



НИКОЛАЙ БЛЕЩИК



ОЛЬГА ЛАЗАРЕНКО

Введение

На данном этапе развития строительства в числе общей совокупности технических свойств строительных изделий и конструкций из бетона и железобетона определяющим является их долговечность, которая в условиях атмосферного воздействия обуславливается, в основном, стойкостью бетона в процессе циклического замораживания-оттаивания при одновременном воздействии воды или солевых растворов. По различным оценкам, от 5 до 10% строительных конструкций ежегодно выходит из строя или требует ремонта с усилением из-за коррозионной и морозной деструкции бетона. Несмотря на всю значимость и грандиозность ущерба, общество как бы закрывает глаза на эту проблему и живет по принципу «гром не грянет – мужик не перекрестится».

Решение программы обеспечения долговечности бетонных и железобетонных изделий и конструкций, дополнительно к статическим и динамическим нагрузкам еще и воспринимающих термоциклические и влажностные деформации, является сложной задачей, требующей привлечения ряда фундаментальных наук, в том числе физикохимии, термодинамики и механики композиционных материалов. Сложность проблемы усугубляется еще и тем, что обеспечение долговечности должно осуществляться на всех стадиях создания конструкций – от проектирования до их эксплуатации.

В этой статье мы, не претендуя на раскрытие всех аспектов проблемы, попытались очертить круг основных причин морозной деструкции бетона и условий, способствующих выпуску дефектных изделий и конструкций, изложить подходы к нормированию морозостойкости бетона и разработке соответствующих нормативных документов и, наконец, указать основные направления развития технологии бетона и железобетонных изделий, обеспечивающей получение долговечных конструкций.

Уровень качества и долговечность бетонных и железобетонных изделий и конструкций

Для многих бетонных и железобетонных изделий и конструкций, таких, как покрытия аэродромов и дорог, плиты тротуаров, бордюрные элементы, мостовые конструкции, плиты балконов и лоджий, стойки систем наружного освещения и линий электропередач, морозостойкость бетона является определяющим фактором их долговечности. Из-за неудовлетворительной системы обеспечения выпуска конструкций необходимой морозостойкости бетона срок их эксплуатации по сравнению с нормативным сокращается более чем в 2 раза. Например, средний срок службы железобетонных покрытий аэродромов в России, возведенных в соответствии с действующими стандартами, составляет 12 лет при нормативном 20 лет [1]. Тротуарные плиты и бордюрные камни зачастую уже на второй год эксплуатации подвергаются интенсивной коррозии, которая проявляется на поверхности изделий в виде шелуше-

ния и выкрашивания цементного камня, образования раковин и трещин. Дорожные железобетонные плиты, примененные для покрытия площади перед Олимпийским комплексом в Москве, начали разрушаться через 2–3 года, а через 4–5 лет были полностью заменены. Все это является результатом комплексного воздействия мороза, воды и химических антигололедных реагентов. Применяемые в зимнее время на автомобильных дорогах и тротуарах для борьбы со скользкостью различные противогололедные материалы в виде песчано-солевых смесей или жидких щелочных растворов представляют собой агрессивную среду, вызывающую интенсивное разрушение всех элементов автомобильных дорог и городских покрытий.

Не менее важной является проблема обеспечения долговечности конструкций зданий и сооружений, эксплуатирующихся в условиях знакопеременных температур (наружные стены, плиты балконов и лоджий, парапетные блоки, карнизные плиты и др.). В этих конструкциях под воздействием морозной деструкции оголяется рабочая арматура из-за разрушения защитного слоя бетона, отпадает керамическая облицовочная плитка, отслаиваются отделочные покрытия наружных поверхностей конструкций. Все это приводит к неоправданным затратам на восстановление эксплуатационной пригодности конструкций, а в отдельных случаях и к их полному разрушению, что нередко влечет за собой человеческие жертвы, как это произошло при обрушении балкона в г. Кобрине.

Недостаточная эксплуатационная надежность железобетонных конструкций, находящихся под воздействием циклического замораживания-оттаивания, обуславливается комплексом объективных и субъективных факторов, среди которых главными являются: существенные недостатки нормативной базы по обеспечению требуемой морозостойкости бетона, отсутствие методики проектирования состава бетона по заданной морозостойкости и низкий уровень оперативного контроля технологических процессов на всех стадиях изготовления железобетонных конструкций.

Проблемы нормирования и определения морозостойкости бетона

Проблема обеспечения долговечности железобетонных конструкций, в первую очередь, связана с нормированием их морозостойкости и методами определения морозостойкости бетона. Нормирование морозостойкости конструкций в настоящее время осуществляется по многим нормативным документам (их более 20), каждый из которых по-разному оценивает влияние среднемесячной температуры самого холодного месяца, температуры и влажностных условий в районе строительства, температуры и расчетного числа циклов заморозания в год. При этом не существует общей методики назначения нормируемой морозостойкости бетона. С целью устранения существующих недостатков в работе [2] предложена новая методика нормирования морозостойкости бетона, в которой учитывается наличие солнечной радиации, числа переходов температуры окружающей среды через 0 °С за год, расположение конструкции, минималь-

ная температура замораживания бетона, изменение прочности бетона и его самозалечивание в процессе эксплуатации, нормативный срок службы конструкций. С учетом этой методики, результатов последних исследований и климатических условий Беларуси следует в ближайшие годы разработать СНБ по нормированию морозостойкости бетона различных конструкций для всех регионов республики.

Проблема усугубляется еще и тем, что испытание бетона на морозостойкость является самым длительным, энерго- и трудоемким стандартизированным методом, так как мерой морозостойкости бетона является число стандартных циклов замораживания и оттаивания, которое он может выдержать до критического снижения прочности по сравнению с прочностью, определенной в начале испытания. Марка бетона по морозостойкости F300, например, означает, что бетон должен выдержать 300 циклов попеременного замораживания и оттаивания в насыщенном водой или раствором состоянии. Если иметь в виду, что стандартный цикл по базовому методу (ГОСТ 10060.1-95) длится не менее 5 часов, то испытания часто лишаются смысла, поскольку объект за период испытания может быть уже введенным в эксплуатацию.

Сложность проблемы еще и в том, что строители, стремясь снизить трудовые и энергетические затраты при изготовлении конструкций, все в больших объемах применяют бетонные смеси повышенной подвижности, бетоны из которых без применения пластифицирующих и воздухововлекающих добавок характеризуются весьма низкой морозостойкостью.

В этой связи вполне очевидны актуальность и своевременность разработки экспрессных (ускоренных) методов определения морозостойкости бетона. На это обстоятельство неоднократно указывали и ведущие специалисты СНГ в области бетоноведения, в том числе Г.И. Горчаков [3], Л.М. Добшиц и В.И. Соломатов [4], О.В. Кунцевич [5], В.П. Сизов [6], А.Е. Шейкин [7], А.М. Подвальный [8] и др.

Использование ускоренных методов определения морозостойкости бетона, предусмотренных ГОСТ 10060.2-95, ГОСТ 10060.3-95 и ГОСТ 10060.4-95, не решает проблемы по следующим причинам.

Метод, предусмотренный в ГОСТ 10060.2-95 и основанный на циклическом испытании образцов бетона при температуре минус 50°C, также требует хотя и сокращенных, но трудоемких испытаний в течение 8 суток для бетонов с F300. Большой недостаток ускоренного третьего метода по ГОСТ 10060.2-95 – отсутствие надежной корреляции получаемых данных по морозостойкости бетона с данными основного метода, на котором основаны все нормативные и про-

ектные требования. Принятые коэффициенты перехода от основных циклов к ускоренным несут сугубо статистический, усредненный характер, что во многих случаях приводит к значительным расхождениям при испытаниях по основному и ускоренному методам. Кроме того, заводские лаборатории не располагают установками для замораживания образцов бетона при температуре минус 50°C.

ГОСТ 10060.3-95 предусматривает определение морозостойкости бетона по результатам однократного испытания при помощи dilatометра деформаций основного и стандартного образцов. Анализ теоретических предпосылок этого метода показывает неадекватность значений морозостойкости бетона, определенных по ускоренному и основному методам. Этот вывод основан на том, что причиной морозной деструкции бетона являются не только температурные деформации расширения свободной воды при замерзании, но и неоднородное поле деформаций, возникающее в цементном камне и зернах заполнителя. Не учитываются также значительные деформации расширения льда при оттаивании. Кроме того, разность объемных деформаций при разных водоцементных отношениях цементного камня будет увеличиваться с увеличением его объемной концентрации. Согласно предлагаемой методике, будет уменьшаться и морозостойкость бетона, что противоречит общеизвестным данным, в том числе представленным в работе [3].

Несмотря на внешнюю привлекательность и перспективность идеи ускоренного определения морозостойкости бетона по структурно-механическим характеристикам (ГОСТ 10060.4-95), разработанный метод вызывает также ряд существенных возражений. В предложенном методе величина удельной контракции цемента определяется при помощи контрактометра на тесте нормальной густоты в течение трех первых часов твердения, а затем прогнозируется на 28 суток. При этом не учитывается, что водоцементное отношение теста в бетонной смеси отличается от водоцементного отношения теста нормальной густоты, а также и то, что приток удельной контракции цемента после трех часов зависит от его минералогического состава и удельной поверхности. Кроме того, расчетные зависимости капиллярно-открытой пористости не учитывают минералогии цемента, его удельной поверхности, температурных режимов гидратации цемента, содержания минеральных добавок, наличия модификаторов, объемной концентрации цементного камня.

По этим причинам ГОСТ 10060.3-95 и ГОСТ 10060.4-95 рекомендованы только для применения при технологическом контроле и не могут использоваться для определения стандартизированных характеристик морозостойкости бетона. Эти же причины обусловили необходимость разработки государственного стандарта.

Принятый в Беларуси подход при разработке стандарта ускоренного определения морозостойкости отличается от направлений исследований, проводившихся ранее ленинградскими, московскими и новосибирскими научными коллективами. За рубежом наибольший вклад в решение данной проблемы вносят скандинавские страны.

Для всех этих исследований характерен эмпирический подход к выявлению структурных и технологических факторов, которые позволили бы для частных задач получать бетоны с повышенной морозостойкостью. На это затрачиваются большие средства при низком уровне гарантированной обеспеченности прогнозируемого срока эксплуатации конструкций.

Разрабатываемый экспресс-метод определения морозостойкости бетона основывается на использовании механики композиционных материалов, физикохимии гидратационных процессов и неоднородностей напряжений, возникающих в компонентах бетона при циклическом замораживании-оттаивании. Исходя из этих положений и результатов теоретических и экспериментальных исследований, выполненных в БГПА, БелНИИС и ПГУ, были сформулированы основные предпосылки метода и разработаны закономерности, определяющие морозную деструкцию бетона. В основу работы положена гипотеза о том, что морозная деструкция бетона обуславливается нарастающими температурными деформациями цементного камня, суммирующимися в процессе замораживания-оттаивания водонасыщенного бетона и зависящими от температурных характеристик расширения всех компонентов бетона и их объемных концентраций. При этом учитывается, что в период оттаивания деформации расширения льда в 5–6 раз превышают деформации остальных компонентов бетона. Принимается также во внимание, что температурные деформации при первом цикле замораживания-оттаивания бетона и его структурно-механические характеристики предопределяют развитие температурных деформаций при циклическом замораживании. Экспериментальные исследования были направлены на получение значений деформаций цементного камня и бетона различных составов в процессе циклических испытаний при положительных и отрицательных температурах и данных по морозостойкости бетона соответствующих составов, полученных по основному методу ГОСТ 10060.1-95.

Выполненные экспериментально-теоретические исследования позволили выделить следующие основные структурно-механические факторы, которые использованы при разработке критериев для ускоренного определения морозостойкости бетона:

1. Суммарные деформации цементного камня в бетоне при его замораживании и оттаивании. Необходимость учета этого фактора обуславливается тем, что, как установил еще Пауэрс, деструкции бетона при воздействии мороза существенно проявляются при достижении относительных деформаций растяжения цементного камня, равных $2 \cdot 10^{-3}$. Он, однако, не учитывал того фактора, что во многих случаях деформации растяжения цементного камня в бетоне приобретают наибольшую величину при оттаивании замороженного бетона.

2. Коэффициент объемного расширения воды при переходе в лед.

3. Коэффициенты термического расширения льда при замораживании и оттаивании с учетом скорости замораживания.

4. Коэффициенты линейного термического расширения скелета цементного камня (геля и непрогидратированных зерен цемента), цементного камня, мелкого и крупного заполнителей.

5. Открытая и общая пористость цементного камня в бетоне.

6. Условная замкнутая пористость цементного камня в бетоне.

7. Водопоглощение заполнителей в бетоне.

8. Объемное водопоглощение бетона.

9. Модули деформаций и коэффициенты Пуассона льда, цементного камня и заполнителей.

10. Лдьистость насыщенного водой бетона при нормальном давлении в зависимости от температуры замерзания.

С учетом указанных факторов в качестве критерия морозостойкости бетона принята следующая зависимость:

$$K_F = (\alpha_{\text{л.к.з}} + \alpha_{\text{л.к.т}}) \cdot 10^4,$$

где $\alpha_{\text{л.к.з}}$; $\alpha_{\text{л.к.т}}$ – коэффициенты линейного температурного расширения цементного камня соответственно при замораживании и оттаивании бетона.

На основе результатов обобщения экспериментальных данных по морозостойкости бетонов различных составов и модифицированных химическими добавками, твердеющих как в нормально-влажностных условиях, так и пропаренных по различным режимам, получена корреляционная связь морозостойкости бетона с критерием морозостойкости в виде:

$$n = \left(0,5 - \frac{K_F - 0,35}{0,1 + 3,5K_F - 0,12 \cdot K_F^2} \right) \cdot 10^3,$$

где n – число циклов попеременного замораживания и оттаивания по базовому методу, при котором прочность основных образцов не снижается более чем на 5% по сравнению с прочностью контрольных образцов.

Коэффициенты линейного температурного расширения цементного камня при замораживании и оттаивании должны рассчитываться по структурным характеристикам бетона, учитывающим все указанные выше факторы с использованием экспериментальных данных по определению коэффициентов линейного температурного расширения бетона при однократном оттаивании.

Для расчета структурно-механических характеристик цементного камня и бетона получены расчетные зависимости, учитывающие все основные физико-механические и химические свойства исходных материалов. Для уточнения некоторых из них предусматриваются испытания по определению водопоглощения бетона, которое позволяет учитывать степень уплотнения бетонной смеси при

формовании изделий и условия твердения бетона.

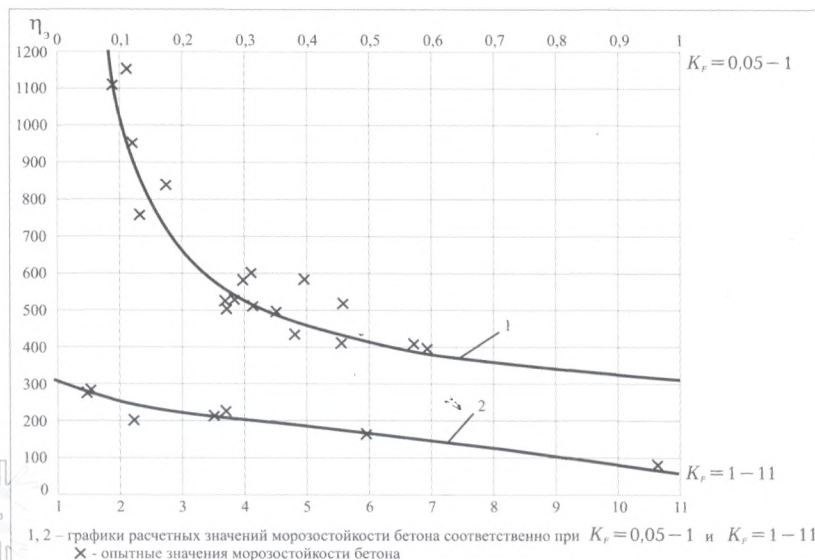
Оценка достоверности разработанного ускоренного метода определения морозостойкости производилась путем сравнения данных по морозостойкости бетонов различных составов, полученных по базовому методу ГОСТ 10060.1 и по предлагаемому стандарту. Отдельные результаты сравнения приведены на рисунке. Бетоны приготавливались на четырех видах цемента с применением трех видов химических добавок. Содержание цемента находилось в пределах 260–460 кг/м³. Водоцементное отношение изменялось от 0,33 до 0,85, подвижность смеси – от 3 до 20 см осадки конуса, жесткость – от 15 до 25 с. Отдельные контрольные образцы бетона выдерживались в естественных условиях, другие – в естественных условиях после тепловой обработки. Морозостойкость бетона, определенная по базовому методу (n_3), составляла 77–1154 цикла. Расчетно-экспериментальные данные морозостойкости бетона, полученные по методике предлагаемого СТБ, удовлетворительно коррелируются с экспериментальными данными: наибольшие отклонения составляют плюс 18,9% и минус 21,2%. Графики, представленные на рисунке, свидетельствуют об удовлетворительной корреляции полученной зависимости $n = \varphi(K_F)$ с экспериментальными данными по морозостойкости бетона.

Особенности технологии морозостойких бетонов

Гарантированное обеспечение нормируемой морозостойкости бетона должно достигаться не только внедрением надежных экспрессных методов ее определения, но, может быть даже в первую очередь, соблюдением определенных требований к составу бетона, к характеристикам исходных материалов и к технологии производства изделий и конструкций. Огромный отечественный и зарубежный опыт, результаты многочисленных исследований позволяют сформулировать такие требования, которые следует изложить в Пособии по технологии производства изделий с заданной морозостойкостью. Очевидно, разработка такого пособия должна быть включена в Программу технического нормирования и стандартизации Минстройархитектуры РБ на ближайшие годы.

При разработке пособия следует, прежде всего, учесть технологические факторы, которые оказывают существенное влияние на однородность бетона по морозостойкости. К таким факторам, характеризующимся коэффициентом влияния K , С.С. Гордон [4] относит: применение цемента с различными характеристиками: $K_1 = 0,5-1,8$; качество и однородность сырья – $K_2 = 0,7-1,2$; приготовление бетонной смеси – $K_3 = 0,7-1,2$; транспортирование смеси и формирование – $K_4 = 0,8-1,1$; твердение бетона – $K_5 = 0,6-1,2$; уход за конструкциями – $K_6 = 0,9-1,1$; однородность характеристик и свойств конструкций – $K_7 = 0,9-1,2$.

Значения коэффициентов в ранжированной группе факторов следует определять на основе обобщения отечественного и зару-



бежного опыта. Например, наибольшее значение коэффициента K_1 и, соответственно, наиболее высокая морозостойкость бетона достигаются при использовании белитовых бездобавочных низкоалюминатных портландцементов с удельной поверхностью менее $300 \text{ м}^2/\text{кг}$. Наименьшей морозостойкостью обладают бетоны, приготовленные на тонкомолотых алитовых высокоалюминатных ($\text{C}_3\text{A} > 10\%$) портландцементов с минеральными добавками. Применение рядовых и реакционно-способных заполнителей может снизить значение K_2 до 0,7. Неточное дозирование воды, отсутствие оперативного учета влажности заполнителей и оптимизированного регламента их перемешивания приводят к снижению значения K_3 до 0,7. При формовании изделий следует контролировать степень уплотнения бетонной смеси и содержание вовлеченного воздуха. При отклонении этих параметров от нормируемых морозостойкость бетона может снизиться на 30–40%. Для тепловой обработки оптимальными являются температура $40\text{--}50^\circ\text{C}$ и влажность среды более 95%. Весьма положительным фактором является выдерживание бетона в раннем возрасте во влажном состоянии.

Особое значение для обеспечения нормируемой морозостойкости бетона имеет подбор его состава. Однако до сих пор не разработана и не утверждена в установленном порядке методика проектирования состава бетона по заданной морозостойкости. Этот пробел следует также устранить при разработке Пособия. Наиболее существенной характеристикой морозостойкого бетона при прочих равных условиях является цементно-водное отношение ($\text{Ц}/\text{В}$). Поэтому при подборе состава бетона следует, прежде всего, определять необходимое значение $\text{Ц}/\text{В}$. Для этой цели в первом приближении может быть рекомендована методика В.П. Сизова [10], по которой цементно-водное отношение может рассчитываться по формуле:

$$F = AR_{\text{ц}} (\text{Ц}/\text{В} - 0,5),$$

где F – заданная морозостойкость бетона по базовому методу ГОСТ 10060.1-95; $R_{\text{ц}}$ – активность цемента; A – коэффициент, зависящий от качества материалов, состава бетона, свойств смеси и бетона.

Приближенное значение коэффициента A может быть принято равным 0,47; 0,45 и 0,48 соответственно для марок портландцемента 400, 500 и 600. Более точное значение коэффициента A может определяться по номограмме [10] в зависимости от $\text{В}/\text{Ц}$, содержания воды и вовлеченного воздуха в бетонной смеси, минеральных добавок и трехкальциевого алюмината в цементе.

Не менее важное значение для долговечности железобетонных конструкций имеет систематический контроль соблюдения требований технологических рег-

ламентов на всех стадиях производства. Это требование вытекает из принятой в технических условиях на конкретные виды изделий системы периодического определения морозостойкости бетона. Например, для большинства дорожных изделий предусматривается проводить испытания бетона один раз в полгода. При этом, естественно, может гарантироваться выпуск изделий с нормируемой морозостойкостью, если в течение всего периода производства будут соблюдаться все условия, принятые при выпуске контрольных образцов бетона для испытания их на морозостойкость. Однако это важное требование на практике, как правило, не соблюдается. Зачастую применяются материалы с другими свойствами, не контролируются степень уплотнения бетонной смеси, объемное содержание вовлеченного воздуха, оптимальные режимы тепловлажностной обработки бетона и т.д., что влечет за собой неконтролируемый выпуск дефектных изделий по морозостойкости. Морозная деструкция таких изделий, как правило, проявляется уже после двух лет эксплуатации.

Выпуску дефектных изделий способствуют и недостатки нормативных документов. Например, нормативными документами допускается выпуск дорожных изделий в летний период с отпускной прочностью 70% от нормируемой, т.е. допускается поставка потребителю изделий с недостаточной гидратацией цемента и, естественно, с недостаточной морозостойкостью. Укладка таких изделий в ноябре приводит к деструкции бетона после эксплуатации в течение первой зимы, что наблюдалось в ряде случаев на дорогах г. Минска. Если же эти изделия отправлены даже в летние месяцы при жаркой сухой погоде, то дальнейшая гидратация цемента без увлажнения невозможна. Такие изделия также обречены на деструкцию при циклическом замораживании и оттаивании.

В этой связи Технический комитет по нормированию и стандартизации в строительстве ТСК 08 «Бетонные и железобетонные конструкции, бетоны и растворы» при пересмотре нормативных документов устанавливает более жесткие требования к нормируемым значениям морозостойкости бетона различных изделий и конструкций и к методам контроля качества бетона при приемочных испытаниях. Например, для дорожных изделий вводятся требования при приемочных испытаниях проводить определение объемного водопоглощения бетона в изделиях, являющегося при заданном составе бетона одной из характеристик, определяющих морозостойкость бетона. Кроме того, вводится требование о том, чтобы завод-изготовитель гарантировал в течение не менее трех лет сохранение изделием эксплуатационного качества, характеризующегося отсутствием несмываемых водой высолов на поверхности бетона, шелушением поверхности и отслоением цементного камня от бетона.

Очевидно, что обеспечить выпуск изделий с гарантированной морозостойко-



стью можно лишь при строгом соблюдении технологической дисциплины и систематическом контроле морозостойкости экспресс-методом при однократном замораживании и оттаивании бетона. Это позволит ликвидировать возможность выпуска дефектных изделий и сэкономить огромные средства на капитальный ремонт объектов строительства.

Литература

1. Нерубенко С.Л., Гвоздев В.А. Нормирование и определение морозостойкости бетона // Долговечность и защита конструкций от коррозии: Материалы Международной конференции. М., 1999. 233 с.
2. Добшиц Л.М. О назначении реально обоснованной проектной марки по морозостойкости // Бетон и железобетон. 1999. №5. С. 28–29.
3. Горчаков Г.И. и др. Зависимость морозостойкости бетонов от их структуры и температурных деформаций // Бетон и железобетон. 1999. №10. С. 7–10.
4. Добшиц Л.М., Портнов И.Г., Соломатов В.И. Физико-математическое моделирование разрушения бетона при его циклическом замораживании. Долговечность и защита конструкций от коррозии: Материалы Международной конференции. М., 1999. С. 113–118.
5. Кунцевич О.В. Бетоны высокой морозостойкости для сооружений Крайнего Севера. Л.: Стройиздат, 1983. 210 с.
6. Сизов В.П. К вопросу прогнозирования морозостойкости бетона // Бетон и железобетон. 1994. №5. С. 28–29.
7. Шейкин А.Е. Критерий морозостойкости бетона // Бетон и железобетон. 1979. №11. С. 12–14.
8. Подвольный А.М. Об испытании бетона на морозостойкость // Бетон и железобетон. 1996. №4. С. 26–29; №5. С. 27–29.
9. Гордон С.С. Прогноз долговечности железобетонных конструкций // Бетон и железобетон. 1992. №6. С. 23–26.
10. Сизов В.П. К вопросу прогнозирования морозостойкости бетона // Бетон и железобетон. 1994. №4. С. 26–28.