

# Влияние технологических факторов на проницаемость вибропрессованного бетона

Э.И. БАТЯНОВСКИЙ, доктор техн. наук, профессор; А.И. БОНДАРОВИЧ, инженер; П.В. РЯБЧИКОВ, инженер, Белорусский национальный технический университет

## Часть 1

**Излагаются 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 тротуарных плит и бортового камня.**

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. При этом наибольшую опасность представляет капиллярная (открытая, сообщающаяся) пористость, характеризующаяся сечением капилляров более 0,1 мкм и по общепризнанным классификациям ряда исследователей 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>). Формирование структуры бетона низкой проницаемости непосредственно зависит от совокупности множества технологических факторов, включая качество материалов, особенности состава и величину начального водосодержания бетона, степень уплотнения, условия твердения и др. В статье изложены результаты исследований влияния ряда факторов на проницаемость цементно-песчаного (мелкозернистого) бетона и бетона со щебнем (традици-

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

*Фактор тонкости помола цемента* не исследовали, так как цементы (в экспериментах – ПРУП «Кричевцементошифер») марки М500-Д0 [1, 2] 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 [3]. В частности, содержание трехкальциевого алюмината (C<sub>3</sub>A) в отечественных цементах колеблется от 3 до 7% массы клинкера, что ниже нормируемого значения на 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 («слипной») 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  $K_{нп} + V_3$ , 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:  $I = A^2 - f^3$ , 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 «слипная» 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 кристалло-гидратами), достаточно быстро набирает прочность в начальные 24–48 час. 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 час. воды. Затем ванну с водой и размещенными в ней образцами (уровень воды не доходил до верхней грани образцов примерно на 30–35 мм) помещали в вакуумный шкаф, в котором создавали разрежение и выдерживали в общей сложности еще 24 час. 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 час. 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  $\rho_{бс} \approx 2250$  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  $\rho_{бс} = 2350$  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.;  $\rho_{бс} = 2400$  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 (таблица 1), с учетом данных таблицы 2 о количестве химически связанной цементом воды (определено прокаливанием проб при  $t \approx 600^\circ\text{C}$ ), свидетельствует о следующем: активное развитие в первые 28 сут. процессов гидратации цемента, формирования и становления структуры (пористости) цементного камня способствуют переходу значительной час-

ти 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 + защемленный 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 тор-

можения в силу этого реакций гидратации цемента (за 28 сут. степень гидратации  $\alpha \approx 55\text{--}60\%$ , 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°C вибропрессованный бетон достигает уровня прочности 30–40 МПа и изделия зачастую поставляются потребителю. По существу же к этому времени структура бетона находит-

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>Мелкозернистый бетон</b>							
Нормально-влажностные	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-влажностные после пропаривания	ГОСТ	–	–	–	75	5,2	3,6
	После вакуумирования	–	–	–	98	6,4	4,4
<b>Бетон со щебнем фракций 5–10 мм</b>							
Нормально-влажностные	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-влажностные после пропаривания	ГОСТ	–	–	–	56	4,5	–
	После вакуумирования	–	–	–	76	5,2	–
<b>Бетон со щебнем кубовидной формы фракций 5–10 мм</b>							
Нормально-влажностные	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 час. 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 проливании (600 °С), кг	Степень гидратации цемента α, %
Нормальновлажностные	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
Нормальновлажностные 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 час. от момента изготовления образцов.

Таблица 3

Зависимость W <sub>m</sub> от вида песка							
Бетон	Разновидность песка	В/Ц бетона	R <sub>бет</sub> 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

ся 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 [1], отменив требование операционного контроля водопоглощения бетона, как фактически не отражающего данной 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 объе-

му 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 (рис. 1 и 2). 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 сред-

ней плотности бетона на 50 кг/м<sup>3</sup> (например, от ее значения 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 менее 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 рис. 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

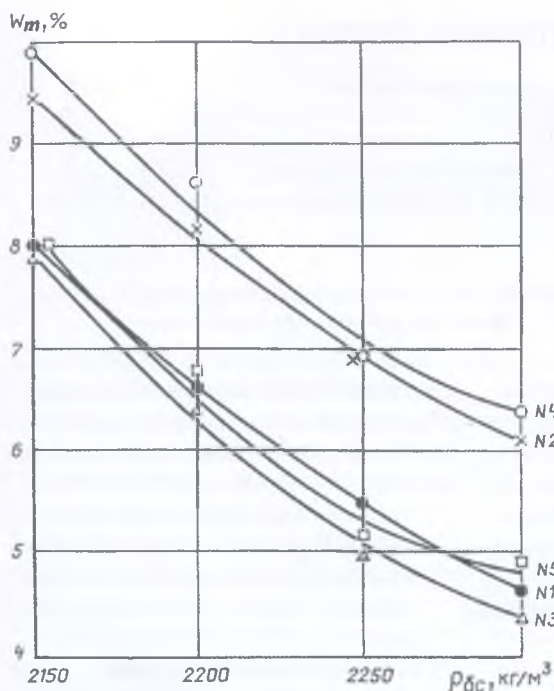


Рис. 1. Тенденция изменения водопоглощения мелкозернистого бетона в зависимости от качества (степени) уплотнения при формовании и условий твердения

Условия твердения: № 1 – нормально-влажностные; № 2 – воздушно-сухие; № 3 – естественные (под пленкой); № 4 – после пропаривания; № 5 – нормально-влажностные после пропаривания

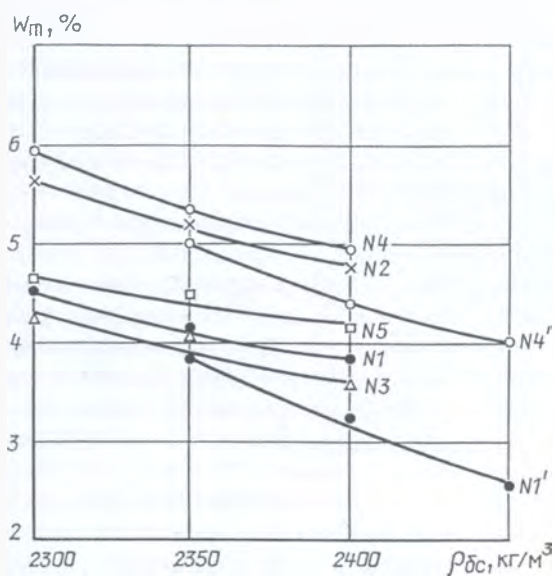
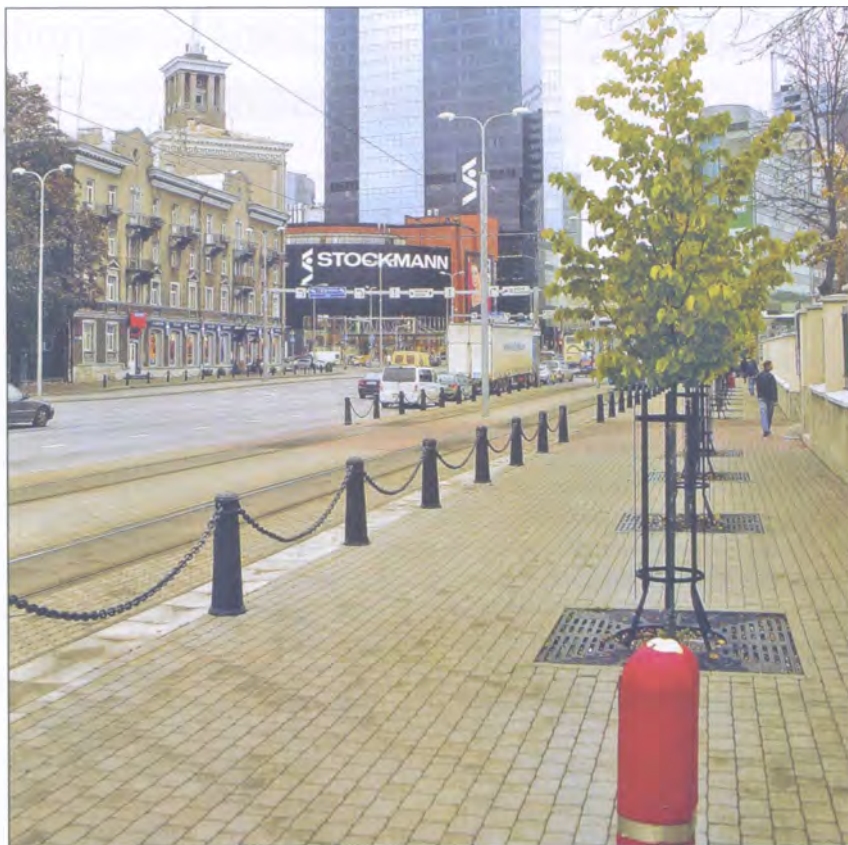


Рис. 2. Тенденция изменения водопоглощения бетона с обычным и кубовидным (номера со штрихом) щебнем фракций 5–10 мм в зависимости от качества (степени) уплотнения при формовании и условий твердения

Условия твердения: № 1 и 1' – нормально-влажностные; № 2 – воздушно-сухие; № 3 – естественные (под пленкой); № 4 и № 4' – после пропаривания; № 5 – нормально-влажностные после пропаривания

продолжительность виброуплотнения, получили свежесформованный бетон меньшей средней плотности.

Сохранив равную степень уплотнения (выдерживая значение  $\rho_{бс} \sim 2250$  кг/м³),



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  $(W/C)_6$  от 0,38–0,4 (заславский песок) до 0,38–0,4 (крапужинский песок), постоянно обеспечивая среднюю плотность (для обычного щебня фракции 5–10 мм) 2350 и 2400 кг/м³.

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 заславском – приблизительно 0,8%. Общее количество фракций, прошедших через сито 0,14, соответственно составило 3 и 1%.

Как результат – возросла водопотребность бетонной смеси при равной формоустойчивости (по показателю жесткости) и ухудшилось качество уплотнения бетона, что проявилось в снижении средней плотности свежесформованного мелкозернистого бетона:  $\rho_{бс}$  от 2250

до 2160 кг/м³, и бетона с крупным заполнителем:  $\rho_{бс}$  от 2350 до 2270 кг/м³, следствием чего явился рост его пористости и водопоглощения.

Увеличение водоцементного отношения бетона в данной ситуации способствует улучшению формоустойчивости бетонной смеси до уровня, соответствующего интенсивности ее качественного уплотнения на лабораторной виброплощадке со стандартными параметрами вибрирования. 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.

**Библиографический список:**

1. СТБ 1071-97. «Плиты бетонные и железобетонные для тротуаров и дорог». Общие технические условия.
2. СТБ 1097-98. «Камни бортовые бетонные и железобетонные». Технические условия.
3. Шестоперов С.В. и др. Цементный бетон в дорожном строительстве. М.: Дориздат, 1950. 132 с.