

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ БЕТОНОВ**А.А. Акрамов, А.М. Абдуганиев, А.О. Якубов**

Таджикский технический университет имени академика М.С.Осими

Срок службы бетона можно значительно увеличить при грамотном определении проектных характеристик, обоснованном подборе исходных компонентов, точном определении пропорций компонентов с учетом требуемых эксплуатационных характеристик, строгом соблюдении всех технологических операций — начиная от приготовления материала и заканчивая укладкой, уплотнением, а также обеспечением соответствующего ухода в процессе твердения и последующей эксплуатации. Представлены практические советы по достижению максимальной эффективности на каждом из этих этапов. Подчеркнуто, что стойкость материала против разрушения возрастает пропорционально снижению проницаемости, которая во многом зависит от уровня открытой пористости и среднего диаметра пор.

Ключевые слова: долговечность, бетонная смесь, пористость, морозостойкость, водонепроницаемость, бетон, цемент, гидратация.

УСУЛҶОИ БАЛАНД БАРДОШТАНИ ДАРОЗМУҶЛАИИ БЕТОН**А.А. Акрамов, А.М. Абдуганиев, А.О. Якубов**

Мӯҳлати хизмати бетонро бо роҳи дуруст муайян намудани хусусиятҳои конструктивӣ, интиҳоб намудани компонентҳои ибтидоӣ, ҳисоби дақиқи таркиби ҳамираи бетонӣ бо назардошти нишондиҳандаҳои истифодабарандаи он, роҳи намудани марҳалаҳои технологӣ — аз истеҳсоли он то монтаж, зичкунӣ ва таъмини нигоҳубинии дуруст дар давраи саҳтшавӣ, ҳеле зиёд қардан мумкин аст. Маслиҳатҳои амалӣ барои ноил шудан ба самаранокии ҳадди аксар дар ҳар яке аз ин марҳилаҳо пешниҳод қарда мешаванд. Таъкид қарда мешавад, ки муқовимати мавод ба шикастан мутаносибан ба қоҳиши гузариши он меафзояд, ки ин бештар аз сатҳи ковокии кушод ва диаметри миёнаи сӯроҳҳо вобаста аст.

Калидвожаҳо: дарозмӯҳлатӣ, ҳамираи бетонӣ, ковокӣ, хуноки тобоварӣ, обнагузаронӣ, бетон, семент, гидрататсия.

METHODS FOR INCREASING THE DURABILITY OF CONCRETE**A.A. Akromov, A.M. Abduganiev, A.O. Yakubov**

The service life of concrete can be significantly increased by properly defining the design characteristics, selecting the right starting components, and accurately calculating the composition of the mixture taking into account the required performance indicators, strict adherence to technological stages—from manufacturing to installation, compaction, and proper maintenance during curing and subsequent use—is provided. Practical tips for achieving maximum efficiency at each of these stages are provided. It is emphasized that the resistance of the material to destruction increases proportionally to the decrease in permeability, which largely depends on the level of open porosity and the average pore diameter.

Keywords: durability, concrete mix, porosity, frost resistance, water impermeability, concrete, cement, hydration.

Введение

Ресурс работы промышленных, жилищно-гражданских и транспортных сооружений предусматривается на многие десятилетия, что обуславливает применение больших запасов прочности при их проектировании, обеспечивающее устойчивость к постепенно нарастающим нагрузкам на протяжении всего расчетного срока работы. Тем не менее, немало сооружений демонстрирует признаки деградации и нуждается в восстановлении значительно раньше установленного срока. Основной причиной подобных явлений является недостаточная стойкость материалов к коррозии, которая вызывает постепенное разрушение элементов и конструкций.

Современные нормы строительства требуют применения материалов повышенной надёжности в возведении промышленных, гражданских и транспортных сооружений, в первую очередь бетона и железобетона.

Особую группу составляют бетоны с усовершенствованными характеристиками, превосходящими те, которые используются в традиционных строительных технологиях; их принято называть высокопроизводительными бетонами. Эти материалы отличаются повышенной водонепроницаемостью (W10–12), высокой стойкостью к циклическому замораживанию и оттаиванию (F300–600), а также другими значимыми эксплуатационными показателями, что обуславливает их всё более широкое распространение. Долговечность бетона напрямую зависит от способности выдерживать как внешние факторы (климатические условия), так и внутренние процессы (химические и физические изменения). Чем ниже проницаемость материала, тем эффективнее он противостоит разрушительному действию окружающей среды, будь то атмосферное воздействие или внутренние реакции.

Ключевое значение для продолжительности эксплуатации бетона имеет его водоустойчивость. Важнейшим параметром, определяющим устойчивость материала к разрушению, является морозостойкость — это способность выдерживать циклы замерзания и оттаивания при полностью водонасыщенном состоянии материала [8]. Несмотря на различия в проявлениях, такие свойства во многом определяются схожими факторами состава и внутренней структуры бетона. Следовательно, методы, повышающие одно из этих качеств, зачастую одновременно улучшают и другое.

Водонепроницаемость бетона

Под водонепроницаемостью бетонов понимают их способность препятствовать проникновению воды или водных растворов сквозь полную толщину материала. Полная герметизация возможна только при комплексной гидроизоляции поверхности бетона со стороны, подверженной воздействию давления жидкости. Это связано с тем, что вода может проникать через бетон и цементный матрикс уже при крайне малых давлениях — от 0,1 Па, а также при более значительных (в диапазоне от 0,1 до 1 МПа) [1]. Согласно данным источника [1], бетон считается практически непроницаемым, если интенсивность испарения влаги с внешней поверхности превышает скорость поступления воды внутрь [8]. Именно с этой точки зрения создание бетона, обладающего практической водонепроницаемостью, оказывается достижимым на практике. Водонепроницаемость бетона определяется его капиллярно-пористой структурой, где поры формируют непрерывную сеть, способную пропускать жидкости, включая воду. Во время твердения бетона, вызванного процессами гидратации цемента, проницаемость материала значительно падает — это связано с уменьшением общей пористости и переходом системы пор из сплошной, соединённой формы в разрозненную, дискретную. Хотя увеличение общей пористости обычно ослабляет водонепроницаемость, данный фактор не всегда действует предсказуемо, поскольку решающее значение обладают значениями открытой (интегральной) пористости P_i и определённой характеристикой распределения пор по размерному диапазону.

С увеличением степени гидратации цемента α наблюдается усиление изолированности пор в пористой структуре цементного камня. В ходе твердения часть открытой пористости постепенно блокируется гидратационными продуктами — цементным гелем, переходя в закрытое состояние, формируя тем самым замкнутую пористость P_3 . Рост показателя α сопряжён с уменьшением общей и интегральной пористости, а также ростом доли закрытых пор, что способствует повышению водонепроницаемости бетона. Одновременно заполнение поровых каналов гидратационными веществами приводит к сужению среднего диаметра капиллярных пор, так как объём цементного геля, образующегося в процессе гидратации, примерно в 2,1 раза больше первоначального объёма вступившего в реакцию цемента, что дополнительно усиливает водоупорные свойства материала [8, 14].

Вторым ключевым параметром, влияющим на водонепроницаемость бетона, выступает водоцементное отношение V/C . С ростом данного параметра снижается водонепроницаемость из-за увеличения общей и открытой пористости материала, а также расширения среднего диаметра капиллярных каналов в цементном камне. Связь между водоцементным отношением и водонепроницаемостью носит обратно пропорциональный характер. При $V/C \leq 0,45$ уровень водонепроницаемости достигает минимума; при значении 0,45 коэффициент фильтрации равен 3×10^{-12} см/с; дальнейший рост отношения выше 0,45 вызывает резкое падение сопротивления проникновению воды; при $V/C = 0,7$ этот показатель возрастает до $1,2 \times 10^{-10}$ см/с. Данное явление объясняется тем, что суммарная пористость бетона P_o (%) определяется по формуле [2].

$$P_o = C/10(V/C - 0,23 \cdot \alpha) + (1 - \delta) \cdot 100, \quad (1)$$

где V и C — расходы воды и цемента, кг на 1 м^3 бетона соответственно; δ — коэффициент уплотнения бетонной смеси.

Согласно уравнению (1), при стабильном расходе цемента на 1 м^3 бетона и фиксированном значении α суммарная пористость [8] зависит от соотношения воды к цементу — V/C ; рост этого параметра ведёт к увеличению общей пористости и ухудшению водонепроницаемости материала. При неизменном V/C повышение количества цемента сверх 350–400 кг/м³ также вызывает рост

общей пористости и снижение водоупорных характеристик бетона. Это связано с тем, что при увеличении расхода цемента возрастает удельный объём цементного камня в составе бетона, что в свою очередь приводит к увеличению доли пористых структурных элементов. Параллельно снижается устойчивость цементного камня к образованию трещин, особенно после тепловлажностной обработки и в ходе эксплуатации возникают усадочные трещины, усиливающие как общую, так и интегральную пористость, что неблагоприятно влияет на водонепроницаемость и морозостойкость. Подобные дефекты могут формироваться при любом виде твердения бетона, за исключением полного водного режима, реализация которого в практике встречается чрезвычайно редко [8, 14].

Морозостойкость бетона

Дополнительным фактором, снижающим прочностные характеристики бетона и железобетона, выступает недостаточная устойчивость к воздействиям к воздействию морозов.

При чередовании замерзаний и оттаиваний в условиях полного водонасыщения бетон подвергается разрушению по нескольким причинам, главной из которых является изменение агрегатного состояния воды внутри материала — её переход из жидкого в твёрдое, что сопровождается расширением объёма. Этот процесс порождает внутренние напряжения в цементном камне, способствуя деструкции структуры.

Материалы и методика исследований

Напряжения, возникающие в бетоне при указанных условиях, достигают значений, при которых возможно разрушение цементного камня при полном заполнении пор влагой — подобное подтверждено данными экспериментов, выполненных автором. Для исследования были изготовлены четыре серии образцов габаритами 10×10×10 см из бетонной смеси с составом Ц:П:Щ = 1:2:3 при различных водоцементных отношениях. Часть образцов после достижения прочности в течение 28 суток в водной среде дополнительно насыщалась водой под вакуумом, а затем испытывалась на морозостойкость по методике, предусмотренной стандартом ГОСТ 10060–95 [8].

Таблица 1 – Морозостойкость полностью водонасыщенных бетонов [18].

№ серии	Величина В/Ц	Коэффициент морозостойкости после числа циклов			
		1	3	5	10
1	0,4	0,9	0,7	0,54	0,41
2	0,45	0,8	0,7	0,45	0,33
3	0,5	0,72	0,65	0,42	0,25
4	0,55	0,65	0,6	0,4	0,25

Образцы оставались в воде до момента проведения испытаний (табл. 1). По данным исследования, коэффициент морозостойкости — это соотношение прочности после циклов замораживания-оттаивания по прочности при насыщении водой — после одного цикла достиг 0,8–0,9, а после трёх — снизился до 0,65–0,7, что свидетельствует об отказе бетона по критерию морозостойкости уже после третьего цикла [8]. Отмечается значительное уменьшение массы образцов. Максимальное снижение прочности фиксируется в бетонах с водоцементным отношением более 0,4, при этом рост В/Ц ускоряет процессы деградации.

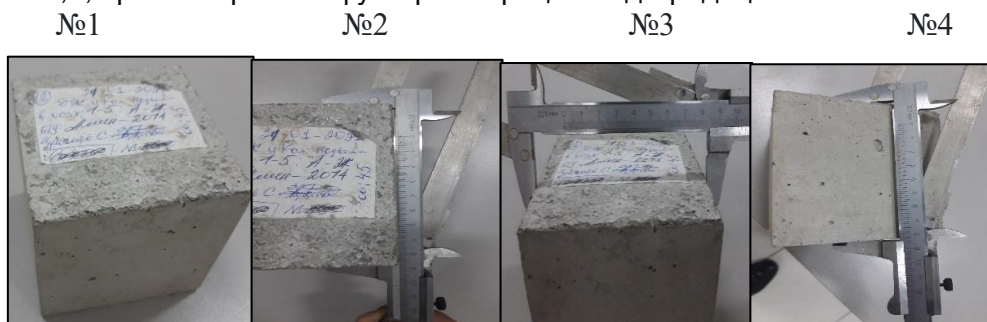


Рисунок 1 – Испытанные образцы на морозостойкость

Обсуждения

Способность бетона противостоять разрушительному действию многократных циклов заморозания и в процессе оттаивания при полном водонасыщении ключевым фактором является наличие в структуре пор, не заполненных водой, способных принимать избыточную жидкость, вытесняемую под давлением формирующихся ледяных кристаллов во время процесса заморозания.

Образование таких пор связано с явлениями химического усадочного смещения, возникающими в процессе гидратации цементного камня. Благодаря высокому капиллярному напряжению, такие мелкие поры могут наполняться водой благодаря соединению с более крупными пористыми структурами, что вызывает частичное или полное высыхание последних — например, больших пор и капилляров. Подобное обезвоживание возможно лишь при условии, когда такие крупные поры окружены порами цементного геля, препятствующими проникновению влаги из соседних зон либо из внешней среды.

Согласно результатам многих исследований [3–10], формирование усадочных трещин начинается через небольшой промежуток времени после контакта цемента с водой. Уровень усадки повышается по мере уменьшения водоцементного соотношения и ускоренном формировании твердой решетки цементного камня. Ускорению этого процесса способствуют оптимальный химико-минералогический состав цемента, а также применение специализированных добавок, стимулирующих кристаллизацию и рост кристаллических структур [8].

Замкнутые поры, частично или полностью заполненные из-за усадки, способны служить резервуарами для поровой жидкости, которая перемещается кристаллами льда в процессе заморозания бетона. При максимальной плотности материала объем таких «резервных» пор примерно равняется объёму капиллярных пор, испытывающих сокращение.

Давление, возникающее при расширении воды при заморозании, не проявляется до тех пор, пока все резервные полости не заполнятся жидкой фазой, продвигающейся под воздействием растущих ледяных кристаллов. Следовательно, внедрение технологий, создающих изолированные поры в структуре бетона, повышает его устойчивость к морозу. К таким методикам относятся понижение водоцементного отношения благодаря применению пластификаторов, качественному укладыванию и уплотнению смеси, стимулированию процесса гидратации цемента, точному подбору его химико-минерального состава, а также использованию других методов

Также в бетоне могут формироваться поры, условно воспринимаемые как замкнутые, образующиеся при в результате введения воздуха в смесь. Если такие поры полностью окружены пористой сетью цементного геля, они также могут функционировать как резервные ёмкости для компенсации внутренних напряжений при замораживании; в ином случае они остаются открытыми, заполняются водой при контакте с жидкостью и тем самым негативно влияют на морозостойкость материала.

Экспериментальные работы, выполненные автором, подтвердили ранее изложенные положения. Бетонные образцы габаритами 10×10×10 см изготовили из смеси с соотношением цемент : песок : щебень = 1:2:3 при водопоглощении 0,7. Образцы первой группы были приготовлены без добавок, тогда как во вторую группу был введён СНВ в дозировке 0,01% от массы цемента. Данные о морозостойкости, полученные согласно основному методу по ГОСТ 10060–95, представлены в таблице 2 [8].

Таблица 2 - Морозостойкость бетонов

Состав добавки, % массы цемента	Коэффициент морозостойкости при числе циклов замораживания-оттаивания				
	50	100	200	250	300
Без добавок	0,9	0,85	0,75	0,65	0,51
0,01	0,89	0,75	0,62	0,55	–

По имеющимся данным, использование воздухововлекающих добавок в бетоне с водоцементным соотношением 0,7 не улучшило, а даже существенно снизило морозостойкость. Это связано с тем, что поры, образующиеся под действием СНВ при повышенной водопотребности, остаются незаполненными цементным гелем, что приводит к росту открытой пористости материала [8]. Как показывают расчетные оценки и экспериментальные исследования, положительный эффект

воздуховлечения, способствующий повышению стойкости к морозу, наблюдается лишь при водоцементном отношении не выше 0,62.

Второй тип пор — открытые (интегральные) — играет иную роль: с ростом доли таких пор увеличивается количество воды, способной превратиться в лёд во время замерзания. Более значительный объём льда усиливает внутренние напряжения в структуре бетона, что ускоряет его разрушение при циклах замораживания и оттаивания. Влияние на морозостойкость бетонов оказывают множество факторов, однако, как следует из приведённых выше данных, ключевую роль играет соотношение объёмов условно замкнутых пор ($\Pi_{у.з}$) и общего количества пор (Π). Основным определяющим показателем здесь служит критерий морозостойкости $K_{мрз}$, выражаемый формулой [4, 5, 8].

$$K_{мрз} = \Pi_{у.з} / 0,09\Pi_{и}. \quad (2)$$

Исследования [4–6, 18] выявили тесную корреляцию между морозостойкостью бетонов и их критерием морозостойкости, что использовать этот показатель позволяет прогнозировать и оперативно выявлять морозоустойчивые свойства материала.

Исследование причин, оказывающих воздействие на водоудерживающую способность и морозостойкость бетона, свидетельствует о том, что долгосрочная надёжность сооружений достигается исключительно за счёт применения комплексных технологий на каждом этапе — от разработки состава и формирования структуры до контроля эксплуатационных характеристик и последующего обслуживания объекта.

На первоначальной стадии проводится подбор материалов и разработка рецептуры бетона. Влияние выбора вяжущих веществ на формирование долговечных бетонных смесей было предметом многочисленных исследований [4, 5, 8, 9], поэтому данный аспект достаточно детально проработан — далее он рассматриваться не будет. Однако важно указать, что условия, предъявляемые к вяжущим материалам для достижения водо- и морозостойкости, различаются. Применение глинозёмистого цемента, а также пуццолановых и шлакопортландцементов оправдано при производстве водонепроницаемых бетонных смесей, хотя их использование нецелесообразно в случаях необходимости обеспечения морозостойкости [4, 9]. Критическое значение имеет содержание минералов C_3A и C_4AF ; в обычном портландцементе доля C_3A должна быть ограничена значением 7% [3, 10, 11]. Исследования показали [7, 13], что даже при повышенной концентрации C_3A и C_4AF возможно получение бетонов с высокой морозостойкостью (с маркой по морозостойкости $F=400-500$ и выше), если применяются специальные добавки и осуществляется строгий контроль технологических процессов приготовления, укладки и ухода за бетоном на всех этапах твердения. Дополнительно следует отметить, что для обеспечения водонепроницаемости желательнее применять цементы с более мелким размером частиц [8, 12, 15], тогда как для обеспечения повышенной морозостойкости степень измельчения цемента следует ограничивать диапазоном 300–350 м²/кг [3, 4].

С учётом необходимости формирования бетона с длительным сроком службы за счёт совмещения высокой водоотталкивающей способности и устойчивости к замерзанию, оптимальным представляется установление предела содержания C_3A на уровне не выше указанного значения 7% и удельную поверхность цемента — 350 м²/кг [8].

Способы повышения долговечности бетона

Одним из действенных методов улучшения водоустойчивости, морозостойкости и механической прочности бетона является использование композитных вяжущих веществ в сочетании с суперпластификаторами нового поколения и специальными наполнителями.

Создание состава водонепроницаемого бетона основано на достижении необходимой степени уплотнения при укладке, обеспечивающей минимальный показатель фильтрации, остаётся ниже уровня $1,2 \cdot 10^{-10}$ см/с [8]. Методики расчёта подобных композиций детально изложены во многих научных публикациях, включая исследования [13].

При проектировании морозостойких бетонов первостепенное значение имеет корректное определение нормативной (проектной) морозостойкости. Проблема заключается в том, что бетоны с заявленной высокой морозостойкостью зачастую демонстрируют преждевременные разрушения

даже в конструкциях, где срок службы ещё не истёк. На сегодняшний день отсутствует единая стандартная методика установления требуемой морозостойкости, что приводит к противоречивым нормативным положениям — одинаковые условия эксплуатации могут регулироваться разнообразными нормативными документами с различными предъявляемыми требованиями к морозостойкости бетона.

Для назначения проектной морозостойкости $M_{рз}^H$ можно воспользоваться формулой [4, 6, 8, 11]:

$$M_{рз}^H = \Gamma \cdot H \cdot D \cdot Z \quad (3)$$

где Γ — нормативный срок службы сооружения, годы; H — нормативное (расчетное) число циклов в год; D — коэффициент суровости условий эксплуатации сооружения; Z — коэффициент условий работы бетона.

Несмотря на то, что формула (3) не гарантирует полной точности и правовой обоснованности, она позволяет учитывать ключевые параметры, влияющие на число циклов заморозки и оттаивания бетонных сооружений при эксплуатации, а также их способность восстанавливать характеристики в процессе использования. Полученные на её основе расчетные данные указывают на необходимость увеличения нормативного значения морозостойкости по сравнению с текущими принятыми нормами во многих случаях.

Прежде чем выбирать состав бетона, соответствующий заданной морозостойкости, требуется оценить реальность достижения этой характеристики. Такую оценку можно выполнить с использованием соотношения $M_{рз} = f(K_{мрз})$ [4, 5], позволяющего вычислить необходимое значение $K_{мрз}$ на основе нормируемого показателя морозостойкости. Полученное таким образом значение $K_{мрз}$ сравнение производится с результатом, полученным по формуле (2), в которой параметры $\Pi_{у.з}$ и $\Pi_{и}$ определяются аналитически. Обнаружение несоответствий указывает на невозможность обеспечения требуемой морозостойкости при заданных условиях имеющихся материалах и принятой технологии, на данном этапе следует скорректировать состав бетона и методы его изготовления. Дальнейший расчёт состава возможен по формуле (4). Нижний предел расхода цемента $\rho_{мин}$, обеспечивающий нормативный уровень морозостойкости $M_{рз}^H$, рассчитываем по формуле (3).

$$\rho_{мин} = K_{мрз} [B + (1 - \delta) 1000] / [\alpha (0,27 K_{мрз} + 0,46)]. \quad (4)$$

Процесс установления состава бетона стартует с обозначением наибольшего допустимого водосмешного отношения, отвечающего заданному уровню морозостойкости $M_{рз}^H$, по формуле (3): $B/\rho = 0,456\alpha/K_{мрз} + 0,27/\alpha$, полученное значение сравнивают с максимальным допустимым соотношением B/ρ , которое гарантирует требуемую марку прочности бетона. Используют меньшее из двух вычисленных значений — именно оно применяется при B последующих расчётах. Следом проводится подбор состава с учётом влияния раздвижки зерен песка под воздействием цементного теста на удобоукладываемость [4, 8].

Далее производится подготовка бетонной смеси. По результатам расчётов, выполненных при проектировании составов высокопроизводительных долговечных бетонов, установлено, что достижение необходимого уровня морозостойкости возможно лишь при соблюдении определённых условий. недостижимо лишь за счёт грамотного подбора компонентов — требуется применение дополнительных технологических методов. Эти методы должны одновременно улучшать как морозоустойчивость, так и водонепроницаемость материала.

На основе приведённых выводов автор предлагает ряд подходов для усиления указанных характеристик бетона.

Одним из ключевых подходов к улучшению эксплуатационных свойств бетона является включение в его состав специализированных многофункциональных добавок, повышающие морозостойкость и водоотталкивающие свойства [3, 5, 12]. Среди современных многофункциональных добавок выделяется состав «МИКС» (ТУ 5743-005-8373815-07), позволяющий получать бетоны с высокой прочностью — проявляющейся уже на начальных стадиях твердения — а также обладающими длительным сроком службы. Примесь обеспечивает высокую удобоукладываемость бетонной смеси, включает вещества, активирующие образование

кристаллических центров, что способствует опережающему развитию пластической прочности даже при умеренных температурах, а также включает элементы, рассеивающие энергию и препятствующие появлению микротрещин во время затвердевания. Благодаря комплексному действию этих элементов достигается значительное сокращение либо полная отмена необходимости в тепловом уходе за бетоном в период твердения. Методика создания бетонов по предложенному автором подходу в условиях щадящего теплового режима [6, 13] направлена на ослабление интенсивности тепло- и массопереноса, а также на снижение уровня термических и деформационных напряжений, обусловленных незавершённой капиллярной усадкой. С течением времени затвердевания бетона его прочностные характеристики повышаются постепенно, особенно при применении мягких технологических режимов, которые минимизируют интенсивность тепловыделения. Это предотвращает возникновение температурных напряжений, кристаллизационного давления формирующихся новообразований, а также микродефектов — зон локализации напряжений и очагов начала образования трещин. Дополнительно указанная технология обеспечивает экономию цемента до 20%, что даёт значительную финансовую выгоду и одновременно способствует снижению пористости материала. Снижение пористости повышает такие показатели, как устойчивость к циклическому увлажнению и высушиванию, водонепроницаемость, водоустойчивость и морозостойкость бетона [8, 15].

Одним из главных факторов продления эксплуатационного срока сооружений выступает грамотное применение технологий изготовления деталей и конструкций. Повышению устойчивости сборных и монолитных бетонных и железобетонных элементов к воздействию жидких агрессивных сред способствует реализация соответствующих инженерных решений используется современный способ защиты, основанный на использовании передовых герметиков. Подход предусматривает многослойную защиту — формирование на поверхности конструкций стойкого слоя из минеральных композитов с последующей глубокой пропиткой. На базе минерального сырья разработан специальный состав под маркой «Герсмесь», отличающийся высокой эффективностью, надёжностью и долговечностью в условиях эксплуатации. Продукт функционирует даже при низких температурах благодаря совмещению с противоморозными примесями. Материал демонстрирует отличную сцепляемость с бетонным основанием, имеет уровень гидроизоляции не менее класса W 50 и способен выдерживать механические напряжения до 40 МПа.

Для продления эксплуатационного срока крупногабаритных монолитных элементов сложной конфигурации, возведённых непосредственно на стройплощадке, рекомендуется применение особых методик подготовки, укладки, уплотнения и обеспечения условий твердения бетона. Например, применяется методика создания барьерных ограждений на автодорогах.

Дальнейшим шагом повышения надёжности бетонов является проверка соответствия их характеристик техническому заданию. Оценка водонепроницаемости бетона не представляет сложностей и занимает обычно от 7 до 10 суток. Тем не менее наблюдаются ситуации, когда бетонные элементы, показавшие в лаборатории водонепроницаемость W 8–10, теряют её уже под более низким гидростатическим давлением. Согласно автору, такая разница обусловлена расхождением между условиями тестирования по нормативному документу ГОСТ 12730.5–84 и реальными эксплуатационными нагрузками, включая динамические факторы, например, колебания и вибрации. Под действием таких внешних влияний физико-механические параметры воды изменяются — её вязкость снижается, что позволяет жидкости проникать через микроскопические поры и капиллярные каналы, ранее считавшиеся герметичными.

Определение морозостойкости бетонов представляет наибольшие трудности. Традиционные методики, установленные ГОСТ 10060–95, предполагают длительное время ожидания — получение результатов возможно только через несколько месяцев после изготовления бетона (при использовании традиционного подхода) или требует наличия в лаборатории дорогого охладительного оборудования. Это порождает сложности с оперативным контролем качества данного показателя; если выявляется несоответствие проектным требованиям, оперативно скорректировать состав или устранить дефекты уже невозможно.

Оценка морозостойкости затвердевшего бетона с использованием ускоренного метода на основе критерия $K_{\text{мрз}}$ обеспечивает высокую согласованность результатов с данными, полученными по стандартному методу ГОСТ (коэффициент корреляции — от 85 до 98%).

Разработанная специалистами МИИТа технология позволяет эффективно прогнозировать морозостойчивость как обычных бетонов, так и модифицированных составов, в условиях замораживания до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, что соответствует полной кристаллизации воды в порах материала [4, 6, 7].

Финальным элементом обеспечения повышенной стойкости бетона является грамотный уход за конструкцией на этапе эксплуатации. По данным исследований [2, 4, 7], повторное вакуумирование после определённого числа циклов замораживания и оттаивания способно значительно увеличить морозостойкость материала — в несколько раз.

Испытательные образцы размером $10\times 10\times 10$ см изготовили из бетонной смеси с пропорцией компонентов — цемент : песок : щебень = 1 : 2,5 : 3, при водоплennom отношении 0,55 [8].

Результаты эксперимента свидетельствуют, что эффективность вакуумирования и частота проведения процедур зависят от исходной морозостойкости бетона. Наилучшие результаты достигаются при продолжительности обработки от 0,25 до 1 часа и снижении давления до уровня 0,01 МПа [8]. Применение такого метода обслуживания существенно повышает устойчивость бетона к морозным воздействиям и продлевает срок службы дорожных и инженерных сооружений.

Выводы

Предложенные подходы и технологии увеличения срока службы бетонов обеспечивают возможность создания конструкций и сооружений, способных функционировать заявленное время без необходимости ремонта и восстановления при сравнительно небольших затратах на техническое обслуживание. Однако важно подчеркнуть, что значительное повышение долговечности возможно лишь при полном соблюдении всех предусмотренных этапов — от определения проектных характеристик бетона, включая грамотный отбор сырьевых компонентов, точное определение состава смеси в соответствии с требуемыми характеристиками, соблюдение точной технологии приготовления, укладки и уплотнения бетона, а также обеспечение необходимого ухода за бетоном на стадиях активного твердения и дальнейшего использования.

Рецензент: Хасанзода Н.М. — д.т.н., и.о. профессора кафедры «Основания, фундаменты и подземные сооружения» ПЭИУ им. акад. М.С.Осими.

Литература

1. Шестоперов С.В. Долговечность бетонов. / Шестоперов С.В. // М.: Автотрансиздат, 1976. 267 с.
2. Акрамов А.А. Морозостойкость цементно-воластонитовых бетонов / Шарифов А., Акрамов А.А., Хокиев М.К., Умаров У.Х. // Вестник Таджикского технического университета, серия 4(16), Душанбе: «Шинос», 2011. – С.49 – 52.
3. Акрамов А.А. Эффекты микронаполняющих минеральных добавок в бетоне / Шарифов А., Акрамов А.А., Умаров У.Х., Хокиев М.К., Ахмедов М.Ф // Политехнический вестник, Серия: Инженерные исследования 1(49), Душанбе: «Шинос», 2020. – С. 150–154
4. Акрамов А.А. Эффекты суперпластификаторов в бетонной смеси / Шарифов А., Акрамов А.А., Умаров У.Х., Хокиев М.К., Ахмедов М.Ф // Политехнический вестник, Серия: Инженерные исследования 1(49), Душанбе: «Шинос», 2020. – С. 139–142
5. Акрамов А.А. Водонепроницаемость бетона с одинарными и комплексными добавками / Акрамов А.А., Назиров Я.Г., Муминов А.К. // Политехнический вестник, Серия: Инженерные исследования 1(53), Душанбе: «Шинос», 2021. – С. 107–111
6. Акрамов А.А. Оптимизация состава мелкозернистого бетона / Акрамов А.А. // Политехнический вестник, Серия: Инженерные исследования 4(56), Душанбе: «Шинос», 2021. – С. 157–162
7. Акрамов А.А. Влияние минеральных добавок на свойства цемента / Акрамов А.А. // Политехнический вестник, Серия: Инженерные исследования 1(65), Душанбе, 2024. – С. 180-183.
8. Акрамов А.А. Зависимость долговечности бетона от водонепроницаемости / Джуракулов М.Р., Акрамов А.А. // Научный журнал «Водные ресурсы, энергетика и экология» Института водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Таджикистана, Душанбе. 2023. Том 3, №3 – С. 150-156.
9. Акрамов А.А. Влияние природных и техногенных материалов для получения сульфидоферритного клинкера / Акрамов А.А., Ашуров И.Ш., Муминов И.С., Саидов Р.Р. // Политехнический вестник, Серия: Инженерные исследования 1(65), Душанбе, 2024. – С. 190-194.
10. Акрамов А.А. Зависимость процесса минералообразования в портландцементной сырьевой смеси от влияния оксида натрия / Акрамов А.А., Абдуганиев А.М., Назиров Я.Г., Муминов А.К. // Политехнический вестник, Серия: Инженерные исследования 1(65), Душанбе, 2024. – С. 250-255.

11.Акрамов А.А. Влияние термохимической активации сырьевых компонентов на процессы минералообразования и свойства цемента / Акрамов А.А. // Политехнический вестник, Серия: Инженерные исследования 4(68), Душанбе, 2024. – С. 190-195

12.Акрамов А.А. Сульфатирование высокоосновного ферритного клинкера на основе ферритного отхода / Акрамов А.А., Саидзода Дж.Х., Джуракулов М.Р. // Политехнический вестник, Серия: Инженерные исследования 1(69), Душанбе, 2025. – С. 128-132

13.Акрамов А.А. Зависимость прочности цементного камня с добавкой из волластонита от воздействия высокой температуры / Акрамов А.А., Саидзода Дж.Х., Комилзода А.Х. // Политехнический вестник, Серия: Инженерные исследования 4(72), Душанбе, 2025. – С.146-150

14.Акрамов А.А. Способы повышения долговечности бетона с введением добавок / Акрамов А.А. // Политехнический вестник, Серия: Инженерные исследования 4(72), Душанбе, 2025. – С.175-181.

15.Акрамов А.А. Влияние воздушных пор на морозостойкость бетона / Акрамов А.А. // Политехнический вестник, Серия: Инженерные исследования 4(72), Душанбе, 2025. – С.221-226

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН-СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ-INFORMATION ABOUT AUTHORS

TJ	RU	EN
Акрамов Авазҷон Абдуллоевич	Акрамов Авазжон Абдуллоевич	Akramov Avazjon Abdulloevich
Номзади илмҳои техникӣ, дотсент	Кандидат технических наук, доцент	Candidate of technical sciences, associate professor
Донишгоҳи техникӣ Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими	Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi
E-mail: akramov.avaz@mail.ru		
0000-0002-7084-9128		
TJ	RU	EN
Абдуганиев Абдумачид Мамасодиқович муаллими калон	Абдуганиев Абдумаджид Мамасодиқович Старший преподаватель	Abduganiev Abdumajid Mamasodikovich senior lecturer
Донишгоҳи техникӣ Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими	Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi
E-mail: shahboz04@mail.ru		
0009-0007-7879-6984		
TJ	RU	EN
Якубов Алиҷон Ойҳамадович	Якубов Алиджон Ойҳамадович	Yakubov Alijon Oihamadovich
Номзади илмҳои техникӣ, и.в. дотсент	Кандидат технических наук, и.о. доцента	Candidate of technical sciences, acting associate professor
Донишгоҳи техникӣ Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими	Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi
E-mail: alidzhon.yakubov@gmail.com		
0000-0002-3532-8773		