

КАЧЕСТВО БЕТОНА И ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ЕГО ДОЛГОВЕЧНОСТЬ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ СТРОИТЕЛЬСТВА

А.Алимов

Ш.Т.Хошимжонов

<https://doi.org/10.5281/zenodo.19588207>

В работе рассмотрены основные факторы, влияющие на качество и долговечность бетона. Проанализировано воздействие состава смеси, водоцементного отношения (W/C), пористости, заполнителей и минеральных добавок на прочность, водонепроницаемость и химическую стойкость материала. Отмечено значение технологических режимов перемешивания, уплотнения и твердения в формировании плотной микроструктуры цементного камня.

The paper examines the main factors affecting the quality and durability of concrete. The influence of the mix composition, water–cement ratio (W/C), porosity, aggregates, and mineral additives on the material’s strength, water impermeability, and chemical resistance is analyzed. The importance of technological parameters of mixing, compaction, and curing in forming a dense microstructure of the cement matrix is emphasized.

Долговечность бетонных конструкций - одна из центральных задач современной строительной инженерии. Рост объёмов инфраструктурного строительства, ужесточение требований к ресурсосбережению и увеличение затрат на техническое обслуживание делают продление проектного срока службы конструкций экономически и экологически значимым направлением. Кроме того, изменение климата усиливает риск ускоренного разрушения бетона, что делает исследование факторов долговечности особенно актуальным в современных условиях.

Классические и современные исследования по свойствам и долговечности бетона представлены работами А.М. Neville, Р.К. Mehta и Р.Ж.М. Monteiro - фундаментальными учебниками и обзорами по микроструктуре, прочности и долговечности. Современные обзоры и исследования фокусируются на взаимодействиях климатических факторов и новых видов добавок минеральных заменителей, а также на моделировании коррозии и карбонизации в условиях реальной эксплуатации. Нормативные документы РФ, такие как **ГОСТ 26633–2012 “Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия”** [1] и **ГОСТ 30515–2013 “Цементы. Общие технические условия”** [2], задают базовые требования к материалам и контролю качества бетонных смесей.

Качество бетона является комплексной характеристикой, определяющей его способность сохранять проектные свойства и обеспечивать долговечность строительных конструкций в течение всего срока эксплуатации. Оно формируется под влиянием множества взаимосвязанных факторов, начиная от состава бетонной смеси и заканчивая условиями твердения, эксплуатации и воздействием окружающей среды. В первую очередь качество бетона оценивается по системе ключевых параметров, таких как прочность на сжатие и растяжение, пористость, водонепроницаемость, морозостойкость и химическая стойкость.

Прочность на сжатие является основным конструктивным показателем, определяющим способность материала воспринимать нагрузку; она зависит от состава смеси, ухода за бетоном и возраста. Пористость и распределение пор тесно связаны с отношением вода/цемент (W/C) и степенью уплотнения: чем меньше капиллярная

пористость, тем выше плотность и долговечность бетона. Водонепроницаемость, в свою очередь, отражает способность противостоять проникновению влаги и агрессивных ионов, что является ключевым фактором предотвращения коррозии арматуры (**ГОСТ 12730.5–2020 “Бетоны. Методы определения водонепроницаемости”**) [3].

Морозостойкость характеризует устойчивость к циклам замораживания и оттаивания, зависящую от структуры пор и степени воздухововлечения (**ГОСТ 10060.0–2012 “Бетоны. Методы определения морозостойкости”**) [4]. Химическая стойкость показывает сопротивление воздействию сульфатов, кислот и хлоридов, особенно в промышленных и морских условиях эксплуатации.

На долговечность бетона оказывает влияние совокупность факторов, которые можно классифицировать на технологические, физико-химические и эксплуатационные. Прежде всего, большое значение имеют материалы, входящие в состав бетонной смеси. Цемент, его класс и состав клинкера напрямую влияют на скорость гидратации, пористость и химическую стойкость цементного камня. Согласно ГОСТ 30515-2013 [2], качество цемента должно соответствовать определённым техническим требованиям, обеспечивающим равномерное твердение и минимизацию трещинообразования.

Тип и качество заполнителей - их плотность, чистота и минералогический состав - определяют модуль упругости, тепловое поведение бетона и его реакцию щелочь-кремнезём (ASR), способную вызывать внутренние разрушения (**ГОСТ 8269.0–2019 “Щебень и гравий из плотных горных пород. Методы испытаний”** [5]). Существенное влияние оказывают минеральные добавки и суперпластификаторы (**ГОСТ 24211–2008 “Добавки для бетонов и растворов. Общие технические требования”** [6]).

Использование золы-уноса, микрокремнезёма и доменного шлака при правильных дозировках снижает капиллярную пористость, улучшает структуру цементного камня и повышает стойкость к воздействию хлоридов и сульфатов. Современные исследования показывают, что оптимальное сочетание минеральных добавок и химических модификаторов может уменьшить проницаемость бетона на 30–40%, что значительно повышает его срок службы в агрессивных условиях.

Одним из наиболее критичных параметров является отношение вода/цемент. При уменьшении W/C увеличивается прочность, плотность и стойкость бетона к проникновению влаги и ионов. Однако чрезмерное снижение этого показателя требует обязательного использования суперпластификаторов и тщательного уплотнения смеси, иначе возможно образование недогидратированных участков и микротрещин, которые, наоборот, снижают долговечность (рисунок 1).

Технология перемешивания, уплотнения и укладки также играет важную роль: неравномерное распределение компонентов, недостаточное уплотнение и плохая укладка вызывают появление слабых зон и трещин, особенно критичных при эксплуатации в условиях высоких нагрузок или воздействия агрессивных веществ. Уход за бетоном и режим твердения являются определяющими для формирования прочной микроструктуры. Недостаточный уход приводит к ускоренному испарению влаги, нарушению процессов гидратации и увеличению капиллярной пористости (**ГОСТ 13015–2012 “Изделия бетонные и железобетонные. Общие технические условия”**

[7]). В результате бетон становится менее водонепроницаемым и быстрее подвергается разрушению под действием внешних факторов.



Рисунок 1.- Схема проникновения хлорид-ионов в бетон и их воздействие на арматуру

Кроме состава и технологии, большое значение имеют конструктивные меры, направленные на защиту бетона. Толщина защитного слоя над арматурой, наличие гидроизоляции, дренажных систем и антикоррозионных покрытий существенно влияют на долговечность конструкций (СП 63.13330.2018 **“Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения”** [8]). Исследования показывают, что увеличение толщины защитного слоя на каждые 10 мм способно увеличить срок службы конструкции на 15–20% при прочих равных условиях.

Также необходимо учитывать эксплуатационные и климатические факторы: перепады температур, повышенная влажность, воздействие морских солей и химически активных веществ приводят к ускоренному развитию процессов карбонизации и коррозии арматуры. При проектировании современных сооружений важно учитывать местные климатические сценарии и возможные агрессивные воздействия (СП 28.13330.2020 **“Защита строительных конструкций от коррозии”** [9]).

Аналитические исследования показывают, что зависимость прочности бетона от времени твердения при различных отношениях вода/цемент имеет нелинейный характер. При снижении W/C наблюдается более интенсивный рост прочности на ранних стадиях и достижение высоких значений прочности к 28 суткам. Графически эта зависимость выражается кривыми, показывающими повышение прочности при $W/C = 0.35$ и постепенное снижение при $W/C = 0.60$. Второй ключевой зависимостью является глубина проникновения хлоридов в бетон в зависимости от толщины защитного слоя и проницаемости материала (рисунок 2).

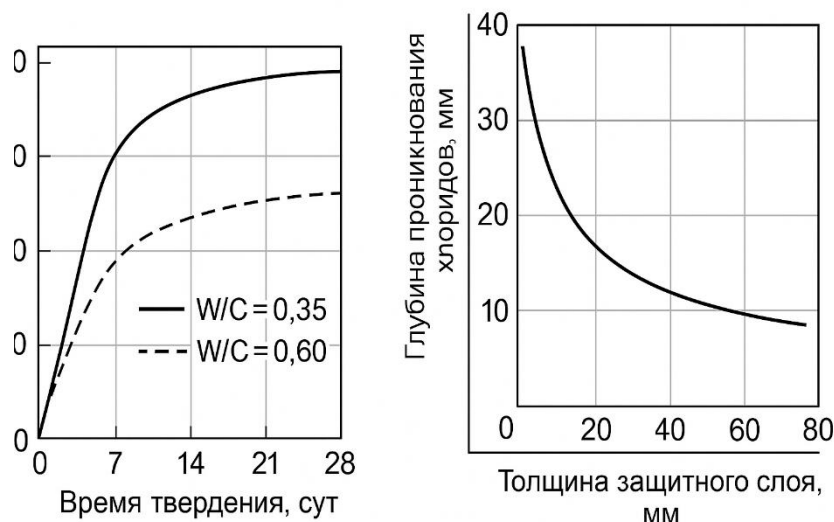


Рисунок 2.- Анализ графических зависимостей прочности бетона от времени и проникновения хлоридов от толщина защитного слоя

Анализ показывает, что при увеличении толщины защитного слоя с 20 до 60 мм глубина проникновения снижается экспоненциально, что прямо указывает на эффективность конструктивной защиты в условиях хлоридной коррозии. Эти зависимости позволяют не только оценивать долговечность конструкции, но и прогнозировать её поведение в различных условиях эксплуатации.

Таким образом, качество и долговечность бетона определяются комплексом взаимосвязанных факторов - от подбора компонентов и технологического режима до конструктивных решений и климатических воздействий. Повышение долговечности возможно при строгом соблюдении технологической дисциплины, использовании сертифицированных материалов по ГОСТ, оптимизации состава смеси и контроле за процессами твердения. Научно обоснованный подход к проектированию и эксплуатации бетонных конструкций обеспечивает снижение эксплуатационных затрат, повышение безопасности и устойчивости сооружений, а также продление их жизненного цикла в современных климатических и техногенных условиях.

Adabiyotlar, References, Литературы:

1. ГОСТ 26633–2012. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия.
2. ГОСТ 30515–2013. Цементы. Общие технические условия.
3. ГОСТ 12730.5–2020. Бетоны. Методы определения водонепроницаемости.
4. ГОСТ 10060.0–2012. Бетоны. Методы определения морозостойкости.
5. ГОСТ 8269.0–2019. Щебень и гравий из плотных горных пород. Методы испытаний.
6. ГОСТ 24211–2008. Добавки для бетонов и растворов. Общие технические требования.
7. ГОСТ 13015–2012. Изделия бетонные и железобетонные. Общие технические условия.
8. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения.
9. СП 28.13330.2020. Защита строительных конструкций от коррозии.