

$$V = \sqrt{\frac{8R\gamma}{3\alpha\rho} \left[\left(g + \frac{3}{8} \frac{\alpha\rho}{R\gamma} V_0^2 \right) e^{\frac{3\alpha\rho}{4R\gamma} t} - g \right]}. \quad (19)$$

Наибольшая высота отскока соответствует условию $V = 0$. Такое возможно, когда равно нулю выражение под знаком радикала. Откуда

$$y_{\max} = \frac{4}{3} \frac{R\gamma}{\alpha\rho} \ln \left(1 + \frac{3}{8} \frac{\alpha\rho}{R\gamma} \frac{V_0^2}{g} \right) \quad (20)$$

Полученные формулы удобны в использовании и позволяют производить более точные вычисления значений коэффициента восстановления скорости при упруго-пластическом ударе, а также величин скоростей падения и отскока в любой точке.

Они позволяют рассчитать изменение сил аэродинамического сопротивления по высоте при движении шарика вниз и вверх.

The theoretical aspects for experimental dates treatment under impact testing of materials on falling balls method are looked. The modern methodic for balls velocity calculation take into consideration a influence of aerodynamic resistance are developed.

Список литературы

1. Kleis, I. Theoretical and experimental determination of coefficient of restitution / I. Kleis // OST-96. Symposium on Machine Design. – Oulu, 1996. – P. 8 – 15.
2. Petrak, D., Schade K-P. Experimental investigation of the particle-wall collision under particular consideration of the wall roughness / D. Petrak, K-P. Schade // ASME Meeting. – San Diego, 1996. – P. 1 – 8.
3. Крупич, Б. Испытания материалов на удар по методу падающего шарика с учетом аэродинамического сопротивления / Б. Крупич, Р.Ф. Мухаметвалиев, В.Г. Барсуков // Materialy II Sympozjum Mechaniki Zniszczenia Materialow i Konstrukcji. – Augustow-Bialystok, 2003. – P. 175 – 178.
4. Барсуков, В.Г. Трибомеханика дисперсных материалов. Технологические приложения : монография / В.Г. Барсуков, Б. Крупич. – Гродно: ГрГУ, 2004. – 260 с.

УДК 666.972

Э.И. БАТЯНОВСКИЙ, Н.М. ГОЛУБЕВ, А.И. БОНДАРОВИЧ,
В.С. ЗАХАРИЧ, Г.С. ЧИКУЛАЕВ, А.В. ВАШКЕВИЧ

ДОЛГОВЕЧНОСТЬ БЕТОНА ПРИ КОМПЛЕКСНОМ АГРЕССИВНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

В статье приводятся результаты исследований, отражающих влияние комплексного воздействия агрессивных сред и механических нагрузок на эксплуатационную долговечность бетона.

Введение. В процессе эксплуатации на территории Беларуси бетон дорожных и аэродромных покрытий, тротуаров и других зон благоустройства городов и поселений подвергается за зимний период года переходам через нулевую отметку около 100 и более раз, то есть воспринимает порядка 50 циклов попеременного замораживания-оттаивания. Применение в качестве противоморозных реагентов солей хлора формирует эксплуатационную среду, характеризующуюся комплексным агрессивным воздействием на бетон. Последнее «накладывается» на и без того сложный механизм разрушительного действия знакопеременных температур и усиливает его деструктивный эффект [1 – 9].

Следует отметить, что в реальных условиях эксплуатации покрытий и элементов благоустройства отрицательное (разрушающее) воздействие солей-антиобледенителей не прекращается и при положительной температуре окружающей среды. Попеременное увлажнение-высушивание, изменение температуры (даже в пределах суток) вызывают соответствующие многократно повторяющиеся деформации бетона, побуждают проявление процессов растворения – кристаллизации попавшей в его поры соли с образованием кристаллогидратов, увеличивающихся в объеме, а также эндокринного и других, разрушающих структуру эффектов, то есть, сопровождается постоянным деструктивным воздействием на бетон.

Эти «физико-химические» факторы воздействия на бетон дополняются и усиливаются механическими нагрузками: сжатие, растяжение (изгиб), истирание, которые преимущественно реализуются в эксплуатационных условиях в виде динамически приложенных нагрузок, зачастую – ударных, сосредоточенных, способных вызвать образование трещин в бетоне.

Общая методика исследований. Цель экспериментов заключалась в выявлении закономерностей изменения долговечности бетона под комплексным воздействием циклического замораживания-оттаивания (в среде – воде и растворе NaCl; насыщения в растворе NaCl – высушивания и механических нагрузок (статических и динамических). С учетом того, что продолжительное воздействие этих агрессивных по отношению к бетону факторов должно в какой-то момент привести к нарушениям его структуры, отслеживали изменение скорости прохождения ультразвукового импульса (далее – скорость ультразвука) во взаимосвязи с изменяющимися свойствами бетона: прочностью, изменениями массы, проницаемостью.

Исследования осуществили на трех партиях образцов. Для первой партии циклическое замораживание-оттаивание вели по 3-му методу ГОСТ 10060-95 как для дорожного бетона с охлаждением образцов (70x70x70 мм) до (50...55) °С и оттаивание при 18±2 °С в жидкости, но вместо 5 % водного раствора NaCl в емкостях использовали водопроводную воду. На этом этапе исследований исключили влияние солевого воздействия на бетон.

Вторую партию образцов циклически насыщали в 5 % растворе NaCl (температура ~ 15...18 С) в течение 16 ч с последующим высушиванием в сушильном шкафу при температуре ~ 60 С в течение 7...8 ч. Условия эксперимента были ужесточены тем, что разогретые при высушивании образцы бетона помещали в раствор соли без предварительного охлаждения на воздухе.

Третью партию образцов бетона подвергали стандартным испытаниям замораживанием-оттаиванием по 3-му методу ГОСТ 10060-95 при температуре – (50...55) °С в 5 % - ом растворе NaCl.

В настоящих исследованиях использовали цементно-песчаный бетон (цемента – 500 кг; песка – 1600 кг) и бетон со щебнем гранитным (цемента – 450 кг; щебня – 600 кг; песка – 1150 кг) при водоцементном отношении В/Ц ~ 0,33...0,36 и 0,36...0,40, соответственно, при показателе жесткости $J \sim 15...25$ с. Образцы бетона уплотняли на виброплощадке со стандартными параметрами ($A = 0,5$ мм; $f \approx 50$ Гц) в течение времени и под пригрузом, обеспечивающим получение расчетного качества (степени) уплотнения свежесформованного бетона, которое оценивали по средней плотности, принятой не ниже 2250 кг/м³ для цементно-песчаного бетона и для бетона со щебнем ≥ 2350 кг/м³ [10]. Условия твердения образцов: нормальные (гидроизоляция); воздушные и пропаренные ($t < 50^\circ\text{C}$) с последующим хранением в помещении лаборатории (воздушные).

Статическую механическую нагрузку на образцы бетона имитировали загрузкой их после оттаивания (через каждые 5 циклов замораживания-оттаивания) под прессом с усилием, примерно до 20; 30; 50 и 70 % от прочности бетона в проектном возрасте (28 сут.), а при испытаниях на солестойкость – с такой же периодичностью и усилиями, но после насыщения в растворе соли.

Динамическую (ударную, сосредоточенную) механическую нагрузку на оттаявшие (насыщенные в растворе соли) образцы бетона имитировали 10-ю ударами копра – плотномера динамического (СТБ 1242-2000; масса груза ~ 2,5 кг; высота падения – 300 мм; точка касания – острие конуса с углом при вершине 60 град.) по одной из их поверхностей через каждые 5 циклов замораживания – оттаивания (насыщения – высушивания).

Для получения сравнительных характеристик в каждой партии образцов бетона имелись контрольные, которые подвергали циклическому замораживанию – оттаиванию (насыщению – высушиванию) без дополнительного воздействия механических нагрузок.

Испытания морозостойкости в «среде-воде»

Изменение прочности бетона. В соответствии с принятой общей методикой исследований оттаявшие образцы (куб с ребром 100 мм; данные приведены к 150 мм) основных серий через каждые 5 циклов однократно подвергали сжатию под прессом, передавая усилие на бетон, соответствовавшие 10; 20; 25 и 30 МПа для образцов мелкозернистого бетона и 15, 25, 30 и 35 МПа – бетона со щебнем.

Из данных рисунка 1 следует отметить непосредственную взаимосвязь изменений прочности бетона как контрольных, так и основных образцов от условий их твердения и состояния структуры (пористости) материала. При этом наименьшей прочностью характеризуется бетон, твердевший в воздушно-сухих условиях. Но даже и в этом случае после первых 10...30 циклов замораживания-оттаивания прочность образцов бетона (до уровня статической нагрузки в 10...20 МПа для мелкозернистого бетона и в 15...25 МПа для бетона со щебнем) несколько возрастает. Этот эффект значительнее для образцов, твердевших «под пленкой» и пропаренных после изготовления.

С увеличением статической нагрузки до 60 % и более (т.е., до уровня верхней границы трещинообразования) [11] процесс морозной деструкции бетона и снижение его прочности прогрессирует. Установлено, что отрицательное воздействие динамической ударной нагрузки примерно соответствует (по фактическим данным снижения прочности бетона) уровню статической нагрузки в 60 % и более. На наш взгляд это связано с тем, что и в одном, и во втором варианте воздействия на бетон механическими нагрузками появляются микротрещины в структуре бетона, развитие которых усугубляется действием знакопеременной температуры при заморажива-

нии-оттаивании бетона. Под действием сосредоточенной ударной нагрузки в бетоне возникают локальные очаги достаточно высоких напряжений, которые в хрупком материале приводят к трещинообразованию в зоне удара. Многократное повторение такого воздействия приводит к зарождению микротрещин в цементном камне и последующему их развитию. Этот процесс ускоряется под влиянием факторов, сопровождающих действие знакопеременной температуры, особенно при глубоком замораживании. Следует отметить, что возникающие нарушения структуры будут ухудшать и другие эксплуатационные характеристики бетона.

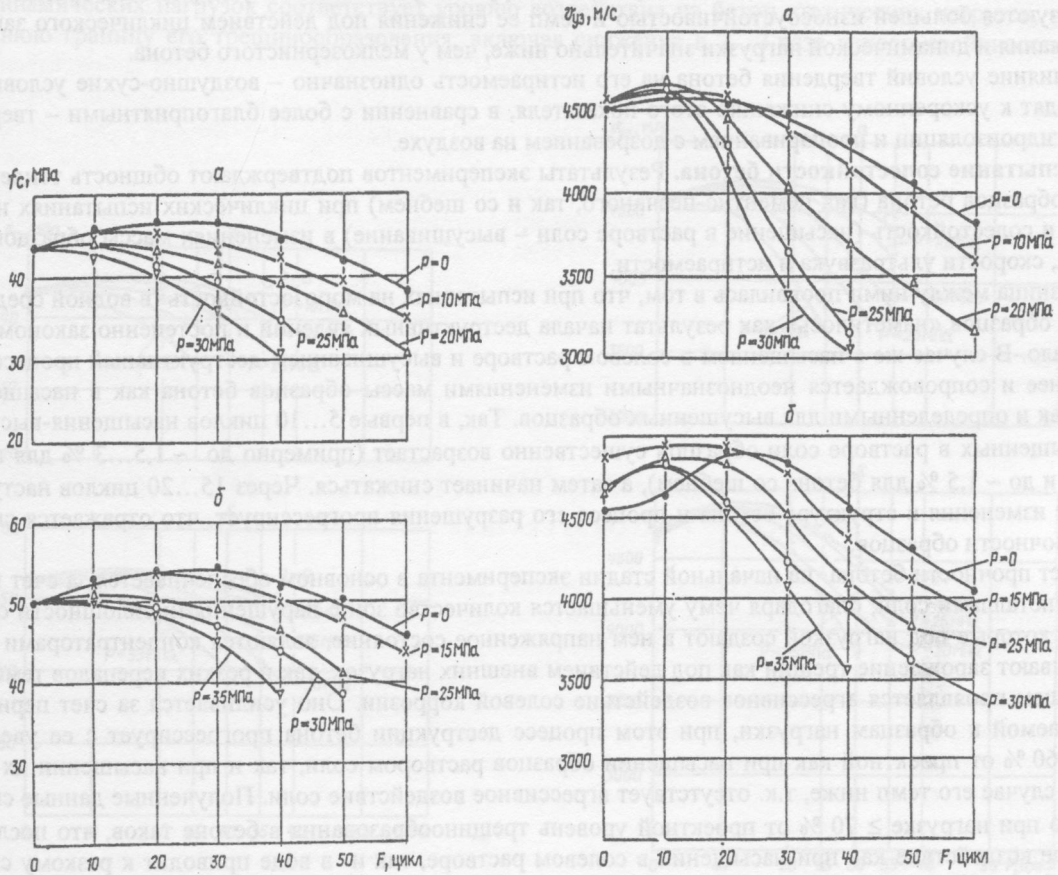


Рисунок 1 – Тенденция изменения прочности и скорости ультразвука контрольных ($P=0$) и основных образцов мелкозернистого бетона (а) и бетона со щебнем (б) под воздействием циклического замораживания-оттаивания в «средней воде» при $t = -(50...55)^\circ\text{C}$ и статической механической нагрузки

Изменение массы бетона. Вначале наблюдали положительный прирост массы, отражающий увеличение водосодержания бетона в процессе циклического замораживания – оттаивания на первом этапе испытаний, а затем снижение, то есть начало и развитие деструктивных процессов с поверхности образцов. Увеличение потерь массы сопровождалось появлением признаков морозной деструкции в виде округления ребер (медленно развивающегося, т.к. бетон достаточно плотен).

Из полученных данных следует, что статическая механическая нагрузка в пределах до 30...40 % от кубиковой прочности бетона проектного возраста (для цементно-песчаного – до 15 МПа; с крупным заполнителем – до 20 МПа) не вызывает существенных изменений в кинетике снижения массы бетона в процессе испытаний.

С увеличением нагрузки примерно до 50 % от прочности проектного возраста, т.е. до 20 МПа (мелкозернистый бетон) и до 25 МПа (бетон со щебнем) потери массы в процессе испытаний начинают нарастать.

С ростом нагрузки сверх 25 МПа для мелкозернистого бетона и 30 МПа для бетона со щебнем, то есть, на уровне ~ 60 % от прочности проектного возраста и более, деструктивные процессы интенсифицируются, что отражается в росте потерь массы образцами.

Если сравнивать отрицательный эффект от динамических нагрузок с таковым от воздействия на бетон сжимающей статической нагрузки, то (для условий выполненных экспериментов) динамическая нагрузка по воздействию на бетон примерно соответствует уровню статической нагрузки в 60 %-ой и более от прочности бетона в проектном возрасте.

Истираемость бетона. Истираемость образцов бетона (70x70x70 мм) определяли во всех случаях в водонасыщенном состоянии по методике ГОСТ 13087. Установлено, что статическая (сжатие – отпуск) нагрузка до значений $\leq 60\%$ от проектной прочности бетона не оказывает влияния на его истираемость, несколько повышая ее при нагрузке в 70...80 % от проектной прочности. Ударная динамическая нагрузка на бетон (10 ударов копра по «границе истирания» через каждые 5 циклов) однозначно сопровождается ростом его истираемости на каждом из отрезков или периодов испытаний, а значит – и в процессе эксплуатации дорожных покрытий и элементов благоустройства. Под ее воздействием основные образцы снижают «износоустойчивость» примерно к 25 циклам (контрольные – через 35...40 циклов), затем процесс деструкции усиливается и ускоряется. Образцы со щебнем характеризуются большей износоустойчивостью и темп ее снижения под действием циклического замораживания-оттаивания и динамической нагрузки значительно ниже, чем у мелкозернистого бетона.

Влияние условий твердения бетона на его истираемость однозначно – воздушно-сухие условия твердения приводят к ускоренному снижению этого показателя, в сравнении с более благоприятными – твердением в условиях гидроизоляции и пропариванием с созреванием на воздухе.

Испытание солестойкости бетона. Результаты экспериментов подтверждают общность тенденций «поведения» образцов бетона (как цементно-песчаного, так и со щебнем) при циклических испытаниях на морозостойкость и солестойкость (насыщение в растворе соли – высушивание) в изменениях массы образцов, прочности бетона, скорости ультразвука и истираемости.

Разница между ними проявилась в том, что при испытаниях на морозостойкость (в водной среде) снижение массы образцов «наметилось» как результат начала деструктивных явлений и постепенно закономерно прогрессировало. В случае же с насыщением в солевом растворе и высушиванием деструктивный процесс развивается сложнее и сопровождается неоднозначными изменениями массы образцов бетона как в насыщенном состоянии, так и определенными для высушенных образцов. Так, в первые 5...10 циклов насыщения-высушивания масса насыщенных в растворе соли образцов существенно возрастает (примерно до $\sim 1,5...3\%$ для цементно-песчаного и до $\sim 1,5\%$ для бетона со щебнем), а затем начинает снижаться. Через 15...20 циклов наступают необратимые изменения в структуре бетона и процесс его разрушения прогрессирует, что отражается снижением массы и прочности образцов.

Рост прочности бетона на начальной стадии эксперимента в основном обеспечивается за счет коагуляции пор кристаллами соли, благодаря чему уменьшается количество зон с нарушениями сплошности структуры материала, которые под нагрузкой создают в нем напряженное состояние, являются концентраторами напряжений и вызывают зарождение трещин как под действием внешних нагрузок, так и резких перепадов температуры. В дальнейшем проявляется агрессивное воздействие солевой коррозии. Оно усиливается за счет периодически прикладываемой к образцам нагрузки, при этом процесс деструкции бетона прогрессирует с ее увеличением сверх 50...60 % от проектной как при насыщении образцов раствором соли, так и при насыщении их водой. В последнем случае его темп ниже, т.к. отсутствует агрессивное воздействие соли. Полученные данные свидетельствуют, что при нагрузке $\geq 70\%$ от проектной уровень трещинообразования в бетоне таков, что последующее циклическое воздействие как при насыщении в солевом растворе, так и в воде приводит к резкому снижению прочности бетона. В этом случае практически отсутствует (при нагрузке 30 МПа для мелкозернистого и 35 МПа для бетона со щебнем) прирост прочности бетона на начальном этапе испытаний. Выявлено, что отрицательное воздействие динамической ударной нагрузки примерно соответствует (по фактическим данным снижения прочности бетона) уровню статической нагрузки в 60 % и более.

Морозостойкость бетона в солевом растворе

Прочность бетона. Анализ данных испытаний бетона на морозостойкость в «среде-воде» и в растворе соли (рисунок 2) свидетельствует, что для контрольных образцов (отсутствует механическая нагрузка) сохраняется общая закономерность некоторого роста прочности бетона на начальном этапе испытаний до 30...35 циклов в воде и до 10...20 циклов в растворе соли. Затем прочность бетона закономерно снижается при более высоком темпе для испытаний в солевом растворе. Если оценить эти изменения по количеству циклов, то получается, что влияние солевого раствора проявляется, примерно, в 2...3-х кратном ускорении процесса деструкции (по началу снижения прочности) бетона.

Сопоставление данных воздействия на бетон эффектов «размораживания» и солевой коррозии в сочетании с механическими нагрузками показывает следующее.

Если статически приложенная нагрузка не превышает 40 % от проектной прочности бетона (уровень нижней границы трещинообразования), то при циклических испытаниях на морозостойкость (как в «среде-воде», так и в растворе соли) изменения в прочности бетона практически одинаковы для контрольных и нагружаемых образцов.

С ростом нагрузки до 50...60 % от проектной (в экспериментах до 20...25 МПа для мелкозернистого и до 25...30 МПа для бетона со щебнем), процесс его деструкции при циклических испытаниях на морозостойкость активизируется.

В случае, когда механические нагрузки достигают уровня 65...75 % от проектной прочности бетона, т.е. соответствующего или превышающего верхнюю границу его трещинообразования (в экспериментах равнялась

~ 30 МПа для мелкозернистого и ~ 35 МПа для бетона со щебнем), процесс деструкции и снижения прочности бетона прогрессирует уже после 10...20 циклов замораживания-оттаивания (при ускоренном развитии процесса в растворе соли). Это связано с тем, что означенный уровень нагрузки приводит к образованию в объеме бетона «необратимо» раскрытых трещин, не исчезающих после снятия нагрузки. Они пронизываемы для воды и растворенной в ней соли, что (в сочетании с разрушающими факторами циклического замораживания-оттаивания) приводит к ускоренной деструкции бетона и резкому снижению его прочности.

При испытаниях в солевом растворе подтверждено, что отрицательный эффект от ударных сосредоточенных динамических нагрузок соответствует уровню воздействия на бетон статических нагрузок, превышающих верхнюю границу его трещинообразования, включая снижение в 2...3 раза износоустойчивости образцов бетона.

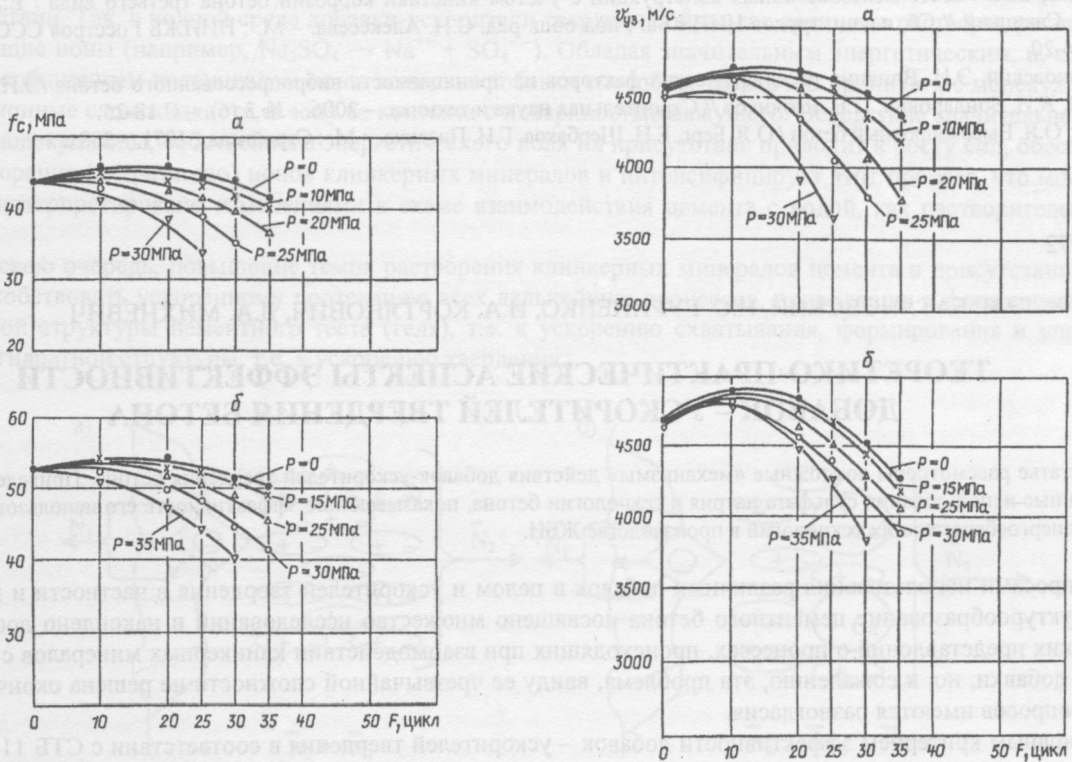


Рисунок 2 – Тенденция изменения прочности и скорости ультразвука контрольных ($P=0$) и основных образцов мелкозернистого бетона (а) и бетона со щебнем (б) под воздействием циклического замораживания-оттаивания в растворе соли при $t = -(50...55)^\circ\text{C}$ и статической механической нагрузки

Выводы. Выявленные по результатам исследований закономерности позволяют понять причины ускоренной деструкции бетона, подверженного в процессе эксплуатации комплексному воздействию среды, усиленному механическими нагрузками. Обобщение полученных данных дает основание для назначения предельных уровней нагрузок на бетон разнообразных покрытий, а также для установления требований к прочности бетона при их проектировании с учетом условий эксплуатации. Взаимосвязь изменений скорости ультразвука, отражающих изменения структуры бетона в процессе эксплуатации, создает необходимые предпосылки для разработки методики оперативного контроля (оценки) состояния и прогнозирования долговечности бетона покрытий.

The laws revealed by results of researches allow to understand the reasons of the accelerated destruction of the concrete subject while in service to complex influence of environment, strengthened by mechanical loadings. Generalisation of the received data gives the basis for appointment of marginal levels of loadings to concrete of various coverings, and also for an establishment of requirements to durability of concrete at their designing taking into account operation conditions.

Список литературы

1. Горчаков, Г.И. Повышение морозостойкости бетона в конструкциях промышленных и гидротехнических сооружений / Г.И. Горчаков, М.Н. Капкин, Б.Г. Скрамптаев. – М. : Стройиздат, 1965. – 195 с.
2. Москвин, В.М. Морозостойкость бетона в напряженном состоянии. Бетон и железобетон / В.М. Москвин, А.М. Подвальный. – 1960, № 2. – С. 58-64.

3. Ахвердов, И.Н. Механизм разрушения пористых материалов при насыщении их солями / И.Н. Ахвердов, И.В. Станиславская. – Минск : ДАН БССР, 1967. – Т. 11, № 4. – С. 320-323.
4. Иванов, Ф.М. Защита железобетонных транспортных сооружений от коррозии / Ф.М. Иванов. – М. : Транспорт, 1968. – 173 с.
5. Путан, А.А. Оценка кристаллизационных давлений в пористых средах методом фотоупругости / А.А. Путан, А.А. Барташевич // В кн. Методы исследований стойкости строительных материалов и конструкций. – Минск : Выш. шк., 1969. – С. 60-69.
6. Алексеев, С.Н., Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде / С.Н. Алексеев, Н.К. Розенталь. – М. : Стройиздат, 1976. – 205 с.
7. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В.М. Москвин [и др.]. – М. : Стройиздат, 1980. – 536 с.
8. Шалимо, М.А. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии / М.А. Шалимо. – Минск : Выш. шк., 1986. – 200 с.
9. Гузев, Е.А. Расчет железобетонных конструкций с учетом кинетики коррозии бетона третьего вида / Е.А. Гузев, Н.В. Савицкий // Сб. научн. трудов НИИЖБа. ; под общ. ред. С.Н. Алексеева. – М. : НИИЖБ Госстроя СССР, 1988. – С. 16-20.
10. Батяновский, Э.И. Влияние технологических факторов на проницаемость вибропрессованного бетона / Э.И. Батяновский, А.И. Бондарович, П.В. Рябчиков // Строительная наука и техника. – 2006. – № 3 (6). – С.18-25.
11. Берг, О.Я. Высокопрочный бетон / О.Я. Берг, Е.Н. Щербаков, Г.Н. Писанко. – М. : Стройиздат, 1971. – 208 с.

УДК 666.972

Э.И. БАТЯНОВСКИЙ, Н.С. ГУРИНЕНКО, И.А. КОРТЯНОВИЧ, Д.А. МИХНЕВИЧ

ТЕОРЕТИКО-ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОБАВОК – УСКОРТЕЛЕЙ ТВЕРДЕНИЯ БЕТОНА

В статье рассмотрены возможные «механизмы» действия добавок-ускорителей твердения бетона. Приведены практические данные использования сульфата натрия в технологии бетона, показывающие эффективность его использования при реализации энергосберегающих технологий в производстве ЖБИ.

Вопросами использования различных добавок в целом и ускорителей твердения в частности и их влияния на структурообразование цементного бетона посвящено множество исследований и накоплено достаточно теоретических представлений о процессах, происходящих при взаимодействии клинкерных минералов с водой и веществом добавки, но, к сожалению, эта проблема, ввиду ее чрезвычайной сложности не решена окончательно и по ряду вопросов имеются разногласия.

Основным критерием эффективности добавок – ускорителей твердения в соответствии с СТБ 1112 является повышение прочности бетона на 20% и более в возрасте 1 суток нормального твердения и на 30% и более в возрасте 2 суток при температуре плюс (5 ± 2) °С. Нормативный документ, который бы классифицировал добавки-ускорители твердения по «механизму» их действия в твердеющем цементе отсутствует. Наиболее широко в странах СНГ известна классификация, предложенная Ратиновым – Розенбергом [1, 2], согласно которой добавки разделяются на четыре класса:

- 1-й – добавки, изменяющие растворимость минеральных вяжущих материалов и не вступающие с ними в химические реакции;
- 2-й – добавки, реагирующие с вяжущими с образованием труднорастворимых или малодиссоциированных комплексных соединений;
- 3-й – добавки – готовые центры кристаллизации («затравки»);
- 4-й – органические поверхностно-активные вещества (ПАВ), способные к адсорбции на поверхности твердой фазы.

В отношении природы эффективности добавок 1, 2 и 3 классов, проявляющейся в повышении темпа роста прочности цементного бетона, существуют различные гипотезы.

Ряд исследователей [3, 4] считают, что основной эффект добавок-ускорителей основан на явлении «*нептитизации*» цементных флокул. Вследствие различных причин (наличие разноименных зарядов на поверхности частиц тонко измельченного цемента, разной дисперсности частиц, сорбции ими паров воды из воздуха, слеживания) мелкие частицы объединяются в агрегаты (флокулы). Самопроизвольная дезагрегация цементных флокул под воздействием молекул воды развивается благодаря возникновению отталкивающих (расклинивающий эффект) усилий тонких пленок жидкости при смачивании поверхности контактирующих частиц вяжущего. В результате в устье таких «трещин» формируются пленки жидкости, переходящие в монослои из ориентированных молекул воды, возникает усилие взаимного отталкивания одноименно заряженных поверхностей ее пленок («эффект Ребиндера») [5, 6].