

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОДГОТОВКИ СТУДЕНТОВ
СПЕЦИАЛЬНОСТИ «ПРОМЫШЛЕННОЕ
И ГРАЖДАНСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО»**

(г. Минск, БНТУ — 24.05.2011)

УДК 691.328

**ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ТВЕРДЕНИЯ И КАЧЕСТВА УПЛОТ-
НЕНИЯ НА ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
БЕТОНА**

БОНДАРОВИЧ А.И., БАТЯНОВСКИЙ Э.И.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Приведены важнейшие экспериментальные данные наиболее значимых работ в этой области, позволяющие понять физическую суть процессов, развивающихся в объеме формуемой вибрированием бетонной смеси и обеспечивающих в дальнейшем плотность, прочность и непроницаемость бетона, которые являются необходимыми условиями его долговечности.

Выполнены экспериментальные исследования по кинетике водопоглощения вибропрессованного бетона в различные сроки твердения, влияния на этот процесс качества и свойств заполнителей (мелкого и крупного), степени уплотнения (по средней плотности бетона), условий твердения. Установлена зависимость от этих факторов непроницаемость бетона под давлением воды по значениям водонепроницаемости (W) и коэффициента фильтрации (K_f).

Исследовано влияние условий твердения (нормальные; воздушно-сухие; пропаривание с дозреванием на воздухе) на проницаемость и прочность бетона.

В исследованиях использовали материалы для бетона со следующими характеристиками.

В качестве вяжущего использовали портландцемент марки ПЦ 500-ДО ПО «Кричевцементошифер».

В качестве мелкого заполнителя использовали природный песок мытый, заславльского и крапужинского месторождений.

В качестве крупного заполнителя использовали щебень гранитный (марка по дробимости “1400”) микашевичского месторождения обычного дробления (№ 1) и кубовидной формы (№ 2)

В настоящих исследованиях использовали цементно-песчаный бетон и бетон со щебнем гранитным при водоцементном отношении В/Ц $\sim 0,33 \dots 0,36$ и $0,36 \dots 0,40$, соответственно, при показателе жесткости $J \sim 15 \dots 25$ 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) его уплотнения. Последнюю оценивали по средней плотности свежестоформованного бетона, принятую равной для цементно-песчаного бетона при постановке различных экспериментов 2250 кг/м^3 , а со щебнем – $2300, 2350, 2400$ и 2430 кг/м^3 .

Качество (степень) уплотнения, как технологический фактор, влияющий на проницаемость бетона и другие его физико-технические свойства, исследовали, варьируя среднюю плотность бетона за счет изменения эффективности уплотнения при формовании образцов.

Фактор времени твердения бетона и его роль в изменении проницаемости оценивали, отслеживая кинетику изменения водопоглощения, используя стандартную методику и водонасыщение под вакуумом бетона в возрасте 3, 7, 14 и 28 сут твердения.

Периодичность испытаний, начиная с 3 сут твердения образцов бетона без пропаривания, обусловлена фактическими режимами твердения изделий – элементов благоустройства на предприятиях отрасли и тем обстоятельством, что при классе С20/25 проектная прочность бетона (при обеспеченности 0,95 и коэффициенте вариации $V_t = 0,135$) составляет 32 МПа, а отпускная прочность бетона: $0,9 \times 32 \approx 29$ МПа, и достигается, как правило, к исходу 3 суток. В летний период по истечении этого времени продукция вполне может быть отпущена потребителю.

Периодичность испытаний пропаренных (режим: предварительная выдержка – 2 ч; подъем температуры в лабораторной ямной ка-

мере до 50 0С – 2 ч; изотермическая выдержка и при $t_p = 50$ 0С – 6,5 ч; остывание образцов бетона вместе с камерой – 6...10 ч) образцов была принята, включая немедленные после распалубки испытания (практически, не позднее 24 ч после их изготовления), а также через 28 сут. Низкотемпературный прогрев бетона принят исходя из соображений обеспечения роста плотности и прочности бетона в дальнейшем, что и подтверждается данными наших исследований. Повышение температуры изотермического прогрева сверх 50 0С обеспечивает рост прочности бетона сразу после пропаривания, но замедляет его при последующем твердении. В случае использования цемента 1-ой группы эффективности при пропаривании прогрев при $t > 70$ 0С может приостановить процесс последующего набора прочности бетоном полностью. Это явление обусловлено тем, что при высокой температуре вокруг цементных «ядер» (по Юнгу-Ахвердову) достаточно быстро формируется плотная и непроницаемая для воды «каемка» новообразований, способная остановить реакции гидратации цемента. Одновременно же ее толщина и объем новообразований, возникших в процессе реакций гидратации, недостаточны для создания слитной и плотной структуры цементного камня в бетоне. Как следствие, увеличивается его капиллярная пористость, растет проницаемость и соответственно снижаются эксплуатационные характеристики бетона.

Влияние условий твердения бетона на его проницаемость и другие физико-технические свойства оценивали, моделируя условия нормально-влажностного твердения (относительная влажность среды $\phi \geq 90$ %, температура – $t \sim 20$ в 5 0С); воздушно-сухие ($\phi \approx 65...70$ %; $t \sim 18...22$ 0С), при хранении образцов открытыми в помещении лаборатории; естественные, при которых образцы помещали в полиэтиленовый мешок и хранили в помещении лаборатории; пропаривание (с укрытием поверхности образцов с целью исключения попадания конденсата в бетон) по ранее приведенному режиму, а до 28 суток образцы твердели в камере с нормально-влажностным режимом.

Учитывая, что в процессе исследований идет накопление эмпирического материала для выработки общих рекомендаций, важно отследить возможные изменения их свойств не только во времени,

но и в сравнении влияния одних и тех же факторов на мелкозернистый бетон и бетон с крупным заполнителем.

Как это следует из анализа литературных данных, а так же накопленного опыта испытаний образцов бетона, натуральных испытаний и обследований изделий-элементов благоустройства, существует непосредственная связь между эксплуатационной надежностью и долговечностью бетона (способностью без нарушения переносить продолжительное комплексное физико-химическое воздействие) и его проницаемостью. Последняя характеризуется наличием и объемом открытой капиллярной пористости и может быть количественно оценена величиной водопоглощения бетона (особенно при насыщении его под вакуумом). Качественная оценка диффузионной способности открытой капиллярной пористости может быть получена по фильтрационной проницаемости бетона, то есть по величинам коэффициента фильтрации и водонепроницаемости. В совокупности эти характеристики дают возможность оценить бетон с позиций количества поглощаемой им воды (а значит и последующего воздействия на бетон при замораживании-оттаивании) и диффузии растворов солей в его «поровом пространстве», вызывающих «солевую коррозию» и усиливающих деструктивное воздействие мороза.

На начальном этапе экспериментов исследовали кинетику водопоглощения бетона в зависимости от изменения технологических факторов, затем для основных значений последних определяли водонепроницаемость и коэффициент фильтрации бетона. Параллельно отслеживали изменения кинетики роста прочности бетона в состоянии естественной влажности для различных условий твердения и в водонасыщенном состоянии разной степени.

Во всех случаях при изготовлении образцов бетона для испытаний смесь уплотняли до получения расчетной средней плотности свежееотформованного бетона. «Внутри» серии образцов ее отличие составляло не более 20 кг/м³.

Во всех случаях, кроме отдельно оговоренных в соответствующих разделах отчета, для мелкозернистого бетона использован базовый состав цементно-песчаного бетона: расход цемента Ц = 500 кг, расход сухого песка П = 1600 кг, расход воды В ≈ 160...170 л при В/Ц ≈ 0,33...0,34, показателе жесткости смеси: Ж ≈ 20...30 с,

примерно соответствующий традиционным производственным составам цементно-песчаного бетона, а для изготовления образцов бетона со щебнем использовали составы характеризующиеся расходом цемента 350...500 кг, щебня гранитного 400...800 кг, песка крапужинского карьера 900...1400 кг на 1 м³ бетона и воды 160...180 л при водоцементном отношении 0,36...0,4 и показателе жесткости смеси 15...25 с. Изменения состава, связанные с изменением содержания цемента в бетоне, приведены в соответствующих разделах отчета.

Данные по определенным в исследованиях характеристикам бетона получены как средние значения (при количестве образцов в серии 6...12 шт и более) с соблюдением правил обработки результатов испытаний, установленных в соответствующих стандартах.

Методики и особенности проведения отдельных экспериментов приведены в соответствующих разделах.

Исследование изменений в водопоглощении бетона под влиянием различных технологических факторов осуществляли с использованием основных положений ГОСТ 12730.3. и нестандартной методики водонасыщения под вакуумом со степенью разрежения, соответствующей $P_{раз} \approx - 0,095$ МПа (остаточное давление или «давление вакуумирования») $P_{вак} \approx 0,005$ МПа).

Образцы бетона, твердевшие в различных условиях 3, 7, 14, 28 и 90 сут, помещали в воду и, в соответствии с положением ГОСТ 12730.3, определяли количество поглощенной за 24 ч воды. Затем ванну с водой и размещенными в ней образцами (уровень воды не доходил до верхней грани образцов на $\approx 30...35$ мм) помещали в вакуумный шкаф, в котором создавали разрежение, и выдерживали в общей сложности еще 24 ч. После чего определяли как дополнительное количество поглощенной воды, так и общее водопоглощение бетона. Проверка на возможное «донасыщение» образцов 28 суточного возраста по стандартной методике после 24 ч водонасыщения их под вакуумом показала отсутствие прироста их массы. То есть, полученные при вакуумировании значения водопоглощения не ниже соответствующих истинному водопоглощению бетона.

При изготовлении образцов (70x70x70 мм) принят базовый состав мелкозернистого бетона: Ц = 500 кг; П = 1600 кг; В/Ц $\approx 0,34$; степень уплотнения характеризуется средней плотностью свежееот-

формованного бетона $\rho_{bc} \sim 2250$ кг/м³; базовый состав бетона с обычным щебнем: Ц = 450 кг; П = 1150 кг; Щ = 600 кг; В ~160...170 л (при В/Ц $\approx 0,36...0,38$); жесткость 15...20 с и средней плотностью свежееотформованного бетона $\rho_{bc} \approx 2350$ кг/м³.

По полученным в исследованиях и приведенным в таблице 1. данным требуемое по СТБ 1071-97 и СТБ 1097-98 для бортовых камней и тротуарных плит водопоглощение по массе в проектном 28-суточном возрасте (составляющее $W_m \leq 6\%$ для мелкозернистого, а для бетона с крупным заполнителем: $W_m \leq 5\%$), обеспечивают нормально-влажностные условия твердения, пропаривание с дозреванием и естественное твердение в условиях влагоизоляции образцов бетона. К 90 суткам твердения в этих условиях водопоглощение по массе мелкозернистого бетона снижается до величин 2...3,6 %, а образцов, хранившихся в воздушно-сухих условиях, до 4...5 %.

Водонасыщение под вакуумом, в отличие от стандартного метода, создает условия для заполнения капиллярных пор бетона, которые в обычных (стандартных) условиях водонасыщения не заполняются водой из-за противодействия заземленной газообразной фазы, что и отражается в росте количества «поглощаемой» жидкости и водопоглощения бетона.

Тенденция роста количества поглощаемой бетоном воды непосредственно связана с условиями его твердения.

Так, условия твердения, ограничивающие развитие процесса гидратации цемента и приводящие к испарению воды затворения, а в общем итоге к росту капиллярной пористости (например, воздушно-сухие), вызывают рост объема поглощаемой воды в разные сроки твердения и водопоглощения бетона, как в проектном, так и более позднем возрасте. При этом в период активного твердения бетона (до 28 сут.) возрастает как абсолютное, так и относительное количество поглощаемой воды. Например, для 3, 7, 14 и 28 сут. воздушно-сухого твердения образцов мелкозернистого бетона количество «поглощаемой» воды составляет: 47; 80; 96 и 108 л на 1 м³ и для бетона со щебнем: 35, 57, 80 и 91 л, что больше, чем при других исследованных условиях твердения. Это есть количественное отражение роста капиллярной пористости бетона, вызванного замедлением процесса гидратации цемента и снижением степени его гидратации.

Таблица 1. Зависимость количества поглощаемой воды и W_m от времени и условий твердения бетона

Условия твердения бетона	Условия водонасыщения бетона	Количество поглощаемой 1 м ³ бетона воды (кг) в возрасте, сут.:				W_m , %, в 28 сут	W_m , %, в 90 сут
		3	7	14	28		
1. Мелкозернистый бетон							
Нормально-влажностные	ГОСТ	29	52	63	68	5,5	3,1
	После вакуум.	36	68	82	86	6,4	3,5
Воздушно-сухие	ГОСТ	38	66	70	91	6,8	4,2
	После вакуум.	47	80	96	108	8,7	5,0
Естественные (под пленкой)	ГОСТ	25	44	56	60	4,9	2,0
	после вакуум.	31	56	64	75	5,5	2,4
После пропаривания*	ГОСТ	76*	-	-	-	6,8	-
	после вакуум.	94*	-	-	-	8,8	-
Нормально-влажностные после пропаривания	ГОСТ	-	-	-	75	5,2	3,6
	после вакуум.	-	-	-	98	6,4	4,4
2. Бетон со щебнем фр. 5...10 мм							
Нормально-влажностные	ГОСТ	20	36	52	59	4,3	-
	после вакуум.	22	42	64	73	5,1	-
Воздушно-сухие	ГОСТ	29	46	65	76	5,2	-
	после вакуум.	35	57	80	91	6,5	-
Естественные (под пленкой)	ГОСТ	18	34	42	51	4,2	-
	после вакуум.	20	40	51	65	4,7	-
После пропаривания*	ГОСТ	40*	-	-	-	4,9	-
	после вакуум.	51*	-	-	-	5,4	-

Продолжение табл. 1

Нормально-влажностные после пропаривания	ГОСТ	-	-	-	56	4,5	-
	после вакуум.	-	-	-	76	5,2	-
3. Бетон** со щебнем кубовидной формы фр. 5...10 мм							
Нормально-влажностные	ГОСТ	-	-	-	44	3,6	-
	после вакуум.	-	-	-	62	4,2	-
После пропаривания*	ГОСТ	36*	-	-	-	4,4	-
	после вакуум.	50*	-	-	-	5,0	-

* начало водонасыщения не позднее 24 ч от момента изготовления образцов,

** средняя плотность свежееотформованного бетона с кубовидным щебнем $\rho_{bc} \approx 2400$ кг/м³ при расходе цемента 400 кг.

В это же время процесс водонасыщения образцов бетона одинакового состава и качества уплотнения, но твердевших в других, приведенных в таблице и более благоприятных условиях, характеризуется достаточно стабильным относительным приростом количества поглощаемой воды во все сроки твердения бетона, что отражает нормальное развитие гидратационного процесса и связанное с ним формирование структуры цементного камня и бетона более высокой плотности. Например, для 3, 7, 14 и 28 сут. нормально-влажностных условиях твердения для образцов мелкозернистого бетона в соотношении $B_{\text{вак}}^{\text{погл}} / B_{\text{ГОСТ}}^{\text{погл}}$ будет: 124; 130; 130 и 126 %, то есть практически стабильным весь этот период. Это факт подтверждается оценкой степени гидратации цемента (α) по количеству химически связанной воды в проектном возрасте образцов бетона, твердевших в различных условиях (таблица 2).

В зависимости от условий их твердения степень гидратации цемента составила для образцов мелкозернистого бетона и бетона со щебнем нормально-влажностного твердения и хранившихся в полиэтиленовой упаковке 65...70 %, при воздушно-сухих условиях твердения 55...61 %, после пропаривания $\approx 55\%$, и дозревавших в

нормально-влажностных условиях после пропаривания – до 65 %. Методика этих определений включала дробление до порошкообразного состояния продуктов разрушения бетона при испытании образцов на сжатие (путем выделения фракции размером менее 1,25 мм, доизмельчения ее истиранием), высушивание пробы до постоянной массы при 1100С и прокаливание пробы при температуре ≈ 600 0С. Следует отметить, что бетон с крупным заполнителем характеризуется, при прочих равных условиях, несколько меньшей степенью гидратации цемента, чем мелкозернистый. Этот факт согласуется с известными данными о взаимосвязи степени гидратации цемента, снижающейся при росте плотности бетона. В нашем же случае бетон, содержащий щебень, отформован с более высокой степенью уплотнения, чем мелкозернистый, что отражает объем поглощаемой его образцами воды в процессе водонасыщения как по «ГОСТ», так и под вакуумом.

Данные табл. 1 о тенденции роста «абсолютного» количества воды, поглощаемой бетоном при благоприятных условиях твердения в первые 28 сут., свидетельствуют о развитии процесса связывания воды затворения цементом на реакции гидратации и сопровождающего этот процесс явления «внутреннего вакуума» в твердеющем цементном камне (бетоне). При этом к 7 сут. количество поглощаемой воды за равный период времени начинает снижаться, а к 14 сут. твердения проявляется тенденция стабилизации процесса поглощения воды (прирост количества жидкости от 7 до 14 сут. до 15 л/м³, а от 14 до 28 сут. (при водонасыщении до «постоянной массы») до 9 л/м³.

К 28 суткам «дозревания» пропаренного бетона, которое способствует развитию гидратационного процесса, связыванию воды и снижению капиллярной пористости, водопоглощение образцов мелкозернистого бетона снизилось до 5...6,4 %, а бетона со щебнем – до 4...5 %, что взаимосвязано с ростом степени гидратации цемента примерно до 65 %; к возрасту 90 сут. «пропаренный» бетон характеризуется водопоглощением 3,5...4,5 %.

Выявленные зависимости количественной оценки процесса водонасыщения бетона мелкозернистого и с крупным заполнителем под влиянием условий твердения позволяют оценить общую тенденцию их изменений.

Так, практикуемые достаточно широко (что следует констатировать с сожалением) воздушно-сухие условия твердения бетона (которые ошибочно считают «естественными») изделий - элементов благоустройства по существу недопустимы для цементного бетона, так как приводят к росту его водопоглощения до значений, превышающих нормируемые. В соответствии с этим следует ожидать снижения эксплуатационных свойств бетона.

Таблица 2. Количество химически связанной и испаряемой воды (свободной) в бетоне в расчете на 1 м³

Условия твердения бетона в течение 28 сут.	Вид бетона (мелкозернистый и со щебнем)	Средняя плотность бетона при естественной влажности, кг/м ³	Потери воды при 1100С, кг	Средняя плотность бетона в сухом состоянии, кг/м ³	Потери воды при прокаливании (6000С), кг	Степень гидратации цемента, α, %
1	2	3	4	5	6	7
Нормально-влажностные	мелк.	2245	85	2160	79,4	69,0
	со щебнем	2345	74	2271	68,8	66,5
Воздушно-сухие	мелк.	2220	69	2151	70,7	61,5
	со щебнем	2325	70	2246	58,0	56,0
Естественные (под пленкой)	мелк.	2240	80	2160	80,5	70,0
	со щебнем	2345	88	2257	67,2	65,0
После пропаривания*	мелк.*	2255	106	2143	63,3	55,0
	со щебнем*	2350	92	2246	58,1	56,2
Нормально-влажностные после пропаривания	мелк.	2245	99	2146	75,3	65,5
	со щебнем	2350	88	2254	64,2	62,0

* начало высушивания проб не позднее 24 ч от момента изготовления образцов.

Некоторое превышение качественных характеристик бетона, твердевшего в естественных условиях «под пленкой» над образцами «нормально-влажностного твердения» связано со следующим. В лабораторной камере режим твердения характеризовался относительной влажностью $\phi \geq 90\%$ при температуре $t \sim 15...20\text{ }^{\circ}\text{C}$. А замкнутый ограниченный объем полиэтиленовой упаковки, хранившейся в помещении лаборатории, обеспечил $\phi \geq 95\%$ при аккумуляции теплоты экзотермии гидратирующегося цемента, что способствовало некоторому превышению температуры (особенно в первые 3 сут твердения) среды твердения этих образцов, по сравнению со средой камеры. Необходимо подчеркнуть, что системное использование этого приема в производственных условиях («парникового» эффекта) может дать существенный экономический эффект в сочетании с благоприятным воздействием на качественные характеристики бетона.

Анализ результатов экспериментов по установлению закономерностей влияния условий и времени твердения бетона на количество (объем) поглощаемой им воды при водонасыщении свидетельствует о следующем. Активное развитие в первые 28 суток процессов гидратации цемента, формирования и становления структуры (пористости) цементного камня способствует переходу значительной части воды затворения в химико-физически связанное состояние. Формующиеся в результате взаимодействия клинкерных минералов с водой новообразования (в виде кристаллогидратов силикатов, алюминатов, ферритов) занимают несколько меньший объем, чем начальный суммарный объем системы: «цемент + вода + защемленный воздух». В результате одновременно образуется пористость, способная заполниться водой, т.к. обладает определенным потенциалом «капиллярного подсоса» и гидрофильностью твердой фазы (стенок формирующихся капилляров). Этот эффект усиливается в воздушно-сухих условиях твердения цементного камня и бетона в целом за счет, с одной стороны, испарения части воды затворения, а с другой – из-за торможения в силу этого реакций гидратации цемента (за 28 сут. степень гидратации $\alpha \sim 55...60\%$, табл. 2). В результате возрастает открытая пористость, что отражается в росте количества поглощаемой бетоном воды и величине водонасыщения.

Из приведенных данных о кинетике и количестве поглощаемой бетоном воды следует, что бетон, приготовленный с использованием крупного заполнителя – гранитного щебня, обладает более высоким качеством (степенью) уплотнения, меньшей по объему пористостью. Как следствие, образцы бетона со щебнем характеризуются меньшим количеством поглощаемой при водопоглощении жидкости и величиной водопоглощения, что является предпосылкой для повышения его эксплуатационных характеристик.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Десов, А.Е. Вибрированный бетон / А.Е. Десов. – М.: Гос. Издат по строит. и архитект., 1956. – 229 с.
2. Баженов, Ю.М. Технология бетонных и железобетонных изделий. – М.: Стройиздат, 1984. – 561 с.
3. Сторк, Ю. Теория состава бетонной смеси: пер. с болг. / Ю. Старк – Л.: Стройиздат, 1971. – 276 с.