

УДК 666.97.001

Эдуард Иванович БАТЯНОВСКИЙ,  
доктор технических наук,  
профессор,  
заведующий кафедрой  
"Строительные материалы  
и изделия"  
Белорусского национального  
технического университета

Александр Иванович  
БОНДАРОВИЧ,  
инженер НИИЛ  
модифицированного бетона  
и строительной продукции  
Белорусского национального  
технического университета

Павел Владимирович РЯБЧИКОВ,  
инженер НИИЛ  
модифицированного бетона  
и строительной продукции  
Белорусского национального  
технического университета

**TECHNOLOGY FACTORS  
AFFECTING  
THE PERMEABILITY  
OF THE VIBRATED CONCRETE**

**ВЛИЯНИЕ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ФАКТОРОВ  
НА ПРОНИЦАЕМОСТЬ  
ВИБРОПРЕССОВАННОГО  
БЕТОНА**

*В материале статьи изложены результаты исследований влияния ряда технологических факторов: вида тяжелого бетона (с мелким и крупным заполнителем), состава, степени уплотнения, условий твердения и других на водопоглощение, водонепроницаемость и коэффициент фильтрации вибропрессованного цементного бетона применительно к производству мелкоштучных элементов благоустройства (тротуарных плит и бортового камня).*

*This paper presents the results of study of a number of technology factors (type of heavy weight concrete (with lightweight and coarse aggregate), concrete composition, degree of compaction, hardening conditions etc.), which affect the water absorption, watertightness and coefficient of filtration of the vibrated concrete used for manufacture of small elements (paving tiles and edgestones).*

**ВВЕДЕНИЕ**

Долговечность бетона и, в частности, такие характеристики как солестойкость и морозостойкость, непосредственно зависят от его проницаемости, которая предопределяется состоянием пор структуры цементного камня и бетона в целом [1-4]. При этом наибольшую опасность представляет капиллярная (открытая, сообщающаяся) пористость, характеризующаяся сечением капилляров более 0,1 мкм и по общепризнанным классификациям ряда исследователей [5-8] относящаяся к "макрокапиллярной" пористости. Для обеспечения устойчивости бетона в агрессивной эксплуатационной среде необходимо сформировать в нем структуру цементного камня такого уровня плотности, который характеризуется минимальным объемом микрокапиллярной пористости, при размерах сечения капилляров менее 0,1 мкм. Установлено, что жидкость в таких капиллярах находится под действием электростатического потенциала гидрофильной поверхности твердой фазы и приобретает ряд отличных от "свободной воды" свойств (например, свойства "квазитвердого" тела), способна сопротивляться сдвиговым усилиям, теряет способность текучести и переходит в лед при очень низких температурах, при этом может замерзнуть без увеличения объема (плотность льда более 1 г/см<sup>3</sup>) [9-14]. Формирование структуры бетона низкой проницаемости непосредственно зависит от совокупности множества технологических факторов, включая качество материалов, особенности состава и величину начального водосохранения бетона, степень уплотнения, условия твердения и др. В статье изложены результаты исследований влияния ряда факторов на проницаемость цементно-песчаного (мелкозернистого) бетона и бетона со щеб-

нем (традиционным и кубовидным), оцениваемой по величине водопоглощения, водонепроницаемости и коэффициента фильтрации образцов бетона, используемого при изготовлении вибропрессованных тротуарных плит и бортового камня.

**ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ  
НА СВОЙСТВА БЕТОНА**

*Фактор тонкости помола цемента* не исследовали, так как цементы (в экспериментах — ПРУП "Кричевцементношифер") марки М500-Д0 [15, 16] заводов Беларуси, работающих в современных условиях по "замкнутому" циклу, характеризуются стабильной удельной поверхностью в 2800—3100 см<sup>2</sup>/г (по прибору типа "ПСХ-4"), что было подтверждено испытаниями используемого в экспериментах вяжущего.

*Фактор минералогического состава цемента* важен, но для современных вяжущих, выпускаемых белорусскими заводами, не принципиален, так как их минералогический состав в целом удовлетворяет требованиям к цементу по данному показателю для бетонов высокой степени морозостойкости [4]. В частности, содержание трехкальциевого алюмината (C<sub>3</sub>A) в отечественных цементах колеблется от 3 % до 7 % массы клинкера, что ниже нормируемого значения 8 % для вяжущего бетона дорожных покрытий.

*Водоцементное отношение* оказывает определяющее влияние на пористость цементного камня и бетона при вибропрессовании, если его величина не совпадает с оптимально необходимой для образования высокоорганизованной ("слитной") структуры цементного теста (а в затвердевшем бетоне — цементного камня) под воздействием интенсивности вибрации и давления пригруза (пресса) в процессе формования.

Установлено, что область оптимальных значений водоцементного отношения бетона при вибропрессовании достаточно узка и соответствует содержанию воды, примерно равному сумме  $K_{нр} + B_3$ , то есть "нормальной густоте" или водопотребности цемента и водопоглощению (в основном адсорбционному) используемых заполнителей плотных горных пород. Применение химических добавок (пластификаторов), способных частично блокировать потенциал поверхности твердой фазы, понижает уровень оптимального водоцементного отношения. Этот же эффект достигается с повышением интенсивности вибрационного воздействия при уплотнении бетона, которая характеризуется выражением:  $I = A^2 \cdot f^3$ , см<sup>2</sup>/с<sup>3</sup>, то есть большей эффективностью вибровоздействия с ростом частоты колебаний ( $f$ , с<sup>-1</sup>) в сравнении с амплитудой ( $A$ , см/с), что особенно важно при уплотнении жестких бетонных смесей.

Снижение водоцементного отношения по сравнению с оптимальным значением, которое не сопровождается соответствующим ростом интенсивности вибровоздействия и его продолжительности, приводит к повышению пористости цементного камня и бетона. В этом случае возрастает показатель жесткости бетонной смеси, что не учитывается соответствующими (адекватными) изменениями режима формования. Физическая суть явления роста пористости бетона заключается в том, что при снижении водосодержания бетона менее некоторого критического уровня вся жидкость оказывается в физически связанном состоянии за счет потенциала поверхности твердой фазы и прочно удерживается ею в процессе формования. В результате "слитная" структура цементного теста образуется только в зонах контакта сольватных оболочек жидкой фазы, адсорбированной зернами (флокулами) цемента. Межзерновое пространство "мицелл" остается заполненным зацементированным воздухом и, по сути, представляет собой будущий объем пор цементного камня, который, как показано далее, будет увеличиваться в процессе твердения, особенно при воздушно-сухих условиях твердения. В результате формируется структура цементного камня, в которой образующиеся вокруг цементных "ядер" реакционные каемки из продуктов его гидратации не развиты и контактируют между собой в зонах ограниченной площади. Как следствие, такая структура характеризуется наличием макрокапиллярной сообщающейся пористости, значительным водопоглощением и высокой проницаемостью. Такой бетон, из-за малых толщин сольватных оболочек воды на зернах (флокулах) цемента и ускоренного заполнения ограниченного объема жидкости продуктами его гидратации (образующимися кристаллогидратами), достаточно быстро набирает прочность в начальные 24—48 ч твердения, после чего ее рост замедляется, а то и прекращается (при твердении в воздушно-сухих условиях) вовсе, зачастую не достигая уровня проектной прочности.

*Условия и время твердения бетона.* Исследования проницаемости бетона осуществляли, контролируя изменение его водопоглощения с использованием основных положений ГОСТ 12730.3 и нестандартной методики водонасыщения под вакуумом, со степенью разрежения, соответствующей  $P_{раз} \approx -0,095$  МПа (таблица 1). 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 примерно на 30—35 мм) поме-

щали 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 соответствуют истинному водопоглощению бетона. При изготовлении образцов (70x70x70 мм) принят номинальный состав мелкозернистого бетона: Ц = 500 кг; П = 1600 кг; В/Ц ≈ 0,33; степень уплотнения характеризуется средней плотностью свежееотформованного бетона  $\rho_{бс} \sim 2250$  кг/м<sup>3</sup>; номинальный состав бетона с обычным щебнем: Ц = 450 кг; П = 1150 кг; Щ = 600 кг; (при В/Ц ≈ 0,36—0,38); жесткость Ж ≈ 15—20 с и средней плотностью свежееотформованного бетона  $\rho_{бс} \approx 2350$  кг/м<sup>3</sup> и с кубовидным щебнем: Ц = 400 кг; П = 1150 кг; Щ = 700 кг; В/Ц ≈ 0,35; Ж ≈ 15—20 с;  $\rho_{бс} \approx 2400$  кг/м<sup>3</sup>.

Анализ результатов экспериментов по установлению закономерностей влияния условий и времени твердения бетона на количество (объем) поглощаемой им воды при водонасыщении (см. таблицу 1), с учетом данных таблицы 2 о количестве химически связанной цементной воды (определено прокаливанием проб при  $t \sim 600$  °С), свидетельствует о следующем. Активное развитие в первые 28 сут процессов гидратации цемента, формирования и становления структуры (пористости) цементного камня способствуют переходу значительной части воды затворения в химико-физически связанное состояние. Формирующиеся 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 + зацементированный воздух". В результате в цементном камне образуется "контракционно-капиллярная" пористость, способная заполняться 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  $\alpha \sim 55\%—60\%$ , см. таблицу 2). В результате возрастает объем макрокапиллярной пористости, что отражается в росте количества сорбируемой бетоном воды и величины водопоглощения.

Очевидно, что наиболее интенсивно означенные процессы развиваются в первые 7 сут твердения бетона и в этот период бетон (как мелкозернистый, так и с крупным заполнителем) в наибольшем (относительно единицы времени) количестве поглощает воду. Следует отметить, что за 3 сут твердения при температуре не менее 15 °С вибропрессованный бетон достигает уровня прочности 30—40 МПа и изделия зачастую поставляются потребителю. По существу же к этому времени структура бетона находится еще в стадии активного формирования и не готова к восприятию эксплуатационных нагрузок от агрессивных сред. В частности, воздействия солей, минеральных масел, замораживания-оттаивания и пр. Кроме изложенного, из экспериментальных данных следует, что необходимо изменить положение СТБ 1071-97 [15], отменив требование операционного контроля водопоглощения бетона, как не отражающего фактически данной

Таблица 1. Зависимость количества поглощаемой воды и водопоглощения бетона по массе  $W_m$  от времени и условий твердения бетона

Условия твердения бетона	Методика водонасыщения бетона	Количество поглощаемой 1 м <sup>3</sup> бетона воды, кг, в возрасте, сут				$W_m$ , %, в возрасте 28 сут	$W_m$ , %, в возрасте 90 сут
		3	7	14	28		
<b>1. Мелкозернистый бетон</b>							
Нормально-влажные	ГОСТ	29	52	63	68	5,5	3,1
	После вакуумирования	36	68	82	86	6,4	3,5
Воздушно-сухие	ГОСТ	38	66	70	91	6,8	5,2
	После вакуумирования	47	80	96	108	8,7	6,8
Естественные (под пленкой)	ГОСТ	25	44	56	60	4,9	2,0
	После вакуумирования	31	56	64	75	5,5	2,4
После пропаривания*	ГОСТ	76*	-	-	-	6,8	-
	После вакуумирования	94*	-	-	-	8,8	-
Нормально-влажные после пропаривания	ГОСТ	-	-	-	75	5,2	3,6
	После вакуумирования	-	-	-	98	6,4	4,4
<b>2. Бетон со щебнем фракций 5-10 мм</b>							
Нормально-влажные	ГОСТ	20	36	52	59	4,3	-
	После вакуумирования	22	42	64	73	5,1	-
Воздушно-сухие	ГОСТ	29	46	65	76	5,2	-
	После вакуумирования	35	57	80	91	6,5	-
Естественные (под пленкой)	ГОСТ	18	34	42	51	4,2	-
	После вакуумирования	20	40	51	65	-	-
После пропаривания*	ГОСТ	40*	-	-	-	4,9	-
	После вакуумирования	51*	-	-	-	5,4	-
Нормально-влажные после пропаривания	ГОСТ	-	-	-	56	4,5	-
	После вакуумирования	-	-	-	76	5,2	-
<b>3. Бетон со щебнем кубовидной формы фракций 5-10 мм</b>							
Нормально-влажные	ГОСТ	-	-	-	44	3,6	-
	После вакуумирования	-	-	-	62	4,2	-
После пропаривания*	ГОСТ	36*	-	-	-	4,4	-
	После вакуумирования	50*	-	-	-	5,0	-
* Начало водонасыщения не позднее 24 ч от момента изготовления образцов.							

**Таблица 2. Количество химически связанной и испаряемой воды (свободной) в бетоне в расчете на 1 м<sup>3</sup>**

Условия твердения бетона в течение 28 сут	Вид бетона	Средняя плотность бетона при естественной влажности, кг/м <sup>3</sup>	Потери воды при нагреве до 110 °С, кг	Средняя плотность бетона в сухом состоянии, кг/м <sup>3</sup>	Потери воды при прокаливании (600 °С), кг	Степень гидратации цемента α, %
Нормально-влажностные	Мелкозернистый	2245	85	2160	79,4	69,0
	Со щебнем	2345	74	2271	68,8	66,5
Воздушно-сухие	Мелкозернистый	2220	69	2151	70,7	61,5
	Со щебнем	2325	70	2246	58,0	56,0
Естественные (под пленкой)	Мелкозернистый	2240	80	2160	80,5	70,0
	Со щебнем	2345	88	2257	67,2	65,0
После пропаривания*	Мелкозернистый	2255	106	2143	63,3	55,0
	Со щебнем	2350	92	2246	58,1	56,2
Нормально-влажностные после пропаривания	Мелкозернистый	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.

его характеристики, и перенести соответствующее определение в периодический вариант контроля.

Из приведенных данных о кинетике и количестве поглощаемой бетоном воды следует, что бетон, приготовленный с использованием крупного заполнителя — гранитного щебня, за счет уменьшения объема цементного камня (т. е. пористой составляющей) и роста качества (степени) уплотнения, характеризуется меньшей по объему пористостью. Как следствие, образцы бетона со щебнем характеризуются меньшим количеством поглощаемой при водонасыщении жидкости и величиной водопоглощения, что является предпосылкой для повышения его эксплуатационных характеристик.

**Качество (степень) уплотнения бетона.** Тенденция отражена изменением водопоглощения бетона в зависимости от качества (степени) уплотнения, выраженного средней плотностью свежееотформованного бетона, и условий твердения в виде графических зависимостей (рисунок 1 — мелкозернистый бетон и рисунок 2 — бетон со щебнем). Очевидно, что снижение качества уплотнения бетона (как мелкозернистого, так и содержащего крупный заполнитель) при соответствующем росте его капиллярной пористости сопровождается повышением проницаемости, ростом количества поглощаемой им воды. Следует отметить, что снижение средней плотности бетона на 50 кг/м<sup>3</sup> (например, от ее значения в 2250 кг/м<sup>3</sup> для мелкозернистого бетона) сопровождается увеличением объема пор примерно на 2,0 %-2,5 % и, в соответствии с этим, примерно на 20—22 л увеличивается количество поглощаемой бетоном воды (при насыщении до постоянной массы) в пересчете на 1 м<sup>3</sup>.

Исходя из полученных данных, можно считать, что минимально необходимые значения средней плотности свежееотформованного бетона (приготовленного на материалах стандартного качества), которые обеспечивают нормативные показатели бетона проектного возраста по водопоглощению, примерно равны:

- для мелкозернистого бетона — 2230—2250 кг/м<sup>3</sup>;
- для бетона с обычным щебнем (содержание не менее 600 кг/м<sup>3</sup>) при благоприятных условиях твердения — не ме-

нее 2300 кг/м<sup>3</sup>, а при пропаривании без дозревания и для воздушно-сухих условий твердения — не менее 2350 кг/м<sup>3</sup>; — для бетона на кубовидном щебне — не менее 2350 кг/м<sup>3</sup>.

Отметим, что в более поздние сроки твердения бетона его водопоглощение имеет общую тенденцию к снижению.

Очевидно, что область значений водопоглощения бетона, отраженная графиками № 1, 3 и 5 на рисунках 1 и 2 (относящегося к бетону "нормального" твердения и "дозревавшему" после пропаривания), выражает общую тенденцию интенсивного и устойчивого снижения сообщающейся капиллярной пористости бетона, твердеющего в благоприятных условиях. Вместе с тем, даже в этом случае рост пористости бетона, вызываемый недоуплотнением его на стадии формирования изделий, не может быть "перекрыт" в дальнейшем.

**Качество песка и водоцементное отношение.** В таблице 3 приведены данные об изменении водопоглощения по массе образцов бетона мелкозернистого и со щебнем в возрасте 28 сут (кроме пропаренных, водопоглощение которых определяли сразу) в зависимости от разновидности (физических свойств) использованного песка, при прочих равных условиях, за исключением:

- а) степени или качества уплотнения при равном водоцементном отношении;
- б) водоцементного отношения при равном качестве уплотнения.

Сохранив равным водоцементное отношение бетона, приготовленного на мытом заславльском и на крапужинском песках, которые характеризуются большим содержанием мелких фракций (соответственно большей удельной поверхностью и водопотребностью), а также интенсивность и продолжительность виброуплотнения, получили свежееотформованный бетон меньшей средней плотности.

Сохранив равную степень уплотнения (выдерживая значение  $r_{60} \sim 2250$  кг/м<sup>3</sup>), было увеличено водоцементное отношение мелкозернистого бетона до 0,36 и, одновременно, продолжительность его виброуплотнения, а при уплотнении образцов бетона с крупным заполнителем изменяли время уплотнения и значение  $(V/C)_6$  от 0,36 (заславльский песок) до 0,38—0,4 (крапужинский

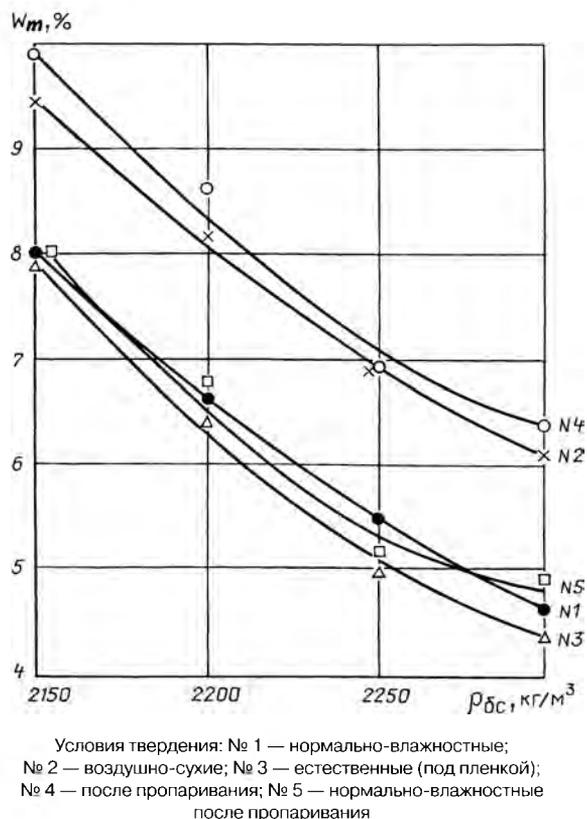


Рисунок 1. Тенденция изменения водопоглощения мелкозернистого бетона в зависимости от качества (степени) уплотнения при формировании и условий твердения

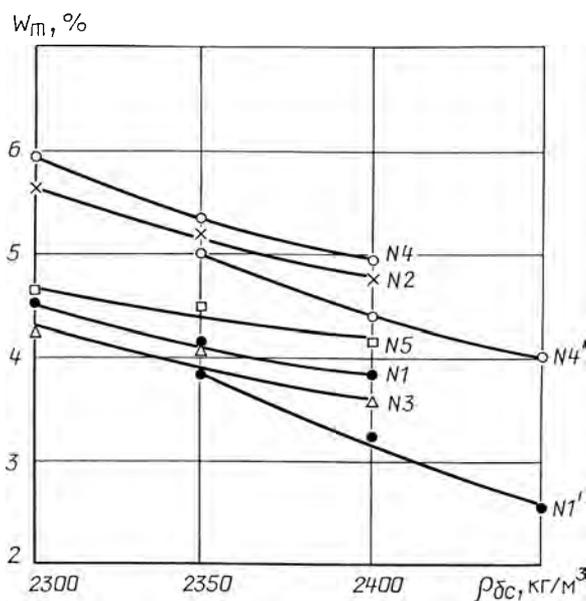


Рисунок 2. Тенденция изменения водопоглощения бетона с обычным и кубовидным (номера со штрихом) щебнем фракций 5-10 мм в зависимости от качества (степени) уплотнения при формировании и условий твердения

Таблица 3. Зависимость  $W_m$  от вида песка

Бетон	Разновидность песка	В/Ц бетона	$\rho_{bc}$ , кг/м <sup>3</sup>	Водопоглощение бетона, % по массе, в возрасте 28 сут при твердении в условиях			
				нормально-влажностных	воздушно-сухих	естественных (под пленкой)	после пропаривания
Мелкозернистый	Заславльский (мытый)	0,33	2250	5,5	6,8	4,9	6,8
	Крапужинский	0,33	2160	8,5	9,0	7,3	9,3
	Крапужинский	0,36	2250	6,0	7,1	5,6	7,5
Со щебнем фракций 5-10 мм	Заславльский (мытый)	0,36	2350	4,0	4,7	4,0	5,1
	Крапужинский	0,36	2270	5,8	6,7	5,5	6,2
	Крапужинский	0,39	2350	4,2	5,2	4,2	5,4

песок), постоянно обеспечивая среднюю плотность (для обычного щебня фракции 5—10 мм) 2350 и 2400 кг/м<sup>3</sup>.

Данные таблицы 3 подтверждают общеизвестную тенденцию роста пористости бетона при использовании мелких заполнителей с наличием глинистых и илистых фракций. В крапужинском песке их содержание, определенное "отмучиванием", составило приблизительно 2 % от массы песка, а в песке мытом заславльском — приблизительно 0,8 %. Общее количество фракций, прошедших через сито 0,14, соответственно составило: 3 % и 1 %.

Как результат — возросла водопотребность бетонной смеси при равной формуемости (по показателю жесткости) и ухудшилось качество уплотнения бетона, что проявилось в снижении средней плотности свежесформованного мелкозернистого бетона: от  $\rho_{бс} = 2250$  до  $\rho_{бс} = 2160$  кг/м<sup>3</sup>, и бетона с крупным заполнителем: от  $\rho_{бс} = 2350$  до  $\rho_{бс} = 2270$  кг/м<sup>3</sup>. Следствием чего явился рост его пористости и водопоглощения.

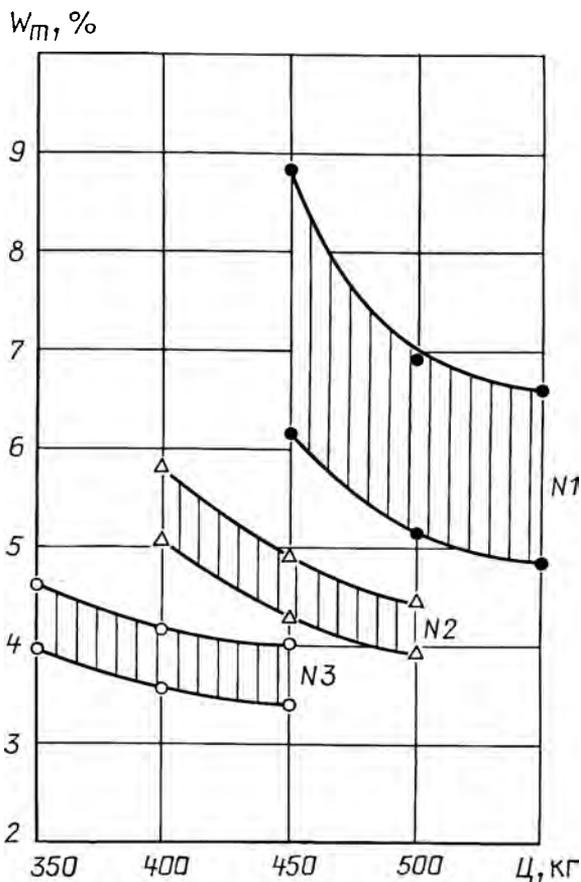
Увеличение водоцементного отношения бетона в данной ситуации способствует улучшению формуемости бетонной смеси до уровня, соответствующего интенсивности ее качественного уплотнения на лабораторной виброплощадке со стандартными параметрами вибрарования. За счет повышения качества уплотнения, выраженного ростом средней плотности свежесформованного бетона, обеспечивается формирование более плотной начальной структуры цементного теста, затем трансформирующейся в структуру цементного камня. Вызываемый повышением водосодержания бетона рост его пористости с избытком компенсируется качеством уплотнения, что и отражается снижением водопоглощения бетона, несмотря на некоторый рост его водоцементного отношения.

**Влияние расхода цемента и удобоукладываемости.** На рисунке 3 показана тенденция изменения водопоглощения по массе образцов мелкозернистого бетона и бетона с обычным (фр. 5—10 мм) щебнем и щебнем кубовидной формы той же фракции в возрасте 28 сут (кроме пропаренных — определено сразу) в зависимости от содержания цемента. На рисунке 3 для всех заполнителей (№ 1—№ 3) верхняя граничная линия — значения водопоглощения по массе  $W_m$ , определенные сразу после пропаривания, а нижняя — после 28 сут твердения в нормально-влажных условиях.

Для образцов мелкозернистого бетона изменяли содержание цемента при сохранении постоянным водоцементного отношения и условий формирования образцов. Расход песка (заславльский, мытый) соответственно изменяли: П ~ 1687, 1600 и 1513 кг на 1 м<sup>3</sup> бетона, сохраняя примерно неизменным объем выхода последнего.

При изготовлении образцов бетона со щебнем использовали песок крапужинского карьера и подход к формированию образцов был несколько иным. Сохраняли близким к постоянному уровень жесткости "внутри" серии образцов на одном виде щебня, изменяя В/Ц бетона: для обычного щебня: 0,38—0,4 и для кубовидного щебня: 0,36—0,38; при больших значениях В/Ц для бетонных смесей с минимальным расходом цемента (соответственно, 400 и 350 кг). При этом показатель жесткости бетонных смесей на обычном щебне принимался 20—25 с, а на кубовидном (при прочих равных условиях) — примерно 15 с, что отражает положительное влияние на формуемость бетонной смеси формы зерен крупного заполнителя, близкой к кубообразной, и снижения количества лещадных зерен в нем.

Данные, относящиеся к величине водопоглощения об-



№ 1 — мелкозернистый бетон;  
 № 2 — бетон с обычным щебнем фракции 5-10 мм;  
 № 3 — бетон с кубовидным щебнем

**Рисунок 3. Тенденция изменения водопоглощения бетона по массе в зависимости от содержания цемента**

разцов мелкозернистого бетона, свидетельствуют, что снижение расхода цемента от 500 кг на 1 м<sup>3</sup> бетона (при сохранении В/Ц ~ 0,33) сопровождается более существенным влиянием на плотность укладки твердой фазы при формировании, чем равное повышение его содержания в смеси. Это в основном связано с изменением объема цементного теста и, соответственно, прослойки его между частями твердой фазы, обеспечивающей "раздвижку" зерен заполнителя при формировании. Ее "утопление" сопровождается ростом коэффициента трения при перемещениях зерен твердой фазы, сопровождающих уплотнение жесткой бетонной смеси, и обратным эффектом в случае повышения содержания цементного теста в смеси. Вследствие этого ухудшаются или, наоборот, улучшаются формовочные свойства бетонной смеси и, при прочих равных условиях, снижается или повышается плотность ее укладки. В рассмотренных примерах с мелкозернистым бетоном показатель жесткости смеси изменился от 20—25 с (при содержании Ц = 500 кг), возрастая со снижением расхода цемента (450 кг), до 30—35 с, уменьшаясь до 15—20 с при повышении содержания цемента до 550 кг.

Данные, относящиеся к образцам бетона с крупным заполнителем, согласуются с отмеченной тенденцией

зависимости от содержания цемента (точнее, объема цементного камня) и его влияния на качество уплотнения смеси. Вместе с тем очевидно, что с превышением содержания цемента в мелкозернистом бетоне (более 500 кг), в бетоне с обычным щебнем (более 450 кг) и кубовидным щебнем (более 400 кг), темп понижения величин  $W_m$  замедляется. Это означает, что прирост плотности укладки зерен твердой фазы при формировании бетона и снижение его пористости, за счет повышения удобоукладываемости смеси с ростом содержания цемента, начинает "компенсироваться" ростом общего объема пор бетона из-за увеличения в нем объема цементного камня, то есть наиболее пористой составляющей. Из этого следует, что превышение расхода цемента в бетоне над оптимальным его содержанием по условиям (интенсивности) формирования может способствовать снижению долговечности бетона. Кроме отмеченного очевидна роль крупного заполнителя и, особенно щебня кубовидной формы, в повышении плотности бетона и его непроницаемости, оцениваемой по водопоглощению.

**ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ТВЕРДЕНИЯ НА ФИЛЬТРАЦИОННУЮ ПРОНИЦАЕМОСТЬ БЕТОНА**

Анализ ранее изложенных данных показывает, что при соблюдении состава бетона, режима его уплотнения при формировании изделий основное влияние на формирование пористости и проницаемости бетона оказывают условия его твердения. Изготовление элементов благоустройства методом вибропрессования характеризуется одновременно как разнообразием формирующих установок (от простейших до высокотехнологичных производств), так и существенно отличающимися режимами и условиями твердения бетона. При известных общих тенденциях влияния условий твердения на качество бетона,

данные о сравнительном анализе их разрозненны, а иногда противоречивы. С учетом этого была выполнена проверка изменений важнейших характеристик бетона — водонепроницаемости и коэффициента фильтрации — в зависимости от условий его твердения.

**Водонепроницаемость.** Испытания осуществляли в соответствии с положениями ГОСТ 12730.0 и ГОСТ 12730.5. Образцы бетона (каждая серия — 6 шт., размеры цилиндра  $d/h = 150/150$  мм) после твердения в нормально-влажностных, воздушно-сухих, естественных (под пленкой) условиях в течение 28 сут, а пропаренные — через 1 сут после изготовления были подвергнуты испытаниям.

Образцы из мелкозернистого бетона ( $C = 500$  кг); со щебнем (обычным и кубовидной формы,  $C = 450$  кг и  $C = 400$  кг) уплотняли до  $\rho_{bc} \sim 2250; 2350$  и  $2400$  кг/м<sup>3</sup>, соответственно.

Результаты испытаний (при значении максимального давления, при котором на четырех из шести образцов серии не наблюдалось просачивания воды) представлены в таблице 4. Несмотря на то, что ныне действующие требования к бетону тротуарных плит и бордюрных камней не включают показатель водонепроницаемости, полученные данные показательны, т. к. они полностью соотносятся с ранее приведенными данными по водопоглощению бетона, в зависимости от условий его твердения, подтверждают их. По существу, данные по водонепроницаемости характеризуют соотношение объемов открытой капиллярной пористости бетона и являются сравнительной характеристикой "эффективного" (усредненного) диаметра пор цементного камня в бетоне, формирующихся под влиянием среды и условий твердения, поскольку "прочие условия" были приняты одинаковыми.

Очевидно, что рост качества уплотнения бетона, снижение объема цементного камня (т. е. проницаемой составляющей) при наличии крупного заполнителя существенно сказываются на его водонепроницаемости для одинаковых условий твердения образцов.

**Таблица 4. Влияние условий твердения на водонепроницаемость бетона**

Вид бетона	Условия твердения бетона	Наибольшее давление воды, МПа	Марка бетона по водонепроницаемости	Относительное изменение водонепроницаемости, %
Мелкозернистый	Нормально-влажностные	0,9	W8	100
	Воздушно-сухие	0,5	W4	56
	Естественные (под пленкой)	0,9	W8	100
	После пропаривания	0,7	W6	78
С обычным щебнем	Нормально-влажностные	1,1	W10	100
	Воздушно-сухие	0,5-0,6	W4	~60
	Естественные (под пленкой)	1,1	W10	100
	После пропаривания	0,7-0,8	W6	~80
С кубовидным щебнем	Нормально-влажностные	Более 1,1	Более W10	100-120
	После пропаривания	0,8	W6-W8	~80

**Таблица 5. Влияние условий твердения бетона на коэффициент фильтрации воды**

Вид бетона	Условия твердения бетона	Давление измерения $P_{изм}$ , МПа	Средний расход воды по массе, г, за $\tau$ , с	Расчетный коэффициент фильтрации воды $K_{ф}$ , см/с
Мелкозернистый	Нормально-влажностные	0,6	1,4	$5,3 \cdot 10^{-10}$
	Воздушно-сухие	0,3	4,2	$32 \cdot 10^{-10}$
	Естественные (под пленкой)	0,6	1,28	$4,9 \cdot 10^{-10}$
	После пропаривания	0,5	3,0	$15,7 \cdot 10^{-10}$
С обычным щебнем	Нормально-влажностные	0,8	0,35	$1,0 \cdot 10^{-10}$
	Воздушно-сухие	0,5	4,8	$22 \cdot 10^{-10}$
	Естественные (под пленкой)	0,8	0,28	$0,81 \cdot 10^{-10}$
	После пропаривания	0,6	2,9	$11 \cdot 10^{-10}$
С кубовидным щебнем	Нормально-влажностные	1,0	0,39	$0,9 \cdot 10^{-10}$
	После пропаривания	0,6	2,37	$9 \cdot 10^{-10}$

Водонепроницаемость является важной характеристикой, позволяющей судить о вероятной проницаемости бетона. Однако она не позволяет количественно оценить фильтрационные свойства бетона, от которых зависит его морозо- и коррозионная стойкость. Поэтому важно определить проницаемость бетона по коэффициенту фильтрации воды  $K_{ф}$ . Особенно, как сравнительную характеристику образцов бетона различного состава и твердевших в различных условиях, с целью получения в дальнейшем соответствующих зависимостей для оценки изменения при этом его проницаемости.

Коэффициент фильтрации воды определяли по методике ГОСТ 12730.5 на образцах мелкозернистого бетона базового состава (при средней плотности свежееотформованного бетона  $\rho_{бс} \sim 2250$  кг/м<sup>3</sup>) и на образцах бетона с обычным и кубовидным щебнем ( $\rho_{бс} \sim 2350$  кг/м<sup>3</sup> и 2400 кг/м<sup>3</sup>, соответственно) ранее приведенных составов.

Давление воды при испытаниях увеличивали ступенями по 0,2 МПа с выдержкой в течение 1 ч. После появления фильтрата определяли его расход ( $Q$ , см<sup>3</sup>), как среднее значение пяти наибольших замеров (при разнице расхода воды между замерами не более 20 %) на каждом образце (при трех образцах в серии).

Значения коэффициента фильтрации, рассчитанные по соответствующей формуле стандарта на основании величин  $Q$  (расхода фильтрата), для образцов диаметром  $\sim 80$  мм (поправочный коэффициент  $K = 2,8$ ) и высотой 50 мм, соответствуют области допустимых по ГОСТ 12730.5 (поз.3, таблица 6) значений для W8; W10 (нормально-влажностные условия твердения и "под пленкой"), W6 (после пропаривания) и W4 для воздушно-сухих условий твердения.

Данные таблицы 5 подтверждают ранее выявленные закономерности взаимосвязи и взаимозависимости качества структуры бетона (как мелкозернистого, так и с крупным заполнителем) от условий его твердения, определяющих (при прочих равных условиях) проницаемость (или непроницаемость) материала, отраженную в величинах коэффициента фильтрации. Приведенные в таблице 5 данные размерности с порядком  $10^{-10}$  свидетельствуют об очень большой разнице в величинах коэффициентов фильтрации бетона, твердевшего в благоприятных

условиях, в сравнении с твердевшим в воздушно-сухих условиях (рост  $K_{ф}$  в 6—15 раз), а также с образцами, испытанными сразу после пропаривания. В последнем случае структура бетона находится в стадии активного формирования, что подтверждается относительно небольшим количеством химически связанной воды и степенью гидратации цемента (см. таблицу 2)  $\alpha \approx 55\%—56\%$ . В этой связи после пропаривания рационален прием последующего дозревания бетона, например, путем пакирования изделий в полиэтиленовую упаковку.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1 Результаты исследований позволили выявить влияние разнообразных технологических факторов на формирование структуры цементного камня вибропрессованного бетона, его пористости и проницаемости, что обеспечивает возможность повышения качества и долговечности изделий, изготавливаемых вибропрессованием.

2 Выявлена необходимость изменения положения [15] (введено изменением № 3 к стандарту) в части перевода методов определения водопоглощения бетона из приемосдаточных испытаний в периодические испытания из-за погрешности определения данной характеристики бетона как в раннем возрасте при разных вариантах твердения без прогрева, так и сразу после пропаривания.

3 Показана недопустимость воздушно-сухих условий твердения вибропрессованного бетона, в результате которых существенно снижается его плотность и растет проницаемость, предопределяющие снижение долговечности вибропрессованных изделий.

4 Полученные и приведенные экспериментальные данные о зависимости фильтрационной проницаемости вибропрессованного бетона от технологических факторов требуют выполнения дополнительных исследований по солестойкости и морозостойкости вибропрессованного бетона с целью выявления соответствующих закономерностей, которые могут позволить оценивать и прогнозировать эксплуатационную долговечность вибропрессованных изделий, включая контроль за покрытиями из них в процессе эксплуатации.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Ахвердов И.Н. Высокопрочный бетон. — М.: Госстройиздат, 1961. — 163 с.
2. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона. — М.: Стройиздат, 1981. — 464 с.
3. Стольников В.В. Исследования по гидротехническому бетону. — М.:—Л.: Госэнергоиздат, 1953. — 330 с.
4. Шестоперов С.В. и др. Цементный бетон в дорожном строительстве. — М.: Дориздат, 1950. — 132 с.
5. Мощанский Н.А. Повышение стойкости строительных материалов и конструкций, работающих в условиях агрессивных сред. — М.: Госстандарт, 1962. — 235 с.
6. Лыков А.В. Тепло- и массообмен в процессах сушки. — М.:—Л.: Госэнергоиздат, 1956. — 464 с.
7. Шейнин А.Е., Чеховский Ю.В., Бруссер М.И. Структура и свойства цементных бетонов. — М.: Стройиздат, 1979. — 344 с.
8. Горчаков Г.И., Капкин М.М., Скрамтаев Б.Г. Повышение морозостойкости бетона в конструкциях промышленных и гидротехнических сооружений. — М.: Стройиздат, 1965. — 195 с.
9. Ахвердов И.Н., Каплан Э.Л. Механизм упрочения бетона при его раннем замораживании / ДАН БССР. — Мн., 1967. Т. 11, № 8.— С. 688-691.
10. Вода в дисперсных системах / Б.В. Дерягин, Н.В. Чураев, Ф.Д. Овчаренко и др. — М.: Химия, 1989. — 288 с.
11. Бриджмен П.В. Новейшие работы в области высоких давлений. — М.: Госиздат, 1948. — С. 98, 110—112.
12. Цыгович Н.А. Основания и фундаменты на мерзлых грунтах. — М.: Изд. АН СССР, 1958. — 168 с.
13. Зацепина Г.Н. Свойства и структура воды. - М.: Изд. Московского университета, 1974. — С. 48—80.
14. Батяновский Э.И. Особо плотный бетон сухого формования. — Мн.: НП ООО "Стринко", 2002. — С. 103—112.
15. СТБ 1071-97 Плиты бетонные и железобетонные для тротуаров и дорог. Общие технические условия.
16. СТБ 1097-98 Камни бортовые бетонные и железобетонные. Технические условия.

**Статья поступила в редакцию 18.05.06.**