. А.* Тепловлажностная обработка тяжелого бетона. — М.: Стройиздат, 1977.
69. *Мак-Миллан Ф. Р.* Основные принципы приготовления бетона. — М.: 1955.
70. *Миронов С. А., Малинина Л. А.* Ускорение твердения бетона. — М.: Стройиздат, 1964.
71. *Михайленко Г. В.* Применение математического моделирования для исследования прочности бетона, пластичности бетонной смеси и оптимизации состава бетона. — Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Одесса, 1973.
72. *Мчедлов-Петросян О. П.* Химия неорганических строительных материалов. — М.: Стройиздат, 1971.
73. *Невилль А. М.* Свойства бетона. — М.: Стройиздат, 1972.
74. *Прессман И. Г.* Применение комплексных гидрофобно-пластифицирующих добавок для улучшения строительно-технических свойств гидротехнического бетона. — Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Тбилиси, 1973.
75. *Прыкин Б. В.* Проектирование и оптимизация технологических процессов заводов сборного железобетона. — К.: Вища школа, 1976.
76. *Рапинов В. Б., Шейкин А. Е.* Современные воззрения на процессы твердения портландцемента и пути их интенсификации. — В кн.: Труды Всесоюзного совещания по современным проблемам технологии бетона. М.: Стройиздат, 1965.
77. *Рибиндер П. А.* Физико-химическая механика дисперсных структур. — В кн.: Физико-химическая механика дисперсных структур. М.: Наука, 1966.
78. *Рейтман М. И.* Оптимизация параметров железобетонных конструкций на ЭВМ. — М.: Стройиздат, 1974.
79. *Рыбьев И. А.* Строительные материалы на основе вяжущих веществ. — М.: Высшая школа, 1978.
80. Рекомендации по производству и применению легкого бетона на пористых заполнителях для крупнопанельных конструкций жилых домов. — М.: 1974.
81. Рекомендации по учету влияния возраста бетона на его основные технические свойства. — М.; Л.: Энергия, 1964.
82. Руководство по тепловой обработке бетонных и железобетонных изделий. — М.: Стройиздат, 1974.
83. Руководство по проектированию состава гидротехнических бетонов. — М.: Энергия, 1974.
84. Руководство по технико-экономической оценке способов формирования бетонных и железобетонных изделий. — М.: Стройиздат, 1978.
85. *Сизов В. П.* Проектирование составов тяжелого бетона. — М.: Стройиздат, 1980.
86. *Симонов М. З.* Основы технологии легких бетонов. — М.: Стройиздат, 1973.
87. Состав, структура и свойства цементных бетонов / Под ред. Г. И. Горчакова. — М.: Стройиздат, 1976.
88. *Скрамтаев Б. Г., Баженков Ю. М.* О едином расчетно-экспериментальном методе определения состава обычного (тяжелого) бетона. — Изв. АСИА СССР, 1962, № 4.
89. Совершенствование технологии и качества строительных материалов на основе статистических моделей. Тезисы конференции. — Кишинев, 1971.

90. Соркин Э. Г. Исследование некоторых вопросов технологии бетона с применением методов планирования эксперимента. — Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1968.
91. Сорокер В. И., Довжик В. Г. Жесткие бетонные смеси в производстве сборного железобетона. — М.: Стройиздат, 1964.
92. Сторк Ю. Теория состава бетонной смеси. — Л.: Стройиздат, 1971.
93. Стольников В. В. Исследования по гидротехническому бетону. — М.: Госэнергоиздат, 1962.
94. Стольников В. В. Воздухововлекающие добавки в гидротехническом бетоне. — М.: Л.: Госэнергоиздат, 1953.
95. Стрилец Г. И. Оптимизация составов бетона в условиях нормального твердения и тепловой обработки с применением математического моделирования. — Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1979.
96. Файнер М. Ш. К вопросу о критериях и принципах оптимальности режимов тепловой обработки бетона. — Изв. вузов. Строительство и архитектура, 1979, № 10.
97. Фере Р. Технология строительных вяжущих материалов / Под ред. Н. Н. Лямина. С-П, 1902.
98. Хигерович М. И., Дворкин Л. И., Иванова Р. П. Влияние гидрофобизирующих ПАВ на свойства гидротехнического бетона. — Гидротехническое строительство, 1971, № 6.
99. Хигерович М. И. Гидрофобный цемент. — М.: Промстройиздат, 1957.
100. Цыганков И. И. Техничко-экономический анализ способов производства сборного железобетона. — М.: Стройиздат, 1973.
101. Шейкин А. Е. Структура, прочность и трещиностойкость цементного камня. — М.: Стройиздат, 1974.
102. Шейкин А. Е. Критерий морозостойкости бетона. — Бетон и железобетон, 1979, № 11.
103. Шейкин А. Е., Чеховский Ю. В., Бруссер М. И. Структура и свойства цементных бетонов. — М.: Стройиздат, 1979.
104. Шестоперов С. В. Долговечность бетона транспортных сооружений. — М.: Транспорт, 1966.
105. Шестоперов С. В. Исследование возможности применения ультразвука для оценки морозостойкости бетона. — Бетон и железобетон, 1974, № 11.
106. Шестоперов С. В. Технология бетона. — М.: Высшая школа, 1977.
107. Шмигальский В. Н. Вибрационное уплотнение и контроль качества бетонных смесей и бетона. — Новосибирск, 1966.
108. Штаерман Ю. Я., Тевзадзе Ю. Н. Плотный бетон на многофракционном заполнителе. — Тбилиси: Сабчота Сакартвело, 1967.
109. Яшвили А. И. Определение среднего диаметра и удельной поверхности строительных песков. — Изв. ТНИСГЭИ, 1964, т. 15.
110. Powers T. C. and Brownyard T. L. Studies and physical properties of hardened portland cement paste. — Proc. Amer. Concrete Inst. 1947, N 43.
111. Dzulinski M. Bull. Centre d'Etudes des Rech. et d'Essais Scientifiques. — University of Liege, 1953, N 6.
112. Wishers Y. Einfluß einer Temperaturänderung auf die Festigkeit von Zementstern und Zementmörtel mit Zuschlagstoffen verschiedener Wärmedehnung, Schriftenreihe der Zementindustrie. — Verein deutscher Zementwerke, 1961, N 28.
113. Popovich S. Effect of porosity of strength of concrete. — Journal of materials, 1969, vol 4, N 2.
114. Roy D., Gouda G. High Strength Generation in Cement Pastes. — Cement and Concrete Res, 1973, N 3.
115. Whiteside T., Sweet H. Proc. of the Highway Research Board, 1950, v 30.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
Глава 1. ЗАДАЧИ И МЕТОДОЛОГИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СОСТАВОВ БЕТОНА	4
1.1. Основные задачи оптимального проектирования составов	4
1.2. Системный анализ-методология решения задач оптимального проектирования составов	10
Глава 2. СТРУКТУРНО-КРИТЕРИАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ И ПРОЕКТИРОВАНИЮ ОПТИМАЛЬНЫХ СОСТАВОВ БЕТОНА	16
2.1. Расчет показателей удобоукладываемости бетонной смеси	16
2.2. Выбор оптимального соотношения заполнителей	29
2.3. Прогноз прочности бетона на основе структурно-физических представлений	32
2.4. Прогноз морозостойкости бетона	51
2.5. Проектирование составов морозостойких бетонов	60
Глава 3. КИБЕРНЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СВОЙСТВ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ СОСТАВОВ БЕТОНА	66
3.1. Применение математического моделирования для проектирования составов бетона	67
3.2. Качественная структура связей свойства—режим—состав бетона. Исходные условия математического моделирования	72
3.3. Построение и технологический анализ математических моделей свойств бетонной смеси и бетона	76
3.4. Решение задач оптимизации составов бетона на основе комплекса полиномиальных моделей	96
Глава 4. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРИ ОПТИМАЛЬНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ СОСТАВОВ БЕТОНА	112
4.1. Построение и анализ моделей приведенных затрат	113
4.2. Анализ эффективности составов бетонных смесей	119
4.3. Выбор оптимальной длительности тепловой обработки	132
4.4. Выбор оптимальной удобоукладываемости бетонной смеси	142
4.5. Проектирование оптимальных проектных марок бетона	147
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	154

Леонид Иосифович
Дворкин

ОПТИМАЛЬНОЕ
ПРОЕКТИРОВАНИЕ
СОСТАВОВ БЕТОНА

Редактор В. В. Войтович
Переплет художника О. Э. Юдиной
Художественный редактор
В. В. Ковальчук
Технический редактор
Т. М. Веселовский
Корректоры А. В. Карминская,
Т. Т. Козак

ИБ 6442

Сдано в набор 08. 12. 80. Подп. в печать
08. 09. 81. БГ 03720. Формат 60×90/16. Бумага
книжно-журн. Лит. гарн. Выс. печать.
10,0 усл. печ. л. 10,47 уч.-изд. л. Тираж
2000 экз. Изд. № 839. Зак. 3159. Цена
1 р. 70 коп.

Издательство при Львовском государственном
университете издательского объединения
«Вища школа», 290000, Львов, ул. Универси-
тетская, 1.

Львовская областная книжная типография,
290000, Львов, ул. Стефаника, 11.