

В. П. КАМЕНЦЕВ, Л. Б. МОИЖЕС

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ
БЕТОННЫХ РАБОТ
ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ
МОСТОВ

**СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ БЕТОННЫХ РАБОТ
ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ МОСТОВ**

*Владимир Петрович Каменицев,
Леонид Борисович Мойжес*

Редактор *Н. А. Гурова*
Технический редактор *Т. М. Пашкова*
Корректор *В. Я. Кинарская*

Сдано в набор 5/V 1972 г. Подписано в печать 10/X 1972 г.
Бумага 60×90¹/₁₆ № 1. Печ. л. 11,5. Уч.-изд. л. 12,52. Тираж 5 000.
Зак. тип. 5111а. Цена 67 коп. Т114007. Изд. № 1-341/15 № 3314.
Издательство «Транспорт», Москва, Басманный тип., 6а

Московская типография № 19 Главполиграфпрома
Государственного комитета Советов Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли,
наб. Мориса Тореза, 34.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ
БЕТОННЫХ РАБОТ
ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ
МОСТОВ



Москва «Транспорт» 1972

Современные методы бетонных работ при строительстве мостов. В. П. Каменцев, Л. Б. Мойжес. Изд-во «Транспорт», 1972 г. Стр. 1—184.

Отражен накопленный за последние годы опыт организации и производства арматурных, опалубочных и бетонных работ при строительстве мостов в СССР и за рубежом. Описано действующее и проектируемое оборудование, обобщены требования к свойствам исходных материалов и к бетону для мостовых сооружений, приведены схемы организации работ в различных условиях (заводы, полигоны, строительные площадки), даются сведения по экономике бетонных работ.

Книга рассчитана на инженерно-технических работников, связанных с проектированием организации работ и строительством железобетонных мостов.

Рис. 87, табл. 34, библи. 32.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Грандиозные задачи, поставленные XXIV съездом КПСС, по капитальному строительству, в том числе и по строительству мостов различного назначения, требуют в первую очередь значительного повышения качества и сокращения сроков строительства. В развитии мостостроения наблюдается дальнейшее расширение сферы и объектов применения бетонных и железобетонных конструкций.

Изменились конструктивные формы фундаментов, опор и пролетных строений мостов и требования к свойствам бетона и арматуры. Широкое распространение получили сборные железобетонные конструкции, изготавливаемые на заводах и полигонах. На долю сборных конструкций в Советском Союзе приходится 92% кладки пролетных строений и около 40% кладки опор.

Увеличился выпуск предварительно напряженных конструкций (до 70% пролетных строений и до 50% свай). Переход на сборные конструкции, применение предварительного обжатия обусловили уменьшение поперечных сечений и увеличение прочности бетона. Тонкостенные конструкции применяются как в пролетных строениях, так и в опорах.

Увеличилась удельная поверхность современных конструкций (отношение площади поверхности к объему бетона), а следовательно, и степень их взаимодействия с атмосферой (нагрев и остывание, насыщение водой и высыхание). В последнее время широко применяются опоры мостов без защиты их облицовкой в пределах переменного уровня воды и ледохода. Во многих случаях даже при достаточно сильном ледоходе (например, в средних течениях рек Волги и Оби) для облицовки опор вместо естественного камня используют железобетонные блоки. Бетонная кладка почти полностью вытеснила каменное мощение русел и конусов. Широкое применение получили эстакадные конструкции со стойками (сваями) небольших сечений. Во всех этих конструкциях бетон опор подвергается попеременному замораживанию и оттаиванию в водонасыщенном состоянии.

В современных конструкциях в качестве арматуры наиболее часто стали использовать высокопрочную проволоку небольших диаметров, которая из-за меньших размеров сечения, повышенной прочности и пониженной пластичности менее коррозионноустойчива, чем старые сорта мягкой арматурной стали. Для надежной защиты арматуры от коррозии необходимо иметь достаточные гарантии плотности защитного слоя бетона и сохранения защитных свойств в зоне по периметру стержней.

Возросли требования к трещиностойкости конструкций, особенно выполненных из предварительно напряженного железобетона с проволоочной арматурой. В таких конструкциях в целях защиты арматуры практически не допускается длительное существование видимых трещин. В бетонных опорах отказ от устройства облицовки также вынуждает обратить особое внимание на повышение их трещиностойкости.

Современные конструкции, особенно пролетные строения, подвергаются воздействию усадочных напряжений. Это связано с применением высокопрочных бетонов, отличающихся высоким расходом цемента и воды, а также и с переходом на тонкостенные конструкции сложного поперечного сечения и больших размеров.

Воспринять температурные и усадочные напряжения постановкой специальной арматуры возможно далеко не всегда из-за сложной картины распределения и направленности их действия. Необходимо иметь известный запас прочности

бетона при растяжении и растяжимости (т. е. способности растягиваться для компенсации усадочных и температурных деформаций).

Развитие новых конструктивных форм мостов значительно повысило требования к свойствам бетона. Если раньше практически единственной целью было получение заданной прочности бетона при сжатии, то теперь необходимо также обеспечивать получение высокой прочности при растяжении, растяжимости, морозостойкости, водонепроницаемости, а также стремиться к уменьшению величины усадки и ползучести бетона.

При изготовлении сборных конструкций на заводах и полигонах широко применяется ускоренное твердение бетона (за счет пропаривания, электропрогрева и др.), что в общем неблагоприятно влияет на структурообразование бетона, хотя степень этого воздействия и можно уменьшить до допустимых пределов. При изготовлении элементов мостов отрицательные последствия ускоренной тепловой обработки могут сказываться особенно ощутимо. Большие размеры мостовых конструкций и сложная форма затрудняют обеспечение установленных режимов тепловлажностной обработки и их изменение в пространстве и времени в соответствии с принятой технологией. Нарушение этих условий может привести к значительным температурным и усадочным деформациям конструкции, появлению трещин, развитию деструктивных процессов в бетоне.

Возросшие требования к свойствам бетона, изменившиеся условия строительства мостов обусловили необходимость дальнейшего совершенствования технологии бетонных работ и ужесточения требований к свойствам исходных материалов, параметрам оборудования, методам арматурных работ, приготовлению, укладке и уходу за бетоном.

Большой вклад в дело повышения уровня бетонных работ в мостостроении внесли мостовики. Советского Союза. Особенно необходимо отметить работы по созданию поточно-агрегатной технологии изготовления балок длиной до 33 м, по изготовлению элементов составных балок в опалубке с высокоточными торцевыми щитами, совершенствованию режимов пропаривания и др.

Инженерно-технический персонал мостостроительных организаций должен быть знаком со всеми современными достижениями в этой области. В настоящей работе авторами обобщены и систематизированы результаты работ, проделанных в области совершенствования технологии строительства железобетонных мостов в СССР и за границей.

В книге приводятся также характеристики материалов, используемых для изготовления конструкций (цемент, заполнители, арматура), основные требования к свойствам бетона и сведения по экономике бетонных работ. Эти данные необходимы для лучшего понимания необходимости и технико-экономического обоснования различных особенностей производства работ.

Основное внимание в работе уделено вопросам бетонирования надземных (надводных) конструкций. Подводное бетонирование в работе не освещено, поскольку эта тема достаточно полно разобрана в специальных монографиях и последних печатных трудах по сооружению различных типов оснований и фундаментов.

Авторы приносят свою благодарность работникам научно-исследовательских, проектных и строительных организаций Министерства транспортного строительства, чье активное участие и помощь способствовали разработке излагаемых в книге вопросов.

Все замечания и пожелания по содержанию книги авторы просят сообщать по адресу: Москва, Б-174, Басманный тупик, ба, издательство «Транспорт».

Авторы

ГЛАВА I. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПРОИЗВОДСТВУ БЕТОННЫХ РАБОТ

§ 1. Свойства бетона и влияние их на долговечность мостовых сооружений

Требования, предъявляемые к бетону различных элементов железобетонных мостов, зависят от их напряженного состояния, характера загрузки, зоны расположения (подводная, переменный уровень воды, надводная), особенностей среды (климатические условия, наличие агрессивных веществ), а также от вида конструкции. Например, для предварительно напряженных конструкций с проволочной арматурой необходим бетон с высокой плотностью, достаточно большой прочностью на растяжение, незначительной усадкой и ползучестью. Для массивных неармированных опор применяется бетон, обладающий высокой степенью растяжимости, гарантирующей от преждевременного трещинообразования при температурных деформациях.

Напряженное состояние элементов мостов определяется расчетом, на основе которого предъявляют требования к следующим характеристикам бетона: прочности на сжатие, растяжение, модулю упругости, растяжимости, ползучести и усадке, однородности. Не все из этих характеристик одинаково важны для любой конструкции. Степень их влияния зависит от особенностей работы конструктивного элемента. Влияние зоны расположения конструкции и особенностей среды учитывается на основе различных эмпирических рекомендаций. Так, например, устанавливаются требования к морозостойкости, водонепроницаемости, коррозионной стойкости бетона.

По прочности на сжатие в 28-дневном возрасте бетон для мостовых конструкций имеет марки 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600. В опытным порядке применяется бетон марки 700. В нормах проектирования мостовых конструкций приводятся расчетные сопротивления бетона различных марок при действии многократно повторных нагрузок, используемые при расчете железнодорожных мостов на выносливость. Расчетные сопротивления определены в предположении, что в период эксплуатации прочность бетона составляет не менее 1,2 прочности в 28-дневном возрасте.

Для конструкций, не рассчитываемых на выносливость, прочность бетона в течение всего периода эксплуатации должна быть не ниже проектной. Эти требования ранее не оговаривались специально, так как старая технология бетонных работ с естественным вызреванием и использованием низкомарочных цементов всегда обеспечивала прирост прочности бетона при эксплуатации. Выполнение требования о стабильном приросте прочности бетона во времени нельзя рассматривать как автоматически выполняющееся. Применение быстротвердеющих тонкомолотых цементов и жестких

режимов пропаривания могут во многих случаях ускорить твердение бетона в первоначальный период, но затем резко замедлить его. Иногда возможен даже сброс прочности.

При эксплуатации прочность бетона может уменьшиться под действием низких температур наружного воздуха. В связи с этим необходимо обеспечивать (за счет подбора свойств цемента и режимов тепловлажностной обработки) дальнейший прирост прочности при эксплуатации или снизить расчетные сопротивления бетона. Последний вариант был использован, например, при разработке норм проектирования конструкций для районов северной строительного-климатической зоны ($\frac{ВСН\ 151-68}{\text{Минтрансстрой}}$).

Прочность на растяжение. Нормативные значения осевого растяжения для бетонов различных марок должны приниматься согласно нормам СН 365-67 в зависимости от марки бетона на сжатие R_{28} . В мостостроении не принято контролировать прочность бетона на растяжение: предполагается, что нормативная величина R_p обеспечивается при получении заданной прочности бетона на сжатие. В гидротехническом и дорожном строительстве СССР действующими нормами предписывается контроль прочности бетона на растяжение. Результаты испытаний контрольных образцов должны соответствовать требованиям проекта к величине марки бетона на растяжение. Анализ испытаний показал, что отношение $\frac{R_p}{R_{28}}$ постоянно и зависит от вида цемента, чистоты и крупности заполнителей и технологии уплотнения бетона. Исследования, проведенные ЦНИИСом на заводах мостовых железобетонных конструкций, также подтвердили, что достаточная прочность бетона на сжатие не всегда гарантирует получение нормативных значений R_p .

В большинстве случаев при расчете конструкций не учитывается работа бетона на растяжение, т. е. предполагается, что усилия воспринимаются только арматурой. В связи с этим прочность бетона на растяжение практически не имеет значения. Однако в ряде конструкций нормами не допускается образование трещин. Для предотвращения их возникновения определяются растягивающие напряжения в бетоне и величины их ограничивают. К таким конструкциям относятся балки из предварительно напряженного железобетона. В бетонных массивных опорах также предполагается, что напряжения, возникающие от температурных и усадочных деформаций, воспринимаются бетоном при растяжении. Следовательно, прочность бетона на растяжение будет в данном случае определять долговечность конструкций. Во времени прочность бетона при растяжении должна меняться так же, как и прочность при сжатии. Это требование не всегда легко выполняется. Рост усадки и внутренних напряжений во времени снижает прочность бетона при растяжении, особенно при незначительном росте его прочности при сжатии.

Одной из главных характеристик бетона, определяющих момент появления трещин, является его растяжимость — величина пре-

дельных деформаций растяжения к моменту разрыва бетона. Обладающие высокой растяжимостью бетоны даже при невысокой прочности на растяжение воспринимают без появления трещин деформации, возникающие при стесненной и неравномерной усадке, а также при неравномерном нагреве. Это имеет очень важное значение, так как указанные причины часто приводят к возникновению трещин при изготовлении конструкций и в период эксплуатации. В мостостроении растяжимость в процессе изготовления инструментально не контролируется, хотя точное значение ее величины необходимо для того, чтобы иметь критерии для определения температурных перепадов в конструкции, расстояния между швами, размеров блоков бетонирования. При составлении норм производства бетонных работ на мостах обычно принимают величину растяжимости бетона равной в среднем $10 \div 15 \cdot 10^{-5}$. Фактическая растяжимость бетонов по данным исследований изменяется в широких пределах, уменьшаясь с возрастом.

Морозостойкость бетона — это его способность сохранять в установленных пределах начальную прочность на сжатие при переменном замораживании и оттаивании в насыщенном водой состоянии. Основная причина разрушения бетона при замораживании — увеличение объема воды в его порах при переходе ее в лед (примерно на 9%). При этом создается внутреннее давление на стенки пор, которое приводит к увеличению объема и постепенному разрушению бетона. Степень увеличения объема зависит от насыщенности бетона водой и от минимальной температуры замораживания. По мере понижения температуры вода постепенно замерзает во все более тонких порах бетона и увеличивается внутреннее давление льда. Степень воздействия зависит от частоты повторяемости циклов замораживания и оттаивания, а также от характера напряженного состояния бетона. В соответствии с этим требуемая морозостойкость бетона должна дифференцироваться в зависимости от следующих показателей: степени водонасыщения бетона (уровня переменного горизонта или надводного); величины отрицательной температуры наружного воздуха; частоты переходов через 0°C температуры воздуха в процессе эксплуатации сооружения; напряженного состояния бетона.

Однако по целому ряду причин морозостойкость мостового бетона пока нормируется лишь в зависимости от величины отрицательных температур наружного воздуха. Нормами СН 365-67 установлены три марки мостового бетона по морозостойкости: 100, 200 и 300. Выбор марки зависит от среднемесячной температуры наиболее холодного месяца.

В отдельную зону выделены районы Сибири, в которых средняя температура наиболее холодных суток составляет -40°C и ниже (северная строительно-климатическая зона). Эти районы характерны особо низкими температурами (до -60°C), большими суточными амплитудами колебаний температуры. Частые и резкие колебания температуры приводят к неравномерному нагреву отдельных зон бетона и арматуры и как следствие к большим внут-

ренним напряжениям, трещинам в бетоне, отслоениям защитного слоя бетона от арматуры.

Для бетона надводных (надземных) конструкций марка по морозостойкости принимается такой же, как и на участке переменного уровня (за исключением конструкций в северной строительно-климатической зоне). Это вызвано тем, что из-за возможных дефектов водоотвода и изоляции не исключается вероятность водонасыщения дождевой водой отдельных участков пролетных строений и опор. Кроме того, надводные конструкции отличаются наиболее сложным напряженным состоянием, что может снизить морозостойкость бетона. Этим объясняется наличие известных запасов в проектной марке по морозостойкости бетона надводных конструкций.

В дополнение к проектным требованиям вводятся некоторые более жесткие ограничения в технологических нормах для участка переменного уровня и северной строительно-климатической зоны. Эти требования относятся к цементу, водоцементному отношению, а также к режиму ухода за бетоном.

Морозостойкость мостового бетона должна контролироваться испытанием специальных образцов по методике ГОСТ 4800—59 «Бетон гидротехнический. Методы испытаний». Общепринятая методика испытания бетона в СССР заключается в сравнении прочности при сжатии образцов, подвергавшихся замораживанию, и эталонных образцов. Нормами на гидротехнический бетон установлено, что степень снижения не должна превышать 15% (для промышленных сооружений 25%). Кроме того, прочность образцов мостового бетона должна быть не ниже проектной марки. Для этого необходимо, чтобы бетон имел достаточный прирост прочности в возрасте после 28 дней.

Водонепроницаемость. Этим свойством должен обладать бетон конструкций, которые при строительстве или эксплуатации подвергаются воздействию напорной или безнапорной воды. Марка бетона по водонепроницаемости принимается в проектах в зависимости от конкретных данных от В2 до В8 (т. е. бетон должен быть непроницаем для воды, фильтрующейся под действием гидростатического напора от 2 до 8 атм).

Усадка и ползучесть. По проектным нормам бетон для мостов должен обладать минимальной ползучестью и усадкой.

Максимальные нормативные значения мер ползучести C_n и усадки ϵ_{yn} не должны превышать:

$$C_n \leq \frac{k B}{R}; \quad \epsilon_{yn} \leq k_1 B \sqrt{B},$$

где $k = 16 \cdot 10^{-6}$, $m^3/\kappa\Gamma$;

$k_1 = 0,125 \cdot 10^{-6}$, $(m^3/\kappa\Gamma)^{3/2}$;

R — проектная марка бетона;

B — расход воды в литрах на $1 m^3$ бетона.

Стойкость в агрессивной среде. Бетон должен быть стоек к коррозии в результате действия агрессивной воды, воздушной или грунтовой среды любого вида:

1) выщелачивания пресной водой с малой жесткостью составных частей цементного камня;

2) химических процессов между солями и кислотами, содержащимися в воде, грунте или воздухе, и бетоном с образованием легковымываемых соединений;

3) кристаллизации соединений в порах бетона, образующихся при действии агрессивной среды, разбухания и разрушения его.

Коррозия 1-го типа часто встречается на горных реках и реках Сибири, где вода имеет малую жесткость. Однако несоизмеримо больший вред наносит мостовым конструкциям выщелачивающее действие дождевой воды (идеально мягкой, с ничтожно малым содержанием примесей). Такая вода интенсивно вымывает из цементного камня легкорастворимые части (чаще всего гидрат окиси кальция), расшатывая и ослабляя структуру бетона. Поэтому все надводные (надземные) конструкции мостов должны быть защищены от дождевой воды или иметь повышенную стойкость бетона.

Коррозия 2-го и 3-го типов распространена: в приморских районах, промышленных зонах, при строительстве в агрессивных грунтах (солончаках), где вода, грунт и воздух содержат соли и кислоты; на мостах, по которым часто перевозят химикаты. Наличие их и степень концентрации выявляется при проектных изысканиях и служит основанием для назначения мер по защите конструкций от коррозии (повышенные требования к бетону; устройство специальной изоляции).

Стойкость бетона в отношении агрессии возрастает с увеличением его плотности. Долговечность бетона в агрессивной среде зависит также от вида цемента и заполнителей. Указания об этом должны содержаться в проекте конструкции. Так, выщелачивающей агрессии хорошо противостоят цементы с активными минеральными добавками (гранулированный шлак, туф, трасс), связывающими гидрат окиси кальция в нерастворимые гидросиликаты. Агрессии 3-го типа лучше сопротивляется сульфатостойкий портландцемент, который обладает также достаточной стойкостью к выщелачиванию из-за благоприятного минералогического состава и малого содержания легкорастворимых составляющих цементного камня. При высоких концентрациях агрессивных включений бетон изолируют защитными покрытиями (глиняными, битумными, синтетическими и др.). Этот метод целесообразен, если на строительстве нет возможности применить коррозиестойкие цементы или получить плотный бетон.

Перечисленные требования не исчерпывают всех параметров, которым должен удовлетворять бетон элементов мостов в различных условиях. Иногда предъявляют дополнительные требования к бетону: стойкость к истиранию (для опор на реках с большим количеством взвешенных частиц в текущей воде), водопоглощение, набухание при водонасыщении (для бетона заполнения полостей).

§ 2. Свойства исходных материалов и их влияние на бетон

Цементы. Выбор вида цемента в наибольшей степени зависит от среды, в которой расположен элемент конструкции и принятой технологии работ (зимнее бетонирование, пропаривание, твердение в нормальных условиях). Кроме технических характеристик, указываемых согласно ГОСТам в документации на цементы (вид цемента, марка по прочности, содержание добавок), для оценки качества цемента необходимо знать: содержание основных минералов в клинкере (C_3A — трехкальциевый алюминат, C_4AF — четырехкальциевый алюмоферрит, C_3S — трехкальциевый силикат — алит и C_2S — двухкальциевый силикат — белит); тонкость помола; нормальную густоту; равномерность изменения объема; степень лежальности цемента.

Некоторые из этих характеристик определяют в лаборатории мостостроительных организаций, другие получают от заводов-поставщиков (см. гл. IV). При выборе вида цемента необходимо учитывать следующие положения.

Активные минеральные добавки повышают водонепроницаемость бетона, стойкость к выщелачивающей агрессии, но при этом одновременно увеличивается усадка и водопотребность цементного камня и снижается морозостойкость. Трехкальциевый алюминат образует при твердении неводостойкие и неморозостойкие соединения, что снижает морозостойкость бетона на высокоалюминатном цементе. Высокое содержание алюмината способствует возрастанию усадки. В то же время увеличенное содержание трехкальциевого алюмината повышает скорость твердения в нормальных условиях (но не при пропаривании) и конечную прочность бетона.

Трехкальциевый силикат (алит) характерен тем, что при его гидролизе в процессе твердения выделяется большое количество свободной извести, которая легко вымывается мягкой водой, следовательно, чрезмерно высокое содержание алита снижает долговечность сооружений. Вместе с тем содержание алита повышает скорость твердения бетона.

Двухкальциевый силикат (белит) твердеет медленно в начальный период, но более интенсивно в последующий. Гидросульфаталюминат кальция, образующийся в результате добавки гипса к цементу в переменных условиях внешней среды, рекристаллизуется и снижает морозостойкость бетона. В то же время добавка гипса уменьшает усадку бетона и ускоряет твердение.

Увеличение тонкости помола способствует ускорению твердения в начальный период, при этом возрастает усадка и снижается морозостойкость. Тонкомолотые цементы дают незначительный прирост прочности в течение последующего периода твердения. Лежалые цементы снижают морозостойкость бетона и увеличивают его усадку.

Высокое содержание щелочей и хлоридов в цементе способствует возникновению вредных химических реакций (щелочей с аморф-

ным кремнеземом, который содержится в некоторых заполнителях, и хлоридов с арматурой, особенно проволокой малого диаметра).

В агрессивных условиях должны применяться цементы, устойчивые к данному виду агрессии. Высокая стойкость цементного камня к агрессии 1-го типа обеспечивается применением добавок, связывающих гидрат окиси кальция в нерастворимые соединения, или подбором минералогического состава цемента (ограниченное содержание алита и трехкальциевого алюмината). Коррозиоустойчивость цементного камня к агрессии 2-го и 3-го типов может быть получена подбором минералогического состава цемента.

Наиболее льготные требования предъявляются к цементу для бетона подземных (подводных) конструкций. При сооружении их в зоне, где нет агрессивной среды, практически не ограничивают минералогический состав, тонкость помола и содержание добавок.

Зона переменного уровня относится к наиболее тяжелой по условиям работы бетона. Конструкции, расположенные в ней, должны обладать высокой морозостойкостью, малой усадкой и высокой коррозиоустойчивостью по отношению к агрессивному воздействию текущей воды (чаще всего выщелачиванию). Этим требованиям удовлетворяют низкоалюминатные, прубомолотые цементы с оптимальным содержанием алита и гипса, без добавок или с ограниченным количеством добавок типа гранулированного шлака.

На основании исследований и опыта применения для наиболее употребительных составов смесей мостового бетона в зоне переменного уровня рекомендуется применять цементы со следующими характеристиками:

- содержание C_3A не должно превышать 8%, а для конструкций в суровых климатических условиях (северное исполнение) — 5%;

- количество алита должно составлять не больше 50—55%;

- удельная поверхность цемента по ГОСТ 310—60 должна быть не более 2800—3200 $см^2/г$;

- в качестве добавки применять доменные гранулированные шлаки в количестве не более 10%;

- для бетонирования конструкций применять нележалые цементы с величиной потерь при прокаливании (п. п. п.) не более 3%.

При наличии агрессии вид цемента выбирается с учетом ее типа.

Влияние внешней среды на бетон в надводной (надземной) зоне несколько мягче, чем в зоне переменного уровня. Это позволяет применять цементы с содержанием C_3A до 8%. В то же время при расчете надводных конструкций (опор, пролетных строений) особое внимание необходимо уделить усадке. Для массивных конструкций из монолитного бетона удельная поверхность цемента не должна превышать 3000 $см^2/г$. Содержание добавок ограничивают до 5% гранулированного шлака. Остальные требования для надводного бетона аналогичны зоне переменного уровня.

Цементной промышленностью СССР выпускаются различные виды цементов, которые отличаются наличием и типом добавок, минералогическим составом клинкера, тонкостью помола, актив-

ностью (см. ГОСТ 10178—62* «Портландцемент, шлакопортландцемент, пуццолановый портландцемент и их разновидности. Технические требования», ГОСТ 9835—66 «Портландцемент для производства асбестоцементных изделий. Технические требования»). Из сопоставления свойств различных цементов и требований эксплуатации для бетона разных зон можно сделать определенные рекомендации по их применению (табл. 1).

Рассмотрим требования, предъявляемые к цементам условиями производства работ. Исследования показали, что для конструкций, подвергаемых пропариванию, наиболее пригодны цементы с содержанием 50—65% алита и до 8% трехкальциевого алюмината без добавок или содержащие до 10% активных минеральных добавок. Бетоны с высоким содержанием трехкальциевого алюмината сразу после тепловой обработки обладают невысокой степенью использования активности цемента и в возрасте 28 суток большим недобором прочности (до 15%) по сравнению с бетоном естественного твердения. В условиях нормального твердения ряд цементов имеет замедленный рост прочности в начальный период и требует более длительного ухода. К ним относятся шлакопортландцемент, сроки ухода за которым вдвое больше, чем за портландцементами, сульфатостойкий портландцемент.

Рассмотренные особенности цементов осложняют производство работ в условиях зимнего бетонирования или сухого и жаркого климата, а также при замоноличивании стыков, когда дорого обходится каждый день поддержания нормальных температурно-влажностных условий. Поэтому целесообразно применять достаточно быстротвердеющие портландцементы (если их применение допускается требованиями к долговечности бетона). Необходимо учитывать также условия транспортирования и хранения. Высокомарочные быстротвердеющие цементы склонны к быстрому снижению активности. Для дальнейшей транспортировки и длительного хранения рекомендуется гидрофобный цемент.

При выборе заводов-поставщиков цемента необходимо стремиться к унификации снабжения. Не следует без особых на то причин завозить на объект три-четыре вида цемента.

Заполнители. Вид заполнителя не только определяет экономичность бетона и его прочность при сжатии, но существенно влияет на долговечность конструкции. В связи с этим к заполнителям для мостового бетона предъявляются высокие требования.

Одним из способов повышения долговечности бетона является уменьшение количества цементного камня в составе бетона, так как цементный камень — наиболее слабая его составляющая. Поэтому очень важно, чтобы свойства заполнителей обеспечивали получение бетонной смеси с минимальным количеством цементного теста. Достигнуть поставленной цели можно, применяя щебень изверженных пород максимально возможной крупности, подбирая гранулометрический состав зерен так, чтобы уменьшить объем пустот между ними.

ГОСТ	Наименование	Вид конструкции и допускаемая марка бетона по морозостойкости	Климатические зоны и условия расположения конструкций относительно горизонта воды (земли)	Технологические ограничения по применению
10178—62*	Сульфатостойкий портландцемент	Бетонные и железобетонные конструкции с маркой по морозостойкости Мрз 300 и ниже	Любые условия во всех климатических зонах	Нет ограничений
9835—66	Портландцемент для производства асбестоцементных изделий	Железобетонные конструкции с маркой по морозостойкости Мрз 300 и ниже	То же	То же
10178—62*	Портландцемент Пластифицированный портландцемент Гидрофобный портландцемент Портландцемент для бетонных покрытий автотомобильных дорог	Бетонные и железобетонные конструкции с маркой по морозостойкости Мрз 200—300	Все, кроме конструкций из бетона Мрз 300 в северной строительной климатической зоне на участке переменного горизонта. Ограничение может быть снято при применении воздухововлекающих добавок.	Тепловлажностная обработка пластифицированного и гидрофобного портландцемента должна производиться по специальному режиму, предварительно установленному экспериментальным путем.
969—69	Цемент глиноземистый	Бетонные и ненапрягаемые железобетонные конструкции с маркой по морозостойкости Мрз 300 и ниже	То же	Не допускается в тех случаях, когда температура бетона до набора им прочности может подняться выше 25—30°C
10178—62*	Шлакопортландцемент Пуццолановый портландцемент	Бетонные и ненапрягаемые железобетонные конструкции	Только под водой и под землей ниже зоны промерзания	Не допускается для бетона конструкций, укладываемого и твердеющего при температуре ниже +10°C без искусственного обогрева (за исключением бетона массивов)

В нормы введены требования, ограничивающие содержание различных примесей в заполнителях (табл. 2), а также об обязательном раздельном дозировании фракций щебня 5—10, 10—20, 20—40, 40—70 мм. В качестве заполнителя используют долговечные материалы, исключаящие вредное воздействие на цементный камень. Прочность исходных пород для щебня должна быть не менее чем в 1,5—2,5 раза выше прочности бетона (в зависимости от его марки), а для бетона зоны переменного уровня прочность породы должна составлять не менее $1\,000\text{ кг/см}^2$. Для приготовления бетонной смеси применяются заполнители с маркой по морозостойкости не ниже требуемой от бетона. Щебень и песок не должны

Таблица 2

Примеси, % по весу	Заполнитель	Для подземного и подводного бетона, массивных конструкций	Для бетона зоны переменного уровня	Для железобетонных конструкций независимо от их расположения
Глина, ил и мелкие пылевидные фракции, определяемые отмучиванием, не более	Песок Щебень	3 2	3 1	3 1
В том числе: глины	Песок	2	0,5	0,5
Органические примеси	Песок и щебень	Окраска не темнее цвета эталона		
Сернокислые и сернистые соединения в пересчете на SO_3 , не более	Песок Щебень	1 0,5	1 0,5	1 0,5
Слюда, не более	Песок	3	1	1

Примечания. Загрязненность щебня для железобетонных конструкций северной зоны не должна превышать 0,5%.

2. Для пролетных строений и железобетонных конструкций на участке переменного уровня загрязненность песка не должна превышать 2%.

содержать большого количества аморфного кремнезема. Как показали исследования, такой кремнезем вступает в реакцию со щелочами, содержащимися в цементе, образуя новые соединения, которые, увеличиваясь в объеме, способствуют образованию трещин в бетоне. Реакционноспособные породы известны в Подмосковье (Дмитровский карьер), на Кавказе (туфы, липариты, андезиты), Украине (андезиты Закарпатья), Восточной Сибири (альбитофиры, кварцевые порфиры и др.), на Дальнем Востоке, в Туркмении и в других местах. Примеси реакционноспособных минералов и горных пород иногда в значительном количестве (до 50%) содержатся в песчано-гравийных месторождениях бассейнов рек Камы, Волги, Енисея, Ингури, Урала, Сырдарьи, Нарына, Днепре в районе Канева, Печоре и Вычегде и др. Нежелательно содержание в заполнителях сернистых и сернокислых соединений (пирита, гип-

са). Наличие их может привести к образованию в бетоне примесей серной и сернистой кислот, обладающих агрессивными свойствами.

Необходимо также следить, чтобы в щебне не содержались минералы, увеличивающие свой объем при насыщении влагой. Коэффициенты температурного расширения щебня и цементного камня должны быть близки по величине. В противном случае при изменении температуры зерна щебня будут давить на окружающий их скелет цементного камня, что приведет к снижению его прочности и растяжимости. Это особенно важно для бетонов, подвергаемых пропариванию. Щебень не должен также снижать более чем на 20% прочность при насыщении его водой.

§ 3. Подбор состава бетона

Состав бетона подбирается с учетом специфических проектных требований к свойствам бетона. Рассмотрим способы, обеспечивающие выполнение этих требований.

Прочность на сжатие и растяжение. При подборе состава бетона, кроме водоцементного отношения (B/C) и марки цемента, необходимо учитывать степень уплотнения бетона при формировании и режим твердения. Степень уплотнения зависит от способов вибрирования бетона. Поэтому при оценке качества сооружений следует учитывать фактические условия уплотнения бетона. Если бетон подвергают пропариванию, то его прочность определяют с учетом принятого режима: длительности предварительной выдержки, скорости и величины подъема температуры. Многочисленные исследования показали, что при пропаривании конструкций, особенно без предварительной выдержки, с быстрым подъемом температуры и при высокой температуре изотермического прогрева прочность бетона может снизиться. Поэтому, чтобы подобрать оптимальный состав бетона для конструкций, подвергающихся тепловлажностной обработке, необходимо пропаривать контрольные образцы.

Прочность бетона при растяжении в значительной степени зависит от сцепления (адгезии) цементного камня и заполнителя. С увеличением сцепления сопротивление бетона растягивающим усилиям возрастает. Поэтому щебень должен иметь шероховатую поверхность. Отрицательное воздействие оказывает загрязненность заполнителей. Наличие обволакивающей пленки пылевидных частиц на поверхности зерен может полностью уничтожить адгезию цементного камня и щебня.

Наибольшей прочностью при растяжении обладает бетон с крупностью щебня 20—40 мм. Дальнейшее увеличение крупности щебня резко снижает прочность бетона. Величина R_p несколько возрастает при использовании щебня с повышенным (до 20—25%) содержанием лещадных зерен.

Морозостойкость бетона. Важный фактор, влияющий на морозостойкость, — это водоцементное отношение. Нормы (табл. 3) ограничивают предельные значения B/C в зависимости