

ТЕХНОЛОГИЯ ДОЛГОВЕЧНОГО БЕТОНА ДЛЯ МОРСКИХ ПОРТОВЫХ И ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ МОРОЗНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

В. В. Малюк¹, В. Д. Малюк², С. Н. Леонович³, А. В. Колодей⁴

¹ Генеральный директор ООО «Трансстрой-Трест», e-mail: tstest@bk.ru

² К. т. н., научный директор ООО «Трансстрой-Трест», e-mail: tstest@bk.ru

³ Д. т. н., профессор, зав. кафедрой «Строительные материалы и технология строительства» УО «Белорусский национальный технический университет», Минск, Беларусь, e-mail: leonovichsn@tut.by

⁴ Инженер кафедры «Строительные материалы и технология строительства» УО «Белорусский национальный технический университет», e-mail: zhuravskaya.alin@yandex.by

Реферат

Несмотря на то, что принципиально проблема долговечности бетона для морских и транспортных сооружений в суровых климатических условиях решена, случаи преждевременного разрушения конструкций наблюдаются и в настоящее время. Результаты натурных обследований показывают, что разрушения бетона в конструкциях могут носить как локальный, так и глобальный характер. Установлено, что при соответствии свойств бетона внешним воздействиям безремонтный срок эксплуатации может составить не менее 100 лет. Примеры строительства и эксплуатации морских портовых сооружений на Сахалине являются этому подтверждением. Изучение механизмов замораживания и разрушения бетона при морозном воздействии с учетом реальных показателей качества бетона показало, что в технологии бетона есть значительные резервы, которые можно использовать для повышения долговечности бетона, не прибегая к ее усложнению. Однако в условиях строительной площадки эти резервы должным образом не реализуются в силу объективных и субъективных причин. Поэтому основная цель технологии долговечного бетона – организовать в условиях строительной площадки изготовление конструкций с показателями качества бетона, которые соответствуют проектным показателям.

Ключевые слова: морозное воздействие, технология долговечного бетона, морские портовые и транспортные сооружения, уровень критической зрелости структуры бетона, прогноз срока службы.

DURABLE CONCRETE TECHNOLOGY FOR SEAPORT AND TRANSPORT FACILITIES IN FROSTY ENVIRONMENTS

V. V. Malyuk, V. D. Malyuk, S. N. Leonovich, A. V. Kolodey

Abstract

Despite the fact that in principle the problem of durability of concrete for marine and transport structures in harsh climatic conditions has been solved, cases of premature destruction of structures are observed at the present time. The results of field surveys show that the destruction of concrete in structures can be both local and global. It is established that if the properties of concrete correspond to external influences, the maintenance-free service life can be at least 100 years. Examples of the construction and operation of seaport facilities on Sakhalin are a confirmation of this. The study of the mechanisms of freezing and destruction of concrete under frost exposure, taking into account the real indicators of the quality of concrete, showed that there are significant reserves in concrete technology that can be used to increase the durability of concrete without resorting to its complication. However, in the conditions of the construction site, these reserves are not properly realized due to objective and subjective reasons. Therefore, the main goal of durable concrete technology is to organize the manufacture of structures with concrete quality indicators that meet the design indicators in the conditions of the construction site.

Keywords: frost exposure, long-lasting concrete technology, sea port and transport facilities, the level of critical maturity of the concrete structure, service life forecast.

Введение. Состояние вопроса

Исследование показателей качества бетона в сооружениях показывает, что за счет оптимизации технологического процесса бетонных работ можно обеспечить безремонтный срок службы конструкций в зоне переменного уровня воды не менее 100 лет, используя традиционную технологию бетона. Для практики важно определить минимальный набор параметров, необходимых для контроля технологического процесса производства. Безусловно, оптимальное решение находится путем выбора определяющего критического параметра, который влияет на долговечность бетона в конкретных условиях эксплуатации, поскольку это позволит реально управлять технологией для получения долговечных конструкций [1–24].

Выполненные исследования показали, что критическим периодом для долговечности бетона является первый зимний период эксплуатации, в течение которого продолжает формироваться структура бетона. Есть основания считать, что существует уровень критической зрелости структуры бетона, который позволяет обеспечить сохранность параметров поровой структуры бетона в первый зимний период и создать условия для совершенствования ее в дальнейшем.

Критическая зрелость бетона

Даны предложения по оценке критической зрелости бетона и рассмотрены факторы, от которых зависит этот показатель. В качестве критической (эталонной) зрелости (S_{α}) целесообразно рассматривать структурные характеристики бетона, формирование

которых происходит при нормальных условиях твердения. Исходя из этого, косвенными параметрами критической зрелости структуры бетона являются основные параметры режима твердения в соответствии с действующими нормативными документами: продолжительность твердения 28 суток (T_{28}), температура среды плюс 15 °C (t_{15}) и влажность среды не менее 95 % (P_{95}), т. е. $S_{\alpha} = f(T_{28}; t_{15}; P_{95})$.

Реальная технология бетона на строительной площадке не всегда способна обеспечить нормативные параметры режима твердения, поэтому случаи преждевременного разрушения бетона следует связывать с тем, что уровень фактической зрелости структуры (S_f) не соответствует уровню критической зрелости, т. е. ($S_f < S_{\alpha}$). Уровень зрелости структуры бетона влияет на развитие процессов в период инициации и деградации. В процессе твердения бетона из трех выделенных параметров режима: (T_{28}), (t_{15}) и (P_{95}) любой может иметь определенное несоответствие. При нормативных условиях твердения показатель S_{α} можно оценить количественно, например, $S_{\alpha} = 1$. Для практики важно знать последствия этих несоответствий. Поэтому важно установить следующее:

- значимость параметров режима твердения для формирования структурных характеристик, влияющих на кинетику водонасыщения;
- граничные значения каждого параметра для водонасыщения в реальных условиях эксплуатации;
- технологические мероприятия, позволяющие снизить чувствительность морозостойкости бетона к параметрам режима твердения.

Прогноз срока службы

Проведенные исследования показывают, что модели прогноза срока службы конструкций в условиях морозного воздействия должны строиться исходя из того, что процесс коррозии бетона в этих условиях имеет две характерные стадии, которые имеют также характерные этапы. Организация технологии бетонных работ должна строиться исходя из поставленной цели. В одном случае целью может являться получение долговечного бетона, в другом – получение бетона с требуемыми эксплуатационными показателями в нормируемый срок конструкции.

Срок службы долговечного бетона определяется условием $S_{ACT} < S_{CR}$. Проведенные исследования показывают, что долговечные бетоны со сроком службы более 100 лет реально получить в условиях строительной площадки. Определяющим требованием при этом является создание структурных параметров бетона, которые соответствуют условиям эксплуатации, т. е. способны обеспечить условие $S_{ACT} < S_{CR}$ в первый зимний период, т. е. на этапе ($T_{ИН}^1$). Поэтому выбор технологических решений для изготовления долговечных конструкций должен быть основан на гарантированном обеспечении условия $S_{ACT} < S_{CR}$ в первый зимний сезон. Исходя из сложности ремонта поврежденных конструкций портовых и транспортных сооружений, проектирование бетона и технология бетона должны учитывать эту особенность. Поэтому есть все основания принимать решения по проектированию состава бетона и назначению технологических режимов изготовления конструкций на основании получения долговечного бетона.

Принципы совершенствования бетонных работ

Практический интерес для технологии бетона представляют факторы, позволяющие за счет качественных показателей бетона обеспечить на первом этапе ($T_{ИН}^1$) условие $S_{ACT} < S_{CR}$. В связи с этим принципы совершенствования технологии бетонных работ должны быть основаны на возможности снижения чувствительности структуры бетона к морозному воздействию на этапе $T_{ИН}^1$. Для этого необходимо знать закономерность кинетики водонасыщения бетона от морозного воздействия на этапе $T_{ИН}^1$. Анализ многочисленных литературных данных показывает, что вопрос развития процессов коррозии на пе $T_{ИН}^1$ наименее исследован в проблеме морозостойкости бетона. Как правило, коррозия бетона исследуется в период деградации или на бетонах, условия твердения которых были нормальные.

Лабораторный подбор составов бетона можно отнести к первому этапу технологии бетонных работ, поскольку рабочий состав бетона, принятый на основании лабораторных подборов, в дальнейшем используется для отработки технологических режимов. Результаты проведенных исследований показывают, что в лабораторных условиях, применяя предписывающий принцип проектирования долговечности бетона, можно получить бетон с маркой по морозостойкости F_21000 и выше. Однако необходимо иметь в виду, что повышение требований к показателям качества усложняет технологию на строительной площадке. Поэтому важно принять обоснованное сбалансированное техническое решение на этапе строительства и эксплуатации сооружения.

Роль воздуховлечения на морозостойкость бетона

Установлено, что за счет применения воздуховлекающих добавок ВВД в бетоне можно существенно увеличить стадию инициации. Считают, что ВВД снижают чувствительность бетона к морозному воздействию за счет возможности перераспределения влаги из полностью насыщенных капиллярных пор в условно замкнутые воздушные поры.

Имеются результаты исследований, которые свидетельствуют о важной роли воздуховлечения на морозостойкость бетона при стандартных испытаниях, т. е. когда обеспечена критическая зрелость структуры бетона (S_{cr}). Установлен факт, что с увеличением в бетоне воздуховлечения может наблюдаться увеличение морозостойкости бетона. Это дает основание считать, что в реальных условиях такая же тенденция будет проявляться для долговечности бетона. Имеются немногочисленные исследования, которые показывают, что ВВД позволяют снижать чувствительность бетона к морозному воздействию на ранних сроках твердения, т. е. когда $S_f < S_{cr}$. Например, считают, что за счет ВВД можно сократить срок выдерживания бетона до воздействия мороза после пропаривания. Следовательно, воздуховлечение может положительно влиять на процессы формирования структуры бетона на этапе $T_{ИН}^1$. Это дает основание рассматривать возможность применение ВВД для снижения

требований к критической зрелости бетона при морозном воздействии, когда преобладающим видом воздействия являются циклы замораживания-оттаивания. Поэтому важно оценить роль воздуховлечения на процессы водонасыщения пор на этапе $T_{ИН}^1$. Значимость влияния воздуховлечения для этапов $T_{ИН}^1$ и $T_{ИН}^2$ может быть различной. Результаты исследований показывают, что роль ВВД может зависеть от механизма замораживания бетона.

Для рассматриваемого случая, т. е. при $S_{ACT} = f(t_f, N_{FT})$, наиболее изучен вопрос влияния воздуховлечения для этапа $T_{ИН}^2$, когда бетон твердел в нормальных условиях. Предполагая, что морозостойкость бетона косвенно характеризует процессы его водонасыщения при многократных циклах ПЗО, очевидно, можно прогнозировать по морозостойкости кинетику водонасыщения пор бетона с воздуховлекающими добавками.

В условиях строительной площадки часто возникают вопросы по обеспечению нормативных требований по воздуховлечению бетонной смеси. Как уже отмечалось, основная проблема заключается в том, что вовлеченный воздух не дозируется непосредственно в бетонную смесь как остальные составляющие, а является производной от многих факторов, которые в условиях строительной площадки трудно учитывать. Многофакторность зависимости морозостойкости не позволяет установить четкой количественной связи между морозостойкостью и воздуховлечением, поскольку эффект повышения морозостойкости также зависит от других факторов: В/Ц, минералогического состава цемента, качественных показателей мелкого и крупного заполнителей и др., которые влияют на формирование параметров порового пространства. Недостаточная изученность роли искусственного воздуховлечения для морозостойкости бетона проявляется в том, что нормативные требования к воздуховлечению существенно различаются. Например, для бортовых камней диапазон воздуховлечения установлен от 4 до 5 %, для дорожных и аэродромных покрытий – от 5 до 7 %. При эксплуатации конструкций в морской воде величина воздуховлечения нормируется в зависимости от размера крупного заполнителя и В/Ц бетонной смеси и имеет однозначную величину без каких-либо отклонений. Например, при В/Ц = (0,41 – 0,50) и наибольшем размере крупного заполнителя 20 мм воздуховлечение должно быть 4 %.

Данный подход к нормированию воздуховлечения ставит перед производителями бетонной смеси сложную задачу, когда заказчик устанавливает требования к параметрам воздуховлечения при доставке бетонной смеси на удаленные строительные объекты.

Морозостойкость бетона в основном зависит от обеспеченности нижнего предела искусственного воздуховлечения. Оптимальное значение содержания воздуха определяют в 4,0 %, но минимальное значение, которое обеспечивает морозостойкость, может быть 1,5–2,0 %.

Сценарии на строительной площадке

На строительной площадке ситуация может развиваться по двум сценариям:

Сценарий 1 – показатели качества бетонной смеси в момент укладки в конструкцию не соответствуют заявленным требованиям. В частности, если номинальное значение воздуховлечения не обеспечены, следует предполагать, что не будут обеспечены требования по морозостойкости бетона. В дальнейшем это может негативно отразиться на долговечности и сроке службы конструкции.

Сценарий 2 – смесь при несоответствии качественных показателей не допускается к укладке в конструкцию, т. е. смесь будет забракована. В этом случае у поставщика продукции возникает проблема с реализацией или утилизацией некачественной продукции. Этот сценарий в отечественной практике рассматривается очень редко, но опыт строительства инфраструктуры на нефтегазовых шельфовых объектах Сахалина показал, что это вполне реальный случай. Для устройства дорожного покрытия на морском причале завода сжиженного природного газа (СПГ) в п. Пригородное (о. Сахалин) для подярдчика были установлены требования к показателям качества бетонной смеси на строительной площадке: воздуховлечение- 4 ± 1 % абс.; подвижность – марка ПЗ (ОК 10–15 см).

Входной контроль на объекте предусматривал приемку каждого автобетоносмесителя.

Материалы экспериментального исследования

Проектные требования к бетонной смеси: БСТ В35 ПЗ F200 W6 ГОСТ 7473-2010. Номинальный состав бетона по результатам лабораторного подбора был принят следующий:

цемент (Спасский, ПЦ-500 ДОН) – 500 кг/м³;
 песок (кварцевый, Мкр 2,5) – 710 кг/м³;
 щебень (амфиболит, фракция 5-20 мм, Мдр-1200) – 1140 кг/м³;
 добавки: ПФМ-НЛК (ТУ 5745-022-58042865-2007) – 0,5 % сухого вещества от массы цемента;
 СНВ (ТУ 14-00281074-75-98) – 0,01 % сухого вещества от массы цемента.

Водоцементное отношение (В/Ц) составляло 0,35.
 Добавка (ПФМ-НЛК) – полифункциональный модификатор бетона, относится к классу сильнопластифицирующих добавок, повышающих показатели долговечности бетона – морозостойкость, водонепроницаемость и коррозионную стойкость. Одним из физико-химических показателей добавки является повышение воздуховождения.

Добавка СНВ (смола нейтрализованная воздуховлекающая) – относится к воздухововлекающим добавкам. Высокая эффективность действия добавки СНВ проявляется при использовании в комплексе с пластифицирующими и суперпластифицирующими добавками.

В лабораторных условиях в процессе подбора состава бетона было установлено, что максимальное воздуховлечение с добавкой (ПФМ-НЛК) составляет 4 %, которое может снижаться до 2 % в течение 60 минут. Показатели качества бетонной смеси и бетона определяли стандартными методами.

Производственные испытания показали, что с помощью добавки (ПФМ-НЛК) нельзя обеспечить требуемые показатели по воздуховлечению при длительной транспортировке смеси. В течение 120 минут транспортировки происходило снижение воздуховлечения на 2–3 % абс. и на месте укладки оно могло быть в пределах 1,5–2,5 %, что не соответствовало требованиям заказчика. С целью обеспечения требуемого воздуховлечения специалисты ООО «Трансстрой-Тест» предложили применить комплексную добавку СНВ + (ПФМ-НЛК), что позволило за счет дозирования добавки СНВ получать необходимое воздуховлечение на выходе из бетоносмесителя. Опыт показал, что регулировать воздуховлечение добавкой (ПФМ-НЛК) за счет дозирования и увеличения продолжительности перемешивания неэффективно, поскольку отсутствует тесная корреляционная связь между воздуховлечением (далее – ВВ) и продолжительностью перемешивания.



Рисунок 1 – Процесс подготовки (а) и испытание (б) бетонной смеси на объекте

На объекте и на бетоносмесительном узле (БСУ) было проведено по 40 контрольных испытаний, что позволило объективно оценить качественные показатели бетона и бетонной смеси.

Таблица 1 – Сравнительные показатели качества бетонной смеси и бетона на БСУ и объекте

Статистические показатели	Технологические показатели бетонной смеси				Прочность при сжатии бетона, МПа	
	БСУ		Объект		БСУ	Объект
	ОК, см	ВВ, %	ОК, см	ВВ, %		
Среднее значение	22,8	6,1	8,7	4,2	42,7	42,1
Коэффициент вариации	5,4	9,2	17,0	16,9	12,7	15,4

Примечание – прочность бетона определена на образцах, твердевших в нормальных условиях.

Испытания проводились параллельно на заводе и строительной площадке. Результаты испытаний бетонной смеси и бетона, приведенные в таблице 1, показывают, что при транспортировании бетонной смеси в течение 100–150 минут подвижность бетонной смеси по ОК с 23 см снижалась до 9 см. При этом существенно снижается стабильность подвижности. В связи с этим было принято решение применять двухэтапное дозирование добавки ПФМ-НЛК. Основная часть добавки СНВ + (ПФМ-НЛК) вводилась в процессе приготовления бетонной смеси на БСУ, а часть добавки (ПФМ-НЛК) вводилась на объекте после проверки подвижности и содержания воздуха. После введения добавки бетонной смеси перемешивалась в автобетоносмесителе в течение 5 минут, а затем повторно проводилась проверка воздуховлечения и подвижности. Это позволило обеспечить требуемую марку подвижности ПЗ – среднее значение подвижности смеси поднялось с 9 до 11 см, и повысить однородность подвижности – коэффициент вариации снизился с 17 до 14 %. Фактически осуществлялось ручное регулирование технологического процесса. Однако это позволило на 100 % обеспечить требуемую марку подвижности ПЗ.

Воздуховлечение бетонной смеси за период перевозки изменялось незначительно и соответствовало требуемым параметрам. Минимальное требуемое значение искусственного воздуха 3 % на объекте обеспечивалось на 100 % при среднем значении 4,2 % и коэффициенте вариации 16,9 % (таблица 1). Стабильность воздуховлечения смеси на БСУ завода более высокая – коэффициент вариации составил 9,2 % против 16,9 % на объекте. Испытания бетонной смеси показали, что применение комплексной добавки СНВ + (ПФМ-НЛК) позволяет надежно обеспечить минимальное содержание воздуха 3 %.

Вопрос о необходимости жесткого ограничения воздуховлечения в настоящее время остается открытым. Отмечают, что для придания высокой морозостойкости может быть достаточно 1,5 % воздуха. Эффективность воздуховлечения зависит как от количества вовлеченного воздуха, так и от его качества. Следует отметить, что после виброуплотнения содержание воздуха в бетонной смеси в конструкции может меняться как в большую, так и в меньшую сторону, поскольку на объекте этот процесс не контролируется. Отсутствие оперативных методов оценки воздуховлечения в конструкциях не позволяет надежно оценивать соответствие качества бетона в конструкции по содержанию воздуха.

Установлено, что высокая морозостойкость может обеспечиваться при воздуховлечении в диапазоне от 2 до 11 %. В этом диапазоне нет проблем обеспечения нормативной морозостойкости, однако это может существенно влиять на прочностные показатели бетона. А. М. Невилль приводит данные о том, что общая потеря прочности на сжатие может составлять 3–6 % на каждый процент содержания воздуха. Высокая неоднородность по воздуховлечению рассматривается в качестве одной из причин высокой неоднородности бетона по прочности при использовании воздухововлекающих добавок.

В нашем случае отмечена более высокая неоднородность прочности бетона на объекте (см. таблицу 1). При равной средней прочности бетона на объекте отмечена более высокая неоднородность прочности: класс В35 при коэффициенте вариации 15,4 % и средней прочности 42,1 МПа обеспечен лишь на 86 %. Следовательно, у заказчика возникает вопрос о соответствии бетона требуемым показателям качества. Как видно, подрядчику приходится решать много вопросов по оценке качественных показателей и оценке соответствия бетонной смеси и бетона.

Анализ результатов экспериментальных исследований

Результаты проведенной работы показывают, что при значительной удаленности объекта от производственных баз обеспечить технологические показатели бетонной смеси можно при высоком уровне лабораторного и строительного контроля. Практика показывает, что применение комплексной добавки СНВ + ПФМ-НЛК позволяют надежно обеспечивать требования по ВВ. Несмотря на технологичность применения полифункциональных добавок, надежное регулирование ВВ и обеспечение нормативных требований по ВВ возможно за счет применения комплексных добавок ПАВ. Отсутствие практических расчетных методов, основанных на зависимости морозостойкости бетона от воздухоовлечения, не позволяет принимать оптимальные экономические решения по составам и технологии бетона. Это предопределяет необходимость дальнейшего изучения стойкости бетона от морозных воздействий с воздухоовлекающими добавками с учетом опыта строительства и эксплуатации сооружений в конкретных природно-климатических условиях.

Следует отметить, многообразие предлагаемых добавок часто ставит перед строителями вопрос о критериях выбора. На практике применение новых добавок часто основано не на эффективности их действия, а на ценовой составляющей добавки. Профессионально на этот вопрос можно ответить только после лабораторных сравнительных испытаний, которые в настоящее время отличаются сложностью и большой продолжительностью. В связи с этим актуальным является вопрос разработки простых методов и приборов для оценки соответствия бетонной смеси и бетона в конструкциях.

Исследование морозостойкости бетона с различными добавками, выполненные для оптимизации режимов технологии бетона для конкретного объекта, позволили установить возможность получения нормативной морозостойкости F_{200} при различном содержании воздуха в бетоне. Результаты исследований дают основания судить о кинетике водонасыщения бетона с воздухоовлечением. Оптимальным вариантом для производства является вариант применения бетонной смеси с минимальным содержанием воздуха, поскольку это связано с прочностными показателями бетона. Сочетание воздухоовлекающих гидрофобизирующих ПАВ типа СНВ с пластифицирующими гидрофилизующими добавками типа СДБ обеспечивает более стабильное, менее подверженное влиянию изменяющихся технологических факторов повышение морозостойкости.

Результаты сравнительных стандартных испытаний на морозостойкость позволяют в определенной степени прогнозировать влияние воздухоовлечения на долговечность бетона в конструкциях. Однако оптимизация технологии бетона должна строиться на основе реальной работы конструкций в сооружении с учетом механизма замораживания бетона. Пример эксплуатации сооружения К1 показывает, что обычные бетоны могут обеспечивать срок службы не менее 100 лет. Исходя из этого, срок службы бетона с воздухоовлекающими добавками должен быть значительно больше, т. е. это срок с практической точки зрения можно принять как бесконечный. Опыт эксплуатации на Сахалине портовых сооружений показывает, что конструкции из бетона с воздухоовлекающими добавками имеют срок службы не менее 50 лет. Поэтому возникает вопрос о назначении рациональной величины воздухоовлечения с учетом реальных условий эксплуатации и нормируемого срока службы сооружения.

Факторы, влияющие на период инициации

Как отмечалось выше, продолжительность периода инициации определяется качеством структуры бетона, которая формируется на двух этапах. Период $(0 - T_1)$ представляет первый из двух этапов периода инициации, который должен характеризовать способность пор бетона к водонасыщению в период $T_{1\text{ин}}$. Результаты выполненных исследований дают основания полагать, что эта способность определяется двумя факторами: уровнем начальной зрелости структуры бетона и условиями морозного воздействия, при этом второй фактор может быть решающим в условиях, когда $S_\alpha < 1$. Пример эксплуатации конструкций оградительного сооружения КЗ-1 показывает, что при $S_\alpha < 1$ в зоне действия прилива, даже при оттаивании в морской воде, температура которой в зимний период находится в пределах $+1^\circ\text{C} \dots -2^\circ\text{C}$, условия могут быть благоприятными для последующей гидратации

цемента. Как отмечено ранее, при замораживании бетона на воздухе может происходить осушение пор бетона, т. е. приводить к снижению водонасыщения пор в поверхностном слое. Следовательно, при морозных воздействиях на бетон в зоне переменного уровня воды, когда преобладающими факторами являются t_f и N_{Ft} , реально существуют благоприятные условия для дальнейшего формирования структуры при зрелости структуры ниже критической. Исследования показывают, что в условиях эксплуатации морских портовых сооружений высокая стойкость бетона к морозному воздействию может обеспечиваться методами традиционной технологии бетона без применения современных методов, основанных на применении воздухоовлекающих добавок.

Особенности морозной деструкции транспортных сооружений

Результаты исследований бетона транспортных сооружений при работе в условиях применения ПГМ показывают, что бетон в зимний период подвержен более суровым морозным нагрузкам, чем бетон конструкций портовых сооружений. При этом составляющими морозной нагрузки, которые определяют ее значения, являются температура воздуха в районе строительства и число циклов ПЗО при этой температуре замораживания, т. е. бетон подвержен действию нагрузки вида $R_{F1} = f(t_f, N_{Ft})$. Высокая суровость воздействий определяется и тем, что замораживание бетона может происходить в растворе солей, а не на воздухе, как это имеет место в зоне отлива-прилива портовых сооружений. Результаты исследований показывают, что стандартные испытания бетона на морозостойкость методом ускоренных испытаний при замораживании образцов в соляном растворе до температуры -50°C в наибольшей степени эмитируют реальную работу бетона в конструкциях транспортных сооружений. Поэтому технология бетонных работ и методы прогнозирования бетона для этих условий должны отрабатываться с учетом испытаний на морозостойкость по этой методике стандартных испытаний.

Результаты проведенных исследований дают основания считать, что при механизме замораживания бетона, в котором преобладающими факторами являются температура замораживания бетона (t_f) и длительность (T_f), т. е. при нагрузке вида R_{F2} , преобладающий механизм разрушения бетона обусловлен процессами влагопереноса внутри бетона. Характер и вид разрушений бетона в конструкциях подтверждает это. Поэтому требования к технологии бетона для обеспечения долговечности при морозной нагрузке вида R_{F2} в сочетании с обледенением должны учитывать работу механизма разрушения от этой нагрузки. Особенность эксплуатации конструкций в условиях длительного обледенения принципиально меняет механизм замораживания бетона и механизм водонасыщения пор. Формирование структура бетона в условиях длительного замораживания, исходя из теории структурообразования и гипотез механизмов разрушения бетона при воздействии мороза, связаны с процессами тепло- и влагообмена. За счет этих процессов, очевидно, возможно перераспределение влаги и насыщение пор бетона в определенных слоях бетона до критической степени. Данный процесс не моделируется при стандартных испытаниях, т. к. образцы представляют замкнутую систему, в которой практически исключаются процессы тепло- и влагообмена, характерные для массивных конструкций. Есть основания полагать, что разрушение бетона в конструкциях сооружений КЗ-1 и КЗ-2 обусловлено этими процессами. Поэтому для исключения разрушений бетона должны разрабатываться технологические приемы, позволяющие снизить чувствительность бетона к этим условиям эксплуатации, т. е. ограничить процессы влагопереноса на этапе $T_{1\text{ин}}$. Классический прием в технологии бетона, исключаящий разрушение бетона при различных механизмах замораживания, это организация технологии бетона в соответствии с регламентами, действующих нормативных документов. Как было отмечено выше, на строительной площадке основные проблемы возникают на переледе обеспечения нормативных требований к условиям твердения, т. е. к созданию условий для формирования критической зрелости структуры. Для случая, когда в условиях обледенения водонасыщение пор определяется зависимостью $S_{ACT} = f(t_f, T_f)$, на этапе $T_{1\text{ин}}$ отсутствуют благоприятные внешние условия для снижения водонасыщения пор при замораживании, которые возникают при замораживании бетона на воздухе.

Целесообразные технологические приёмы

Целесообразно использовать технологические приемы, за счет которых можно интенсифицировать процессы гидратации цемента в условиях, когда водонасыщения определяется зависимостью $S_{ACT} = f(t_F, T_F)$, а уровень фактической зрелости структуры бетона (S_t) ниже уровня критической зрелости, т. е. ($S_t < S_{cr}$). Опыт эксплуатации портовых сооружений показывает, что глобальные разрушения бетона могут быть после первого зимнего периода, несмотря на организацию бетонных работ, в соответствии с требованиями действующих нормативных документов. Характер разрушения бетона в конструкциях дает основание считать, что это происходит по следующим причинам:

- не обеспечены условия для формирования критической зрелости структуры бетона;
- применяли бетонную смесь с повышенной подвижностью.

Эти причины являются преобладающими в перечне других, которые влияют на стойкость бетона в условиях морозного воздействия. Безусловно, эти причины являются устранимыми при организации бетонных работ в соответствии с установленными правилами. Однако, поскольку эти причины являются характерными для строительной площадки, целесообразно устранение этих причин осуществлять на основе совершенствования технологии бетона.

Исходя из положений структурной теории бетона и влияния добавок разных классов на формирование структуры цементного камня в бетоне, имеет смысл для совершенствования технологии исследовать влияние комплексных добавок электролитов и ПАВ на долговечность бетона в зоне переменного уровня, когда преобладающим факторами морозного воздействия является температура (t_F) и длительность (N_{FT}) замораживания бетона. Полагают, что введение добавок электролитов приводит к увеличению микропористости цементного камня и понижает содержание льда в том же направлении, что и снижение В/Ц в бетоне. Введение добавок электролитов, остающихся в заметных количествах в поровой жидкости цементного камня, уменьшает коэффициент объемного расширения воды, изменяет температуру кристаллизации льда, ухудшает структурно-механические характеристики (прочность и чешуйчатость) льда. В результате в бетоне не происходит заметных деструктивных явлений, отражающихся на его прочности. Данный подход к повышению морозостойкости бетона практического применения пока не нашел.

Есть основание считать, что технологический прием, позволяющий обеспечить достаточное содержание в цементном камне резервных пор при одновременной минимизации объема капиллярных пор и длительное сохранение в жидкой фазе введенных веществ, может существенно повысить долговечность и обеспеченность стойкости бетона в зоне переменного уровня воды. Малая изученность этого вопроса дает основание считать, что исследования в данном направлении являются перспективными и могут найти широкое практическое применение.

Срок службы бетона может оцениваться по долговечности и работоспособности. В данной работе исследованы факторы, определяющие срок службы бетона 100 лет и более, не затрагивая работу бетона при снижении нормативных показателей бетона по прочности.

Выводы

1. В настоящее время проектирование бетона по предписываемому принципу решает проблему долговечности бетона в агрессивных средах класса XF 4. Случаи разрушения новых конструкций в зоне переменного уровня после первого зимнего сезона, т. е. через 3...4 месяца эксплуатации, необходимо связывать не с методами проектирования бетона, а с применением в условиях строительной площадки технологии бетонных работ, не позволяющей обеспечить нормируемые требования к бетону. Поэтому решение проблемы долговечности портовых сооружений на основе повышения морозостойкости и усложнения технологии бетона не всегда являются экономически целесообразными. На данном этапе проблема долговечности бетона морских портовых и транспортных сооружений заключается не в получении бетонов высокой морозостойкости, а в технологии, позволяющей надежно обеспечивать нормируемые показателями бетона по долговечности в конструкциях. В настоящее время случаи пре-

временного разрушения конструкций связаны в основном с нарушением Правил ухода за твердением бетона. В результате не обеспечиваются условия для формирования поровой структуры с параметрами, необходимыми для морозостойкого бетона. Это связано как субъективными, так и объективными причинами. В условиях строительной площадки не всегда можно на раннем этапе обеспечить нормируемые условия твердения. Однако и для заводского изготовления конструкций наблюдаются это несоответствие. В последнее время стремление максимально сократить сроки строительства приводит к нарушению требований к условиям твердения бетона в конструкциях. Это является основной причиной снижения реального срока службы конструкций. Наблюдаются не только деградационные отказы, которые характеризуются длительностью процесса разрушения, происходят внезапные отказы, для которых характерно разрушение после первого зимнего сезона. В последнем случае наблюдаются глобальные разрушения бетона в конструкциях.

Характер и вид разрушений бетона в конструкциях дает основание считать, что преобладающими причинами разрушения бетона в условиях морозного воздействия являются следующие:

- условия твердения бетона в начальный период формирования структуры бетона не соответствует нормируемым;
 - применяются бетонные смеси с повышенной подвижностью, а следовательно, с высоким водосодержанием.
2. Гипотеза, принятая для исследований, в основе которой процесс коррозии бетона при морозном воздействии рассматривается как двухстадийный, подтверждается результатами как лабораторных, так и натуральных исследований, основанных на обследовании сооружений со сроком службы от 1 года до 100 лет. Двухстадийная модель коррозии предполагает наличие стадии инициации и деградации, поэтому срок службы следует рассматривать как интегральную характеристику, которая включает период инициации и деградации. Стадия инициации характеризует период, в течение которого показатели качества бетона должны повышаться в соответствии с положениями структурной теории цементных бетонов. Исходя из предложенной концепции прогнозирования срока службы, модели прогноза срока службы сооружений в агрессивных средах XF 4 целесообразно рассматривать из условий долговечности и работоспособности. Стадия деградации обусловлена процессами образованием микротрещин в структуре бетона и может использоваться для прогноза срока службы при проектировании по эксплуатационной пригодности конструкции. В настоящее время известные модели прогноза, предложенные G. Fagerlund, E. Vesikari, рассматривают срок службы исходя из оценки только одной стадии – стадии инициации или деградации.

3. Долговечность бетона формируется в ранний период структурообразования и определяется двумя критическими показателями: видом системы капиллярных пор и наличием свободной воды, способной к влагопереносу к зонам промерзания.

В бетоне морских портовых и транспортных сооружений эффект действия этих показателей определяется механизмом замораживания бетона. В условиях, когда преобладающим фактором в механизме замораживания являются циклы попеременного замораживания и оттаивание определяющим фактором является дискретность системы капиллярных пор. В условиях длительного замораживания с обледенением определяющим показателем является наличие свободной воды в порах бетона к моменту замораживания, поскольку механизм разрушения бетона будет обусловлен процессами влагопереноса внутри бетона. Особенность эксплуатации конструкций в условиях длительного обледенения принципиально меняет механизм замораживания бетона и механизм водонасыщения пор. Поэтому при расчете состава бетонной смеси необходимо ограничить водосодержание, т. к. этот показатель к началу морозного воздействия будет определять наличие свободной воды в бетоне, способной к миграции при градиенте температур.

В конструкциях транспортных сооружений трудно выделить преобладающий механизм замораживания бетона, поскольку в течение зимнего периода они могут действовать совместно. Характер и вид разрушений бетона в этих конструкциях дает основание считать, что может проявляться синергетический эффект от действия этих

механизмов, в результате морозная нагрузка на бетон может существенно увеличиваться по сравнению с морозной нагрузкой на бетон в морских портовых сооружениях.

4. Стойкость бетона в агрессивных средах класса XF 4 зависит от максимальной морозной нагрузки, которая возникает в результате неблагоприятного сочетания факторов ее определяющих. Агрессивная среда в виде морской воды и химических противогололедных материалов не оказывает влияние на долговечность бетона, когда процесс коррозии протекает на стадии инициации. Поэтому при проектировании составов бетона для морских сооружений основное внимание следует уделять обеспечению стойкости бетона к морозному воздействию на ранних этапах твердения бетона.
5. Совершенствование технологии бетонных работ необходимо строить исходя из того, что при первом загрузке максимальной морозной нагрузкой не допускается повреждение поровой структура бетона. Проектирование долговечности бетона по эксплуатационным характеристикам для агрессивных сред класса XF 4 целесообразно учитывать следующее:
 - преобладающий механизм замораживания бетона в конструкция;
 - максимальную морозную нагрузку на бетон в сооружении;
 - уровень структурной зрелости бетона, необходимый для максимальной морозной нагрузки.
6. Технологический прием, позволяющий обеспечить достаточное содержание в цементном камне резервных пор при одновременной минимизации объема капиллярных пор и длительное сохранение в жидкой фазе веществ, понижающих температуру льдообразования, может существенно повысить долговечность и обеспеченность стойкости бетона в зоне переменного уровня воды. Малая изученность «достаточности», т.е. оптимальности, существующих технологических приемов, свидетельствует о необходимости дальнейшего исследования в этом направлении, поскольку это является перспективными для практического применения. В частности, отсутствие практических расчетных методов, основанных на зависимости морозостойкости бетона от воздухоувлечения, не позволяет принимать оптимальные экономические решения по составам и технологии бетона.
7. Классический подход к обеспечению долговечности бетона за счет повышения морозостойкости путем применения воздуховлакающих добавок не решает одной из важных проблем для практики – обеспечение стойкости бетона в первый зимний период при недостаточной зрелости структуры бетона к началу морозного воздействия. Наиболее высокая чувствительность к зрелости структуры бетона проявляются в условиях длительного замораживания. В связи с этим совершенствование технологии бетона для повышения долговечности бетона и ее обеспеченности должно проводиться в направлении создания условий для снижения температуры льдообразования в первый зимний период, т.е. на первом этапе периода инициации. Исходя из положений структурной теории бетона и влияния добавок разных классов на формирование структуры цементного камня в бетоне, когда преобладающим факторами морозного воздействия является температура и длительность замораживания бетона, имеет смысл для совершенствования технологии бетона исследовать влияние комплексных добавок электролитов и ПАВ на долговечность бетона в зоне переменного уровня.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

Дальнейшие исследования целесообразно проводить в направлении разработки модели прогноза долговечности в соответствии с предложенной концепцией о двухстадийности процесса коррозии бетона в условиях морозного воздействия. Для получения исходных данных для разработки модели прогноза долговечности необходимо установить:

- значимость факторов, влияющих на стойкость бетона в начальный период твердения бетона при различных видах морозной нагрузки;
- количественно оценить показатель структурной зрелости бетона и определить его влияние на морозостойкость в ранние периоды твердения в зависимости от вида морозной нагрузки.

Список цитированных источников

1. Леонович, С. Н. Долговечность центрифугированных железобетонных конструкций при циклическом замораживании и оттаивании / С. Н. Леонович // Бетон и железобетон. – № 10. – 1988.
2. Леонович, С. Н. Структура и морозостойкость центрифугированного бетона с добавками / С. Н. Леонович, Ф. М. Иванов, Л. Н. Зикеев // Исследование и применение химических добавок. – М., НИИЖБ, 1988.
3. Леонович, С. Н. Неразрушающие методы контроля морозостойкости центрифугированного бетона / С. Н. Леонович, Л. Н. Зикеев // Коррозия бетона и арматуры в агрессивных средах. – М.: НИИЖБ, 1990.
4. Leonovich, S. N. The aggressive influence on the concrete and the modes to provide its corrosion resistance / S. N. Leonovich. Materials Science and Restoration : Proc. 3-rd Intern. Colloq. – Esslingen. – 1992. – Vol. 3. – P. 1443–1449.
5. Leonovich, S. N. The structure of the concrete and its durability / S. N. Leonovich, V. I. Shevchenko. Materials Science and Restoration: Proc. 3-rd Intern. Colloq. – Esslingen. – 1992. – Vol. 3. – P. 1652–1658.
6. Бетоны. Методы определения характеристики трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении : ГОСТ 29167-91. – Введ. 01.07.1992.
7. Leonovich, S. N. The influence of cyclic freezing and thawing on cracking of concrete / S. N. Leonovich // Durability and service life of bridge structures : Proc. of 2-nd Intern. Scien. Conf. – Poznan, 1994. – P. 163–166.
8. Leonovich, S. N. Fracture Mechanics Parameters of Concrete: Test Methods Development and Harmonization of Standards / S. N. Leonovich // Concrete in The Service of Mankind : Intern. Congress. – Dundee, Scotland, UK, 1996.
9. Разрушение бетона и его долговечность : монография / Е. А. Гузеев. – Минск : Тыздзень, 1997.
10. Leonovich, S. N. The Non-Destructive Diagnostic Methods of Concrete-Lined Tunnels / S. N. Leonovich // Proc. of World Tunnel Congress. – Vienna, 1997.
11. Leonovich, S. N. The Influence of Structure of Concrete on Frost-Salt Resistance / S. N. Leonovich // Proc. of 13-th International Conference of Building Materials (13 IBAUSIL). – Weimar, 1997. – Vol. 2. – P. 263–268.
12. Leonovich, S. N. Calculation of Durability of Concrete Monuments using Fracture Mechanics / S. N. Leonovich // Internationale Zeitschrift für Baudenkmalpflege, Aedificatio Publishers, 1999.
13. Леонович, С. Н. Трещиностойкость и долговечность бетонных и железобетонных элементов в терминах силовых и энергетических критериев механики разрушения (монография) / С. Н. Леонович. – Минск : Тыздзень, 2000. – 266 с.
14. Леонович, С. Н. Коррозия арматуры: общие подходы к расчету долговечности железобетонных конструкций / С. Н. Леонович // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2002. – № 1 : Строительство и архитектура. – С. 38.
15. Leonovich, S. N. Fracture Mechanism for Estimation of Freeze – Thaw Resistance of Concrete / S. N. Leonovich // 15. Internationale Baustofftagung. – Weimar, 2003. – 24–27 September.
16. Leonovich, S. N. Frost Resistance of High-Performance Selfstressed Concrete under Pure Frost Attack / S. N. Leonovich, B. M. Khroustaliyev, W. F. Zverew, N. M. Golubev // В сборнике: Keep Concrete Attractive – Proceedings of the fib Symposium, 2005. – С. 275–279.
17. Прочность конструкционных бетонов при циклическом замораживании-оттаивании с позиции механики разрушения : монография // Под ред. С. Н. Леоновича. – Брест, БГТУ. – 2006. – 379 с.
18. Leonovich, S. N. Durability of self-stressed (expansive) concrete / S. N. Leonovich, O. Al-Fakih // fib Congress. – Naples. – 2006.
19. Leonovich, S. N. Complex Method of Strength Estimation of the Monolithic Reinforced Concrete Structures / S. N. Leonovich, D. Yu. Snezkov // Concrete Structures - Stimulators of Development, Proceedings of the fib Symposium Dubrovnik, 2007. – С. 947–954.
20. Schneider, U. Recommendation of RILEM TC 200 –HTC: Mechanical Concrete Properties at High Temperatures – Modeling and Applications / U. Schneider, S. Leonovich // Materials and Structures. 2007. – Т. 40, № 9. – Part. 1: Introduction – General Presentation and Oth. – С. 841.

21. Eberhardsteiner, J. Characterization of the Influence of Carbon Nanomaterials on the Mechanical Behavior of Cement Stone / J. Eberhardsteiner [et etc.] // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2011. – Т. 84, № 4. – С. 753–760.
22. Зайцев, Ю. В. Структура, прочность и механика разрушения бетонов при двухосном и трехосном сжатии (монография) / Ю. В. Зайцев, С. Н. Леонович, У. Шнайдер. – Минск : БНТУ, 2011. – 382 с.
23. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при температурных и коррозионных воздействиях : монография в 2 ч. / С. Н. Леонович [и др.] ; под ред. С. Н. Леоновича. – Минск : БНТУ, 2016. – Ч. 1. – 390 с.
24. Гузеев, Е. А. Механика разрушения бетона: вопросы теории и практики : монография / Е. А. Гузеев, С. Н. Леонович, К. А. Пирадов. – Брест : БПИ, 1999. – С. 71–85.
16. Leonovich, S. N. Frost Resistance of High-Performance Self-stressed Concrete under Pure Frost Attack / S. N. Leonovich, B. M. Khroustaliyev, W. F. Zverew, N. M. Golubev // V sbornike: Keep Concrete Attractive – Proceedings of the fib Symposium, 2005. – S. 275–279.
17. Prochnost' konstrukcionnyh betonov pri ciklicheskom zamora-zhivaniio-ttaivani s pozicii mekhaniki razrusheniya : monografiya // Pod red. S. N. Leonovicha. – Brest, BGTU. – 2006. – 379 s.
18. Leonovich, S. N. Durability of self-stressed (expansive) concrete / S. N. Leonovich, O. Al-Fakih // fib Congress. – Napples. – 2006.
19. Leonovich, S. N. Complex Method of Strength Estimation of the Monolithic Reinforced Concrete Structures / S. N. Leonovich, D. Yu. Snezkov // Concrete Structures - Stimulators of Development, Proceedings of the fib Symposium Dubrovnik, 2007. – S. 947–954.
20. Schneider, U. Recommendation of RILEM TC 200 -HTC: Mechanical Concrete Properties at High Temperatures – Modeling and Applications / U. Schneider, S. Leonovich // Materials and Structures. 2007. – Т. 40, № 9. – Part. 1: Introduction – General Presentation and Oth. – S. 841.

References

1. Leonovich, S. N. Dolgovechnost' centrifugirovannyh zhelezobetonnyh konstrukcij pri ciklicheskom zamorazhivani i ottaviani / S. N. Leonovich // Beton i zhelezobeton. – № 10. – 1988.
2. Leonovich, S. N. Struktura i morozostojkost' centrifugirovannogo betona s dobavkami / S. N. Leonovich, F. M. Ivanov, L. N. Zikeev // Issledovanie i primenenie himicheskikh dobavok. – M., NIIZHB, 1988.
3. Leonovich, S. N. Nerazrushayushchie metody kontrolya morozostojkosti centrifugirovannogo betona / S. N. Leonovich, L. N. Zikeev // Korroziya betona i armatury v agressivnyh sredah. – M. : NIIZHB, 1990.
4. Leonovich, S. N. The aggressive influence on the concrete and the modes to provide it's corrosion resistance / S. N. Leonovich. Materials Science and Restoration : Proc. 3-rd Intern. Colloq. – Esslingen. – 1992. – Vol. 3. – P. 1443–1449.
5. Leonovich, S. N. The structure of the concrete and it's durability / S. N. Leonovich, V. I. Shevchenko. Materials Science and Restoration: Proc. 3-rd Intern. Colloq. – Esslingen. – 1992. – Vol. 3. – P. 1652–1658.
6. Betony. Metody opredeleniya karakteristiki treshchino-stojkosti (vyazkosti razrusheniya) pri staticheskom nagruzenii : GOST 29167-91. – Vved. 01.07.1992.
7. Leonovich, S. N. The influence of cyclic freezing and thawing on cracking of concrete / S. N. Leonovich // Durability and service life of bridge structures : Proc. of 2-nd Intern. Scien. Conf. – Poznan, 1994. – P. 163–166.
8. Leonovich, S. N. Fracture Mechanics Parameters of Concrete: Test Methods Development and Harmonization of Standards / S. N. Leonovich // Concrete in The Service of Mankind : Intern. Congress. – Dundee, Scotland, UK, 1996.
9. Razrushenie betona i ego dolgovechnost' : monografiya / E. A. Guzeev. – Minsk : Tydzen', 1997.
10. Leonovich, S. N. The Non-Destructive Diagnostic Methods of Concrete-Lined Tunnels / S. N. Leonovich // Proc. of World Tunnel Congress. – Vienna, 1997.
11. Leonovich, S. N. The Influence of Structure of Concrete on Frost-Salt Resistance / S. N. Leonovich // Proc. of 13-th International Conference of Building Materials (13 IBAUSIL). – Weimar, 1997. – Vol. 2. – P. 263–268.
12. Leonovich, S. N. Calculation of Durability of Concrete Monuments using Fracture Mechanics / S. N. Leonovich // Internationale Zeitschrift für Baudenkmalpflege, Aedificatio Publishers, 1999.
13. Leonovich, S. N. Treshchinostojkost' i dolgovechnost' betonnyh i zhelezobetonnyh elementov v terminah silovyh i energeticheskikh kriteriev mekhaniki razrusheniya (monografiya) / S. N. Leonovich. – Minsk : Tydzen', 2000. – 266 s.
14. Leonovich, S. N. Korroziya armatury: obshchie podhody k raschetu dolgovechnosti zhelezobetonnyh konstrukcij / S. N. Leonovich // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2002. – № 1 : Stroitel'stvo i arhitektura. – S. 38.
15. Leonovich, S. N. Fracture Mechanism for Estimation of Freeze – Thaw Resistance of Concrete / S. N. Leonovich // 15. Internationale Baustofftagung. – Weimar, 2003. – 24–27 September.
21. Eberhardsteiner, J. Characterization of the Influence of Carbon Nanomaterials on the Mechanical Behavior of Cement Stone / J. Eberhardsteiner [et etc.] // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2011. – Т. 84, № 4. – С. 753–760.
22. Zajcev, Yu. V. Struktura, prochnost' i mekhanika razrusheniya betonov pri duhosnom i trekhosnom szhatii (monografiya) / Yu. V. Zajcev, S. N. Leonovich, U. SHnajder. – Minsk : BNTU, 2011. – 382 s.
23. Prochnost', treshchinostojkost' i dolgovechnost' konstrukcionnogo betona pri temperaturnyh i korroziionnyh vozdeystviyah : monografiya v 2 ch. / S. N. Leonovich [i dr.] ; pod red. S. N. Leonovicha. – Minsk : BNTU, 2016. – CH. 1. – 390 s.
24. Guzeev, E. A. Mekhanika razrusheniya betona: voprosy teorii i praktiki : monografiya / E. A. Guzeev, S. N. Leonovich, K. A. Piradov. – Brest : BPI, 1999. – S. 71–85.

Материал поступил 03.11.2022, одобрен 05.01.2023, принят к публикации 06.01.2023