

Таблица – Сравнительные величины глубины карбонизации бетона.

Авторы	Расход цемента, кг	В/Ц	Глубина карбонизации бетона, мм	
			Фактическая	Расчет
С.Н.Алексеев, Н.К.Розенталь (50 лет эксплуатации)	477	0,40	17,0	14,7
	410	0,45	19,0	20,1
	372	0,50	28,0	27,0
	344	0,55	33,5	33,2
	320	0,60	38,0	49,9
Л.А.Вандаловская, В.И.Бабушкин (1,5 года эксплуатации)	270	0,70	12,0	10,5
	300	0,60	10,0	7,5
	390	0,50	5,5	5,0
	516	0,40	2,0	2,6
	695	0,30	0,0	0,8
	386	0,55	6,5	6,5
	433	0,50	5,0	4,6
	492	0,45	4,5	3,4
	567	0,40	2,0	2,2
	665	0,35	0,0	1,3
	778	0,30	0,0	0,8

Сопоставим также результаты расчета с результатами обследования моста в Ярославской области, описанными в [7]. На момент обследования, проведенного через 23 года после начала эксплуатации, установлено, что средняя толщина бетона защитного слоя составила 28 мм, а с обеспеченностью 95 % – 24 мм. Содержание хлор-ионов в слое толщиной 10 мм составляет 0,6 %, глубина карбонизации бетона – 18,5 мм.

К сожалению, в примере отсутствуют технические характеристики бетона конструкций и условия их эксплуатации (вероятно потому, что они и не нужны для используемой в [7] системы прогноза). Для грубой оценки предположим, что при изготовлении конструкций использован бетон класса В30, а концентрация хлор-ионов во внешней среде составляет около 5 %.

В результате расчетов получаем, что на момент обследования содержание хлор-ионов в приарматурной зоне должно составить около 0,14 % от массы растворной части бетона. Коррозию арматуры по причине накопления ионов хлора сверх критической концентрации следует ожидать через 28 лет после начала эксплуатации для толщины бетона защитного слоя 28 мм или через 21 год для толщины 24 мм. Глубина карбонизации бетона к возрасту 23 года должна составить 17,3 мм. Сравнительный анализ показывает, что значения, прогнозируемые на стадии проектирования состава бетона, и фактические, полученные в результате обследования моста, достаточно близки.

Таким образом, предлагаемая модель прогнозирования долговечности железобетонных конструкций на стадии их изготовления, на наш взгляд, достаточно достоверна. А разработанный на ее основе программный продукт может быть удобным инструментом для направленного модифицирования состава бетона с целью изготовления железобетонных конструкций с заданной долговечностью.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блещик Н.П., Протьюко Н.С., Рыскин М.Н. Математические модели кинетики гидратации цемента. Международная конференция «Инженерные проблемы современного бетона и железобетона». – Минск, 1997 – с. 25-36.
2. Бабицкий В.В. Прогнозирование степени гидратации цемента. Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке кадров Республики Беларусь: Сборник трудов VII Международного научно-методического семинара / Под ред. Блещика Н.П., Борисевича А.А., Пецольда Т.М. – Брест, БГТУ, 2001 – с. 211-215.
3. Zbigniew Scislawski. Korozja i ochrona zbrojenia. – Warszawa, 1972.
4. Шевяков В.П. Проектирование защиты строительных конструкций химических предприятий от коррозии. – М.: Стройиздат, 1984. – 168 с.
5. Никитин В.И., Ракецкий В.М., Лапко А., Прусел И.А. Гидротермическое воздействие на цилиндрические стенки железобетонных силосов. В кн. Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке кадров Республики Беларусь: Сборник трудов VII Международного научно-методического семинара / Под ред. Блещика Н.П., Борисевича А.А., Пецольда Т.М. – Брест, БГТУ, 2001 – 550 с.
6. Гусев Б.В., Степанова В.Ф., Чернышук Г.В. Модель расчета коррозионной стойкости бетона при воздействии агрессивной углекислоты воздуха // Бетон и железобетон. – 1999. – № 1. – С. 27-28.
7. Васильев А.И. Вероятностные оценки срока службы эксплуатируемых автодорожных мостов в условиях коррозии арматуры. // Бетон и железобетон. – 2003. – № 2. – С. 17-20.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МОРОЗОСТОЙКОСТИ БЕТОНА

Морозостойкость является одной из важнейших характеристик бетона, определяющих долговечность бетонных и железобетонных конструкций. Можно отметить два важнейших направления исследований в этой области бетоноведения: во-первых, создание надежных методов прогнозирования морозостойкости еще на стадии проектирования состава бетона, и, во-вторых, получение такой морозостойкости бетона, которая гарантировала бы многолетнюю эксплуатацию конструкций без риска их размораживания.

В основе любой системы прогнозирования какого-либо свойства материала лежит соответствующая математическая модель. В литературе приведены достаточно многочисленные модели прогноза морозостойкости, основывающиеся на разнообразных влияющих факторах. На наш взгляд, нет необходимости в их подробном анализе, поскольку это уже реализовано. Так, например, в [1] после критического рассмотрения разнообразных методик прогнозирования морозостойкости бетона, в том числе и общеизвестного выражения, полученного Г.И. Горчаковым, связывающего число циклов замораживания-оттаивания (M) с капиллярной пористостью бетона (Π_k в %)

$$M = (12 - \Pi_k)^{2,7}, \text{ циклы,} \quad (1)$$

еще раз подтвержден вывод о преобладающей связи морозостойкости бетона с его структурой.

В развитие этой идеи А.Е. Шейкиным и Л.М. Добшицем [1] предложен некий интегрированный параметр, названный ими «критерием морозостойкости» ($K_{Мрз}$), позволивший обобщить множество факторов, воздействующих на морозостойкость бетона через его структуру. Применимость критерия исходит из предположения о том, что объем воды, выдавливаемый в результате ее замораживания, должен быть не менее объема резервных пор. Поскольку резервная пористость цементного камня характеризуется условно замкнутой ($\Pi_{уз}$ в %), а общий объем замерзающей воды – интегральной ($\Pi_{и}$ в %), то можно записать

$$K_{Мрз} = \frac{\Pi_{уз}}{0,09 \cdot \Pi_{и}}. \quad (2)$$

В свою очередь, при известных величинах степени гидратации цемента (α) и водоцементного отношения выражение (2) преобразуется в

$$K_{Мрз} = \frac{0,456 \cdot \alpha}{\frac{B}{C} - 0,271 \cdot \alpha}. \quad (3)$$

В конечном итоге, согласно (3), морозостойкость бетона определяется водоцементным отношением и степенью гидратации цемента. При этом авторы [1] акцентируют внимание на решающей роли степени гидратации цемента в морозном разрушении бетона: «...морозостойкость цементных бетонов при прочих равных условиях (в том числе и при одинаковых значениях B/C) в первую очередь характеризуется степенью гидратации цемента, которая определяет способность образования в цементном камне бетона условно-замкнутых (резервных) пор. Следовательно, повышение степени гидратации цемента до начала замораживания бетона увеличивает морозостойкость бетона, а потому все факторы, влияющие на степень гидратации цемента, будут оказывать влияние и на морозостойкость бетона. Такими факторами являются вид, активность, тонкость помола и гранулометрия цемента, возраст бетона и условия твердения до замораживания, наличие химических добавок в цементе и др.»

Анализ такой модели прогнозирования позволил авторам [1] сделать вывод о том, что она вполне работоспособна при прогнозе морозостойкости бетона еще на стадии проектирования состава бетона, позволяет оценивать морозостойкость уже затвердевшего бетона, а также намечать пути повышения морозостойкости. Отмечается универсальность модели, поскольку она применима не только для традиционного тяжелого бетона, но и для набрызг-бетона, прессованного бетона, а также и ячеистого, что доказано статистическим анализом разнообразных экспериментов. При этом в расчетах учтено и влияние химических добавок, в том числе воздухововлекающих. Авторы сопоставили тео-

ретическую модель с фактическими экспериментальными данными, включая и результаты иных исследований, и выявили многочисленные технологические факторы, воздействующие на количественное значение критерия морозостойкости. Однако при проведении расчетов, при всей важности оценки влияния факторов на критерий морозостойкости, следует рассчитывать морозостойкость материала непосредственно в циклах стандартных испытаний.

Для перехода от критерия $K_{Мрз}$ к морозостойкости, оцениваемой по числу циклов стандартных испытаний замораживания-оттаивания при температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, авторы [1] воспользовались экспериментальными данными Г.И. Горчакова и получили соответствующий график, явившийся градуировочным (рис. 1).

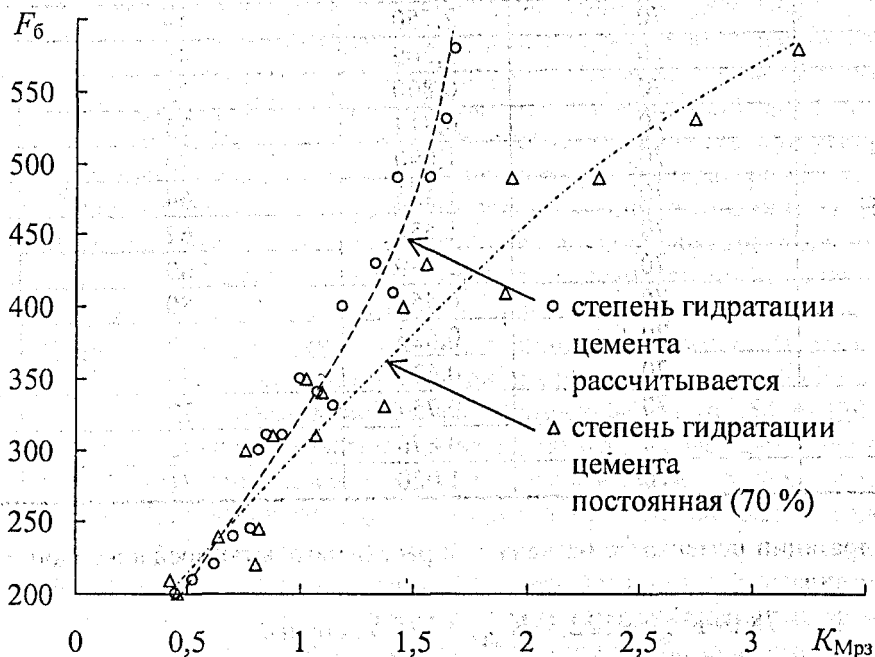


Рисунок 1 – Зависимость морозостойкости бетона (F_6 в циклах) от критерия морозостойкости ($K_{Мрз}$)

Казалось бы, полученная модель вполне совершенна, апробирована и вполне достаточна для прогнозирования морозостойкости бетона. Но следует отметить тот важный факт, что для расчетов по выражению (3), как и по (1), предварительно необходимо знать степень гидратации цемента. И только при известных величинах степени гидратации цемента можно обеспечить достаточную точность расчетов. К сожалению, в [1] степень гидратации цемента, несмотря на перечисленные в приведенной выше цитате влияющие факторы, не рассчитывают, а принимают равной 70 %. Кстати, такая же недооценка важнейшего непрерывно изменяющегося технологического параметра отмечается и в иных литературных источниках.

В то же время известно, что степень гидратации цемента, обуславливающая (естественно, при прочих равных условиях) все многообразие свойств цементного камня и бетона на различных стадиях его твердения, есть функция многочисленных факторов и, как показано в [2] и [3], может успешно прогнозироваться. И если подставить уже рассчитываемое, а не назначаемое, значение степени гидратации цемента в выражение (3), то получаются и иные величины критерия морозостойкости (табл.).

При обработке приведенных в [1] данных Г.И. Горчакова, взятых за основу при построении градуировочного графика, можно получить зависимость морозостойкости бетона ($F_ц$) от критерия морозостойкости ($K_{Мрз}$) не в графической интерпретации, а, что существенно удобнее при расчетах, в виде аналитического выражения. Так, при постоянном значении степени гидратации цемента кривая описывается полиномом второй степени

$$F_ц = -19,8 \cdot K_{Мрз}^2 + 200,4 \cdot K_{Мрз} + 136,6, \text{ циклы} \quad (4)$$

Коэффициент корреляции при этом составляет 0,948.

Таблица – Морозостойкость и критерий морозостойкости бетона

Данные Г.И. Горчакова		По данным [1]		Расчет	
В/Ц бетона	Фактическая морозостойкость бетона, циклы	Степень гидратации цемента, заданная согласно [1], %	$K_{Мрз}$ из табл.9 [1]	Степень гидратации цемента, рассчитанная по модели [3], %	$K_{Мрз}$ по (3)
0,581	310	70	1,065	72	0,853
0,470	330	70	1,370	70	1,142
0,360	410	70	1,907	61	1,408
0,300	490	70	2,321	54	1,575
0,270	530	70	2,750	49	1,638
0,240	580	70	3,209	44	1,688
0,755	220	70	0,800	75	0,623
0,622	245	70	0,814	73	0,783
0,490	340	70	1,090	70	1,075
0,422	400	70	1,455	64	1,183
0,382	430	70	1,556	62	1,334
0,353	490	70	1,939	60	1,430
1,030	200	70	0,452	80	0,451
0,885	210	70	0,423	78	0,525
0,675	240	70	0,634	74	0,709
0,600	300	70	0,754	72	0,819
0,550	310	70	0,876	72	0,916
0,518	350	70	1,020	71	0,994

Если же степени гидратации цемента не назначать, а рассчитывать по предложенной в [3] модели, то зависимость имеет вид

$$F_c = 78,0 \cdot K_{Мрз}^2 + 122,3 \cdot K_{Мрз} + 125,5, \text{ циклы}, \quad (5)$$

а коэффициент корреляции при этом возрастает до 0,981.

Нетрудно убедиться в том, что математическая модель прогнозирования степени гидратации цемента ([2] или [3]) достаточно просто встраивается в уже существующие отработанные модели прогнозирования морозостойкости при существенном повышении точности прогноза. Интересно также, что изменился и сам характер хода кривой (рис. 1) – из затухающей она превращается в нарастающую.

Выражение (5) легко интегрируется в систему проектирования состава бетона, обеспечивая расчет требуемого водоцементного отношения исходя не только из проектной прочности, но и морозостойкости бетона. Вначале по известному значению требуемой прочности бетона рассчитывают водоцементное отношение бетонной смеси. Затем определяют водоцементное отношение цементного теста и уже по этому значению, с учетом минералогического состава вяжущего, а также вида и количества химических добавок, рассчитывают степень гидратации цемента. По выражению (3) определяют критерий морозостойкости, а по выражению (5) – число циклов замораживания-оттаивания по стандартной методике. Если оно равно или превышает проектную марку бетона по морозостойкости, то далее по традиционной схеме рассчитывают состав бетона: по заданной удобоукладываемости – расход воды, затем расход цемента и т.д. В противном случае на некоторую величину снижают водоцементное отношение и производят перерасчет морозостойкости, добиваясь соответствия проектному значению. Уточняют прочность бетона, которая, естественно, будет выше проектной, а дальнейший расчет осуществляют по традиционной схеме. Такая схема расчета, не требующая решения системы уравнений, не совсем удобна при ручном счете, но достаточно совершенна при использовании ЭВМ.

Рассмотрим также и проблему повышения морозостойкости бетона. Существует достаточно широкая гамма методов увеличения морозной устойчивости бетона, и одним из определяющих среди них является снижение водоцементного отношения. Кардинальный же метод снижения водоцементного отношения – реализация приема «сухого формования». В результате, морозостойкость такого бетона может характеризоваться маркой F1000 (при водоцементном отношении около 0,28 и повторном – после водонасыщения – виброуплотнении бетонной смеси) [4]. Интерес представляет выявление основных факторов, влияющих на морозостойкость особо плотного материала, полученного по указанной технологии.

Образцы (цилиндры диаметром 42 мм и высотой до 50 мм) изготавливали посредством прессования насыпанного в пресс-форму сухого порошка – цемента или клинкера, размолотых до удельной поверхности от 300 до 600 м²/кг. Прессование осуществляли при давлениях 5, 10, 20, 40 и 70 МПа, что позволяло получать водоцементное отношение цементного теста в пределах от 0,115 до 0,231 (относительное водосодержание – от 0,462 до 0,728). При изготовлении отдельных серий образцов вяжущее перед и в процессе прессования вакуумировали при давлении от 0,01 до 0,0001 МПа, что позволяло полностью исключить попадание воздуха в систему «вяжущее–вода», активировать процессы твердения и создать более однородную структуру цементного камня. Пропитку уплотненного вяжущего производили при избыточном давлении 0,1 МПа (при отсутствии в технологической цепочке вакуумирования) или при атмосферном давлении в случае вакуумирования вяжущего. Вода, используемая для насыщения вяжущего водой, предварительно подвергалась вакуумной деаэрации с целью удаления растворенных газов. Варьирование перечисленными переменными позволило положить в основу эксперимента 12 различных составов, до испытаний твердевших 28 суток в нормально-влажностных условиях. Испытания на морозостойкость осуществляли ускоренным методом посредством замораживания насыщенных водой образцов при температуре -50 °С в воздушной среде камеры, чтобы исключить влияние на процесс деструкции хлористого натрия. Периодически, через каждые 5 циклов замораживания (после оттаивания в воде), определяли скорость ультразвуковых колебаний и относительные объемные деформации. Как предварительно было установлено, момент резкого устойчивого снижения скорости ультразвука и роста деформаций вполне корректно соответствует стадии лавинного образования микротрещин и снижения морозостойкости цементного камня. Полученные циклы ускоренных испытаний приводили к циклам испытаний по стандартной методике.

Как оказалось, цементный камень имел морозостойкость от 350 до 1200 циклов стандартных испытаний. На рис. 2 приведена взаимосвязь начального водосодержания цементного теста, характеризующего его относительным водосодержанием, с числом циклов замораживания-оттаивания. Характер расположения экспериментальных точек говорит о том, что начальное водосодержание цементного теста не может прямо определять стойкость цементного камня к морозной деструкции. Внешне хаотично также и влияние капиллярной пористости цементного камня, рассчитываемой по общеизвестным формулам с учетом прогнозируемой по [3] степени гидратации цемента, на морозную деструкцию цементного камня (рис. 3). Расчет морозостойкости материала по зависимостям (1) и (3) показал, что коэффициенты вариации отклонений расчетных значений от фактических составили для них соответственно 36,6 и 35,8 %. Следовательно, эти выражения не могут быть основой для разработки математической модели прогнозирования морозостойкости особо плотного цементного камня.

Однако, взяв за основу общепризнанную гипотезу о первоочередном влиянии капиллярной пористости цементного камня на его морозную деструкцию, с учетом дополнительных влияющих факторов, получена следующая зависимость

$$F_{\text{цк}} = 0,1 \cdot (1 + 0,3 \cdot \sqrt{n_d}) \cdot (1 - 1 \cdot 10^{-8} \cdot (S_{\text{уд}} - 300)^3) \cdot (20 - \Pi_k)^3, \text{ циклы.} \quad (6)$$

В соответствии с выражением (6), морозостойкость цементного камня сухого формирования определяется не только его капиллярной пористостью, но также глубиной вакуумирования (характеризуется числом десорбированных с поверхности частиц вяжущего слоев воздуха n_d) и удельной поверхностью сухого вяжущего ($S_{\text{уд}}$). Статистическая проверка предложенной модели показала, что расчеты по (6) существенно точнее, чем по (1) и (3) – коэффициент вариации равен 13,8 %.

В принципе, полученные для особо плотного цементного камня данные по морозостойкости лежат в створе современных основополагающих представлений в бетоноведении – сопротивляемость цементного камня морозному разрушению возрастает с уменьшением его капиллярной пористости. Что касается ярко выраженного влияния тонкости помола вяжущего на морозостойкость цементного камня, то оно имеет отражение в литературе и объясняется снижением трещиностойкости материала, изготовленного на вяжущем тонкого помола. Выявленное же повышение морозостойкости со снижением давления вакуумирования (возрастанием числа десорбированных с поверхности вяжущего слоев воздуха) связано, по-видимому, с более равномерными процессами гидратации цемента и повышением однородности структуры особо плотного цементного камня.

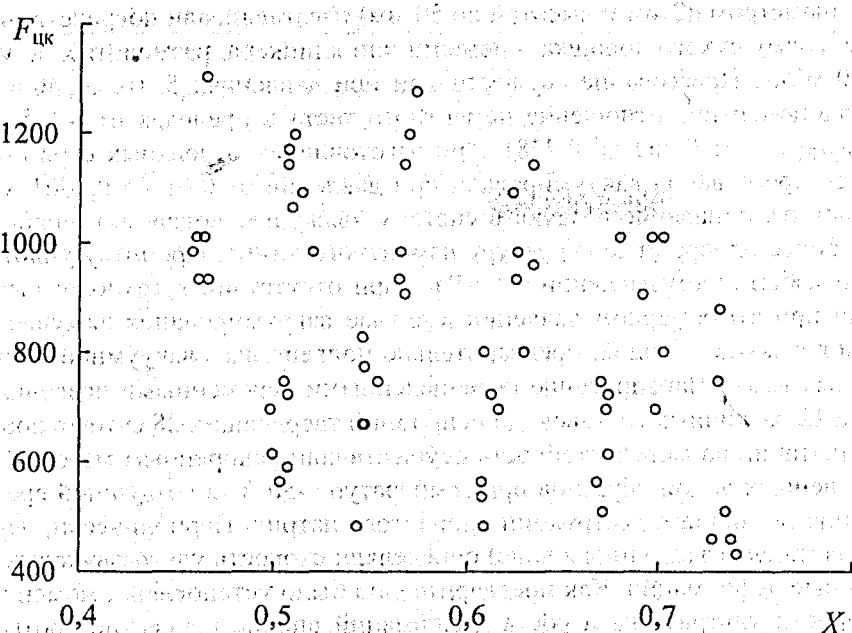


Рисунок 2 – Зависимость морозостойкости цементного камня ($F_{цк}$) от относительного водосодержания цементного теста (X)

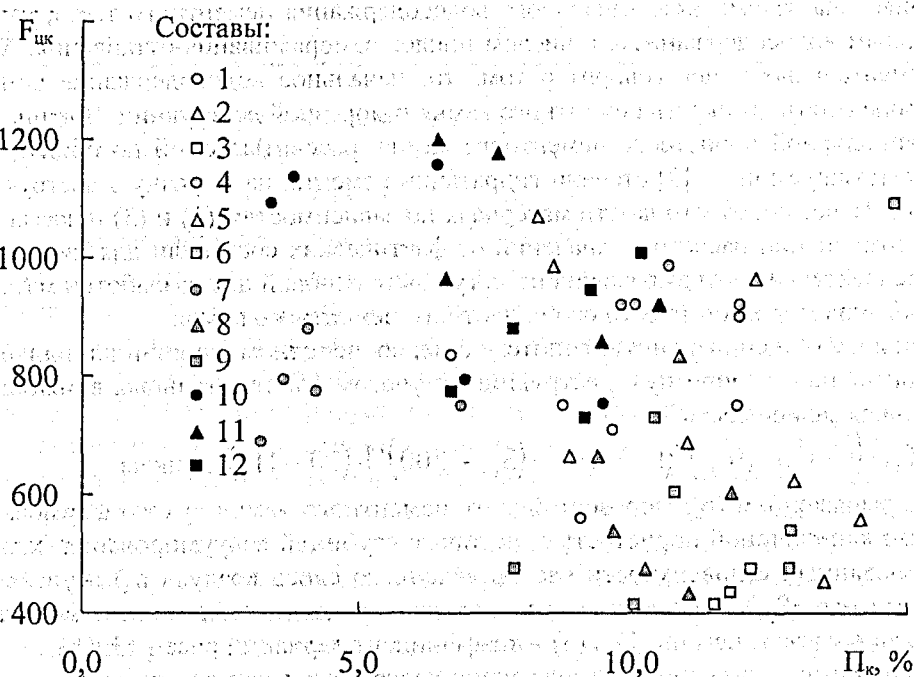


Рисунок 3 – Зависимость морозостойкости цементного камня ($F_{цк}$) от капиллярной пористости цементного камня (P_k)

ВЫВОДЫ

Разработана математическая модель прогнозирования морозостойкости тяжелого бетона, основывающаяся на традиционных зависимостях, связывающих морозостойкость бетона с его структурными особенностями, но рассматривающая структуру бетона как функцию динамически изменяющейся степени гидратации цемента.

Получен, изучен и математически описан особо плотный цементный камень, существенно превосходящий по морозостойкости существующие материалы на основе цементных вяжущих.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шейкин А.Е., Добшиц Л.М. Цементные бетоны высокой морозостойкости. – Л.: Стройиздат, Ленингр. отделение, 1989. – 128с.
2. Блещик Н.П., Протько Н.С., Рыскин М.Н. Математические модели кинетики гидратации цемента. Международная конференция «Инженерные проблемы современного бетона и железобетона». – Минск, 1997 – с. 25-36.
3. Бабицкий В.В. Прогнозирование степени гидратации цемента. Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке кадров Республики Беларусь: Сборник трудов VII Международного научно-методического семинара / Под ред. Блещика Н.П., Борисевича А.А., Пецольда Т.М. – Брест, БГТУ, 2001 – с. 211-215.
4. Батяновский Э.И. Особо плотный бетон сухого формования. Монография. / Э.И. Батяновский – Мн.: НПО-ОО «Стринко», 2002 – 224.

УДК 624.014.059.3.002

Башкевич И.В., Яковенко Н.В.

ОБ ОБЕСПЕЧЕНИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ПРОИЗВОДСТВА

ВВЕДЕНИЕ

В практике строительства часто возникает необходимость восстанавливать и усиливать конструкции частично разрушенных или поврежденных при эксплуатации зданий и сооружений. Во многих случаях, как показывает опыт, их восстановление с использованием частично сохранившихся и даже поврежденных конструкций целесообразно и экономически выгодно. Однако при разработке восстановления таких конструкций часто возникают трудности с определением фактической несущей способности оставшихся конструкций, в частности, при существенном коррозионном износе.

Поэтому возникает необходимость в определении несущей способности поврежденных физическим износом конструкций. Многочисленными натурными наблюдениями выявлена специфическая особенность работы конструкций, подвергшихся температурно-влажностным воздействиям и коррозионному износу.

Рассмотрим это на одном из примеров - конструкции склада песка РУПП «Гранит», строительство которого осуществлено в 1976 г.

КРАТКАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СКЛАДА

Склад служит для перегрузки и временного хранения песка. Он занимает площадку 50×120 м, на которой расположена надштабельная транспортно-разгрузочная галерея, представляющая собой горизонтальное сооружение, в котором расположены ленточные транспортеры. Отметка низа пролетного строения 15,6 м.

Галерея состоит из трех однотипных блоков шириной 7 м и узла перегрузки. Поперечный разрез склада песка приведен на рис. 2.

Опорами пролетных строений являются монолитные железобетонные колонны круглого сечения диаметром 1,75 м.

Основными несущими конструкциями пролетных строений склада являются стальные сварные фермы с параллельными поясами номинальными пролетами 36 м и высотой 6,5 м (по обушкам). Размеры панелей нижнего пояса составляют 6 м, а для уменьшения расчетной длины сжатого верхнего пояса и раскосов предусмотрена дополнительно шпренгельная решетка. Сечения стержней из парных уголков тавровые, за исключением стоек, которые имеют крестовое сечение.

По верхним поясам ферм с шагом 6 м уложены металлические двускатные сварные балки покрытия двутаврового сечения. По балкам уложены сборные железобетонные плиты размером $1,5 \times 6$ м. В качестве утеплителя использован керамзитобетон. Кровля рулонная.

К выпускам фасонки нижних узлов ферм с шагом 6 м подвешены металлические сварные балки двутаврового сечения со стенкой размерами 710×8 мм и поясами 240×12 мм. По балкам уложены сборные железобетонные плиты размерами $1,5 \times 6$ м. Утепление перекрытия обеспечивается за счет пеносиликатных плит толщиной 100 мм, пол - бетонный толщиной 40-50 мм.