

3. Collepardi M., Borsoi A., Collepardi S., Olagot J.J.O., Troli R. Effects of shrinkage reducing admixture in shrinkage compensating concrete under non-wet curing conditions // Cement and Concrete Composites. Vol.27, Issue 6. – 2005. – Pp. 704–708.

4. Н. Н. Калиновская, Д. С. Котов, Е. В. Щербицкая Усадочные деформации модифицированного бетона. Причины и способы устранения // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2018. – № 8. – С. 43–48.

5. Н. Н. Калиновская, Д. С. Котов, Е. А. Иванова Долговечность бетона. Анализ причин и способы снижения усадочных деформаций модифицированного бетона // Технологии бетонов. – 2017. – № 11–12 (136–137). – С. 14–17.

6. Ramachandran V.S., Feldman R.F. Concrete admixtures handbook. Properties, Science, and Technology // Noyes Publication. USA. 1984, 575 p.

7. СТБ 1335-2002 Цемент напрягающий. Технические условия.

УДК 666.972; 693.54(032)

К МЕТОДИКЕ ОПЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКИ МОРОЗОСТОЙКОСТИ ВИБРОПРЕССОВАННОГО ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА

БОНДАРОВИЧ А. И., БАТЯНОВСКИЙ Э. И.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Введение. Долговечность бетона дорожных, тротуарных покрытий и подобных элементов транспортных коммуникаций и благоустройства в основном оценивается показателями морозостойкости и прочности. При этом не учитывается, что в процессе эксплуатации бетон покрытий подвергается значительным механическим нагрузкам, оказывающим существенное влияние на изменение во времени структурных характеристик бетона. Вместе с тем трещинообразование, сопровождающее воздействие механических нагрузок на бетон, способно значительно снизить его прочностные свойства, морозо- и солестойкость. В статье изложены результаты экспери-

ментальных исследований, отражающих тенденции ухудшения физико-механических характеристик тяжелого бетона при комплексном воздействии агрессивной эксплуатационной среды и механических нагрузок.

На основе анализа результатов исследований Нилендера Ю. А., Горчакова Г. И., Дементьева Г. К., Попова Н. Д., Невского В. А., Москвина В. М., Подвального А. М., Стольников В. В., Шестоперова С. В., Конопленко А. И., Федякина Н. Н., Шейкина А. Е., Иванова Ф. М., Пауэрс Т., Колинса А., Воларе Р. и многих других авторов, публикации которых относятся к периоду 30–80-х годов XX века, и современных исследователей этой проблемы в Беларуси – Блещика Н. П., Бабицкого В. В., Лазоренко О. В., Ковшара С. Н. и др., сделан вывод, что анализируемые источники, в целом глубоко и достоверно отражающие явление морозной деструкции бетона, причины и процессы ее развития под влиянием переменного замораживания-оттаивания бетона, ориентированы на оценку и прогнозирование ее величины как исходной характеристики бетона проектного возраста, т. е. с той структурой и прочностными свойствами, которые его характеризуют изначально. При этом не учитывается, что бетон элементов тротуарных (дорожных) покрытий (мощения) в процессе эксплуатации постоянно подвергается воздействию механических нагрузок (истирающих; на сжатие – растяжение; ударных и др.), которые способны привести к трещинообразованию в бетоне. В результате будет ускорено развитие всех деструктивных процессов: возрастает пористость и количество «свободной» воды в бетоне, усилятся процессы миграции жидкости, роста деформаций (макро- и микроуровня), накопления усталостных деформаций вплоть до трещинообразования в местах «непроявившейся» усадки и пр. Как следствие, показатель морозостойкости, определенный по стандартизированным методикам, будет значительно превышать фактическую морозостойкость бетона в эксплуатируемых покрытиях, подвергаемых механическим воздействиям. На основании изложенного сформулированы цель и задачи настоящего исследования, заключающиеся в разработке и обосновании методики оперативной оценки фактического состояния и «остаточной» морозостойкости (долговечности) бетона эксплуатируемых покрытий благоустройств (элементов их мощения), с учетом ее снижения во времени под комплексным влиянием эксплуатацион-

ной среды и механических нагрузок. Основными практическими результатами исследования являются возможности оперативного контроля за состоянием эксплуатируемых покрытий, оценки «остаточной» морозостойкости и долговечности их конструктивных элементов, планирования ремонтных мероприятий, а также определение возможности повторного использования изымаемых элементов мостов.

Взаимосвязь пористости (проницаемости) бетона и скорости ультразвука. Результаты экспериментов исследования закономерностей изменения проницаемости мелкозернистого и содержащего крупный заполнитель вибропрессованного бетона в зависимости от основных технологических факторов: водоцементного отношения, расхода цемента, качества и содержания заполнителей, степени (качества) уплотнения, условий твердения частично представленные в таблице 1, позволили сформулировать следующие основные выводы:

Оптимальное значение водоцементного отношения бетона, формируемого вибропрессованием, должно обеспечивать два необходимых условия: объемное проявление эффекта тиксотропии цементного теста, обеспечивающее формирование слитной структуры цементного камня в бетоне, и, одновременно, условие сохранения формы (геометрических размеров) изделий, приданной в процессе уплотнения бетона. Оптимальное начальное водосодержание может быть определено из выражения: $(В/Ц)_{\text{опт}} \sim K_{\text{нг}} + B_{\text{ад}}^{\text{зан}} / Ц$, доли ед., с учетом коэффициента нормальной плотности цемента ($K_{\text{нг}}$, д. ед.), количества адсорбированной заполнителями воды ($B_{\text{ад}}^{\text{зан}}$, кг) и расхода цемента ($Ц$, кг).

Недопустимы воздушно-сухие условия твердения, при которых, например, для цементно-песчаного бетона водопоглощение (по массе) – увеличивается на 30–40 %; количество химически связанной воды снижается на 10–15 %; водонепроницаемость снижается в 1,5–2 раза; коэффициент фильтрации возрастает в 3–5 раз, в сравнении с «дозреванием» бетона после пропаривания (либо с твердением при гидроизоляции полиэтиленовой пленкой и в нормально-влажностных условиях).

Таблица 1

**Диапазон характеристик и свойств вибропрессованного бетона
установленных в процессе экспериментов**

Материалы: характеристики и диапазон расхода на 1 м ³ бетона				(В/Ц) д.ед.	Средняя плотность бетона, кг/ м ³	Прочность на сжатие в 28 сут, МПа	Структурные характеристики			
Цемент, кг	Песок (Мк~2,2 -2,7), кг	Щебень (фр. 5–10 мм), кг					Степень гидратации цемента, %	W _m , %	W, МПа	K _ф , 10 ⁻¹⁰ см/с
		традиционный	кубовидный							
450–550	1500–1700	–	–	0,32–0,36	2150–2300	29,5–42,0	61,5–70,0	4,4–9,4	W4–W8	4,9–32
400–500	900–1400	400–800	–	0,36–0,39	2300–2400	41,5–52,0	56,0–68,8	3,6–5,6	W4–W10	1,0–22
350–450	1050–1450	–	400–800	0,34–0,36	2350–2430	44,0–58,0	–	2,8–4,0	W6– ≥W10	0,8–9

Примечание. При выполнении экспериментов диапазон показателя жесткости бетонных смесей составлял 15–25 с; условия твердения образцов – нормально-влажные ($\varphi \geq 90\%$, $t \sim 20 \pm 3$ °C); воздушно-сухие ($\varphi \approx 60 \pm 10\%$; $t \sim 20 \pm 5$ °C); с гидроизоляцией в полиэтиленовой пленке и с «дозреванием» после пропаривания (режим: 2+2 (до 50 °C) + (5–6 при $t = 50$ °C) + (6–10; остывание)) в помещении лаборатории; формование образцов – вибрирование ($A \sim 0,5$ мм.; $f \sim 50$ Гц) с пригрузом до достижения требуемой средней плотности бетона.

Введение в бетон гранитного щебня (фр. до 10 мм) в рациональном для вибропрессования объеме ($\sim 0,22$ – $0,30$ м³ или ~ 600 – 800 кг на 1 м³ бетона) способствует повышению плотности укладки формируемого бетона при одновременном снижении на 10–15 % расхода цемента. Так, в сравнении образцов (нормально-влажное твердение) цементно-песчаного бетона (Ц~500 кг), бетона с традиционным щебнем (Ц~450 кг) и с кубовидным щебнем (Ц~400 кг), при прочих равных условиях, структурные показатели характеризовались: $\rho_b \sim 2250$ кг/м³; 2350 кг/м³ и 2400 кг/м³; $W_m \sim 5,5\%$; 4,3 % и 3,6 %; $W \sim 8; 10$ и ≥ 10 МПа; $K_{\phi} \sim \sim 5,3 \times 10^{-10}$ см/с; $1,0 \times 10^{-10}$ см/с и $0,8 \times 10^{-10}$ см/с соответственно.

Снижение водоцементного отношения и проницаемости бетона за счет увеличения содержания цемента сверх оптимального количества, не рационально, т. к. увеличение расхода цемента на 10–20 % сопровождалось снижением водопоглощения цементно-песчаного бетона всего на $\sim 0,7\%$; а с традиционным щебнем на $\sim 0,4$ – $0,5\%$, и с кубовидным: $\sim 0,2$ – $0,3\%$, поскольку влекло за со-

бой рост объема цементного камня в бетоне, являющегося наиболее пористой его составляющей.

По результатам данных экспериментов выявлена прямая взаимосвязь между скоростью ультразвука в вибропрессованном бетоне и количеством «поглощаемой» его порами воды, что позволило установить соответствующую корреляционную зависимость между скоростью распространения ультразвукового импульса и «водосодержанием» (влажностью) бетона. При этом выявлено, что скорость ультразвука в вибропрессованном бетоне естественной влажности практически не изменяется после 7 суток твердения к более позднему возрасту (в экспериментах до 90 сут) и увеличивается в зависимости от степени его увлажнения. По этим результатам, путем экспериментальной оценки изменений влажности (диэлькометрический метод оперативного контроля), а также прочности бетона на сжатие (с предварительным определением скорости ультразвука на тех же образцах) установили закономерности их взаимосвязи, которая является необходимой предпосылкой для разработки методики оценки морозостойкости бетона в эксплуатируемых элементах покрытия (мощения).

Влияние статической и динамической нагрузок на проницаемость бетона. С этой целью решали задачу по установлению закономерностей взаимосвязи между деструкцией бетона, подвергаемого многократному воздействию статической (табл. 2) или динамической (ударной) нагрузок (табл. 3), которая проявляется в изменениях его прочности, модуля упругости, проницаемости (водопоглощения), истираемости, и фиксацией этого процесса в сопутствующих изменениях скорости ультразвука.

Статическую механическую нагрузку на образцы бетона (табл. 2) имитировали многократным загрузением под прессом с усилием, примерно, до 30; 50; 70 и 90 % от прочности бетона в проектном (28 сут.) возрасте, динамическую (ударную, сосредоточенную) механическую нагрузку (см. табл. 3) имитировали ударами копра – плотномера динамического (СТБ 1242-2000; масса груза ~ 2,5 кг; высота падения – 300 мм; точка касания – острие конуса с углом при вершине 60 град.) по одной из граней (верхней или боковой при по следующем сжатии) образцов. Данные по определенным в исследованиях характеристикам бетона получены как средние значения; прочность на сжатие приведена к образцам «базового» размера

150 × 150 × 150 мм. Образцы испытывали по достижении проектного возраста (28 сут.).

По результатам экспериментальных исследований, частично представленных данными табл. 2 и 3, установлено, что циклически действующая статическая нагрузка до уровня ~40 % от прочности бетона на сжатие практически не вызывает ухудшения его качества длительный период. С ее ростом сверх 50 %-ного уровня развитие процесса трещинообразования активизируется, а при превышении 70 %-го уровня прочности бетона отражается в установленном экспериментально росте его водопоглощения (на ≥ 40 %), снижении прочности (на ≥ 25 %), модуля упругости, износоустойчивости в ~2 раза и, следует ожидать, его морозостойкости и долговечности.

Установлено, что наибольший отрицательный эффект от динамической (сосредоточенной ударной) нагрузки (табл. 3) наблюдается тогда, когда направление ее действия на бетон совпадает с направлением действия нагрузки при последующем сжатии, как это имеет место при эксплуатации покрытий. Очевидно, что в этом случае образующиеся в бетоне под ударной нагрузкой микротрещины инициируют образование и развитие таковых при последующем сжатии образцов, что приводит к снижению его прочности. Одновременно экспериментально установлено, что изменения величины (снижение) скорости ультразвука фиксируются раньше, чем наступает снижение прочности бетона, подверженного воздействию циклических нагрузок. Это позволяет использовать ультразвуковые приборы для раннего обнаружения деструктивных процессов в эксплуатируемых бетонных элементах мощения.

Таблица 2

**Влияние статической нагрузки на характеристики бетона
при циклических испытаниях**

Уровень статической нагрузки, % от $f_{cm,28}$	Характеристики бетона после числа циклов «сжатие-отпуск», цикл:													Прочность бетона и скорость ультразвука по последнему значению, % от начального
	0*	1	2	3	4	5	10	20	30	40	50	60	70	
а) Прочность бетона на сжатие, МПа:														
30	45**	–	–	–	–	45	46	45	44	44	43	43	42	93
	53***	–	–	–	–	53	53	54	52	52	53	52	51	96
50	45	–	–	–	–	45	45	43	43	40	37	35	78	
	53	–	–	–	–	53	53	52	51	50	49	47	45	85
50****	43	–	–	–	–	43	42	40	38	37	35	33	–	77
	52	–	–	–	–	52	52	50	48	47	45	43	41	79
70	45	–	–	–	–	45	45	42	39	36	–	–	–	80
	53	–	–	–	–	53	53	51	49	45	40	–	–	75
70****	43	–	–	–	–	43	41	37	33	–	–	–	–	77
	52	–	–	–	–	52	51	48	44	39	–	–	–	75
90	45	44	42	40	38	35	–	–	–	–	–	–	–	78
	53	52	50	48	45	42	–	–	–	–	–	–	–	80
б) Скорость ультразвука, м/с:														
30	4360**	–	–	–	–	4350	4310	4300	4300	4240	4160	4040	3880	89
	4520*	–	–	–	–	4520	4500	4500	4500	4440	4380	4350	4330	96
50	4360	–	–	–	–	4350	4350	4180	4060	3890	3660	3290	2800	64
	4520	–	–	–	–	4520	4500	4330	4210	4130	3950	3660	3270	72
70	4360	–	–	–	–	4270	3820	3300	2970	2780	–	–	–	64
	4520	–	–	–	–	4480	4360	4100	3910	3270	–	–	–	72
90	4360	–	–	3390	–	2100	–	–	–	–	–	–	–	48
	4520	–	–	3640	–	2380	–	–	–	–	–	–	–	53

Примечание: 0* – в возрасте 28 суток; ** – образцы мелкозернистого бетона; *** – образцы бетона со щебнем; **** – в водонасыщенном состоянии.

Таблица 3

Изменение прочности на сжатие и водопоглощения по массе бетона под воздействием динамической (ударной) нагрузки

Условия твердения бетона	Вид бетона	Значения характеристики бетона, после количества ударов:							Прочность бетона (прирост водопоглощения) по последнему значению, % от начального
		0 28 сут	25	50	75	100	125	150	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
А) Прочность бетона на сжатие, МПа									
Естественные (в пленке)	мелкозернистый	45*	45	44	43	41	39	34	75
		43**	41	37	32	–	–	–	74
Естественные (в пленке)	со щебнем	45***	45	44	43	43	42	41	91
		53*	53	52	52	50	48	44	83
		51**	50	47	43	39	–	–	76
Воздушно-сухие	мелкозернистый	53***	53	53	52	52	51	50	94
		41*	40	40	38	36	32	28	70
	со щебнем	39**	36	30	–	–	–	–	77
		48*	48	46	44	43	41	38	80
Пропаривание с дозреванием	мелкозернистый	46**	44	41	37	–	–	–	80
		43*	42	42	40	38	36	31	73
	со щебнем	41**	39	34	29	–	–	–	70
		51*	51	50	48	48	46	42	82
		50**	48	45	41	36	–	–	72
Б) Водопоглощение бетона по массе									
Естественные (в пленке)	мелкозернистый	4,0	–	4,3	–	4,8	–	5,6	40
	со щебнем	3,1	–	3,3	–	3,5	–	3,8	23
Воздушно-сухие	мелкозернистый	5,5	–	5,9	–	6,9	–	8,1	47
Воздушно-сухие	со щебнем	4,4	–	4,6	–	4,9	–	5,6	27
Пропаривание с дозреванием	мелкозернистый	4,6	–	4,9	–	5,2	–	6,2	35
	со щебнем	3,8	–	4,0	–	4,3	–	4,7	24

Примечание: *Направление ударов совпадает с направлением действия нагрузки при последующем сжатии; ** в водонасыщенном состоянии; *** направление ударов – по боковой грани (т. е. перпендикулярно направлению действия нагрузки при последующем сжатии).

В результате установлена взаимосвязь между накапливающимися изменениями в структуре бетона и отражающим эти изменения фактором – скоростью ультразвука, путем имитации механических эксплуатационных воздействий в процессе испытаний образцов на морозостойкость. Накопление данных осуществляли поэтапно. Вначале образцы бетона подвергали испытаниям на морозостойкость (без и с приложением механических нагрузок) в водной среде; на второй стадии испытаний – с использованием 5 %-го раствора NaCl. В обоих случаях в процессе испытаний на морозостойкость (при температуре: $-(50-55)$ °C) отслеживали изменения массы, прочности бетона и соответствующие изменения скорости ультразвука, отражающие структурные изменения в испытываемых образцах бетона.

При этом выявлено, что статическая нагрузка, достигающая не менее 60–70 % от проектной, и, особенно, динамическая (ударная, сосредоточенно приложенная) при циклическом замораживании-оттаивании приводят к ускоренному разрушению бетона и снижению его износоустойчивости. Одновременно было установлено, что морозостойкость образцов вибропрессованного бетона, полученных резкой тротуарных плит, резко снижается относительно как специально изготовленных в формах образцов-кубов, так и натуральных образцов-плит.

Разница в показателях морозостойкости бетона настолько значительна, что это потребовало внесения изменений в СТБ 1152-99 в части недопустимости изготовления образцов для испытаний на морозостойкость резкой готовых изделий, которые были приняты Госстандартом Республики Беларусь (см. данные о внедрении).

Основные положения методики оценки морозостойкости бетона. По результатам выполненных исследований определено, что используя значения скорости ультразвука, изменяющейся в процессе испытаний образцов бетона на морозостойкость (как в среде воды, так и солевом растворе (в последнем случае указанные далее периоды короче по времени)), возможно выделить три стадии структурно-прочностных изменений в вибропрессованном бетоне испытываемых образцов или элементах эксплуатируемых покрытий. Первая стадия – это период уплотнения его структуры, отражающийся в росте прочности и скорости ультразвука; вторая – стабилизация структуры при примерном постоянстве прочности и

скорости ультразвука и третья – начало и развитие деструкции бетона, отражаемой снижением скорости ультразвука и прочности. Выявленные закономерности позволили разработать графические зависимости, представленные для примера рис. 2. и являющиеся неотъемлемой частью предлагаемой методики.

Обобщение накопленных экспериментальных данных, позволило предложить: методику ускоренной (за пять суток) оценки морозостойкости вибропрессованного бетона в изделиях без осуществления циклических испытаний (не приведены в статье), а также методику оценки фактического состояния вибропрессованного бетона элементов благоустройства (мощения) в процессе эксплуатации покрытий (рисунок 2), на основании установленного по разработанной методике количества циклов «замораживания-оттаивания», которые «прошел» (накопил) бетон к моменту его оценки в привязке к стандартизированным циклическим испытаниям на морозостойкость и предлагаемым расчетным «приведенным» циклам (табл. 4). В обоих случаях оценка осуществляется по фактическим величинам влажности и скорости ультразвука в испытуемом бетоне. Величина последней сопоставляется с экспериментально установленным в настоящем диссертационном исследовании диапазоном ее значений, выявленным в процессе стандартных испытаний на морозостойкость образцов мелкозернистого (цементно-песчаного; рис. 2, *a* или *б*), либо бетона с крупным заполнителем (графические закономерности приведены в диссертации) и отражающим структурные (прочностные) изменения в бетоне на разных стадиях: упрочнения структуры, ее стабильности и разуплотнения структуры (деструкции). По полученному среднему значению $V_{уз,i}$ определяют количество стандартных циклов испытаний $N_{факт,i}$, которые прошел (накопил) бетон (рис. 2, *в* или *г*) и «остаточную» морозостойкость бетона из зависимости: $F_{оснi} = 250 - N_{фактi}$, циклов.

Ожидаемую долговечность оцениваемого бетона (элементов мощения) рассчитывают по зависимости: $D_i \sim F_{оснi} / N_{пр}^{зод}$, год.

Ее расчет (в годах) предложено осуществлять по «приведенным» циклам табл. 4, учитывающим отличия (по глубине, времени замораживания-оттаивания) циклического воздействия на бетон, в процессе эксплуатации покрытий от стандартизированных испытаний бетона на морозостойкость, с учетом среднегодовых данных о ко-

личестве таких циклов за холодный период года в климатической зоне эксплуатации покрытия и влияния механических нагрузок на бетон. При разработке методики и данных табл. 4 учтено, что, например, для г. Минска (за период 2000–2013 гг.) количество переходов температуры через отметку «0 °С» составило, в среднем более 100, т. е. приблизительно 50 естественных циклов за год. *Методика ускоренной оценки морозостойкости бетона изделий, изготовленных вибропрессованием и не подвергавшихся эксплуатационным воздействиям, предназначена для оценки этого показателя в оперативном порядке предприятиями-изготовителями элементов благоустройства (мощения). По результатам такой оценки технологические службы, при необходимости, корректируют параметры производственного технологического процесса.*

Таблица 4

Расчетное количество среднегодовых «приведенных» циклов

Состояние структуры бетона, установленное в процессе оценки	Расчетное количество $N_{пр}^{зод}$, цикл/год, в зависимости от условий эксплуатации покрытий: уровня и вида механических нагрузок			
	отсутствует или статическая, менее 40 %	статическая, (40–50) %	статическая, (51–60) %	статическая, > 60 % и динамическая
Стадия I (упрочнение и стабильность – начальная фаза)	12,5	13,5	14,5	17,5
Стадия II (стабильность – завершающая фаза)	13,5	15,0	16,5	20,0
Стадия III (разуплотнение)	20,0	21,0	22,5	25,0

Заключение:

1. Разработана, экспериментально обоснована и апробирована методика оперативной оценки фактического состояния вибропрессованного бетона в процессе эксплуатации изготовленных из него элементов благоустройства (тротуарных и иных плит, бортовых и иных камней) и их ожидаемой (остаточной) морозостойкости, а также долговечности устроенных из них покрытий с учетом комплексных физико-механических воздействий на бетон, что позволяет осуществлять плановое или контрольное наблюдение за состоянием таких покрытий с использованием методов неразрушающего

контроля (для определения влажности бетона и скорости ультразвука в нем), заблаговременно планировать ремонтные мероприятия или их замену, а также позволяет оценить возможность повторного использования изымаемых из покрытий элементов мощения и ожидаемый срок их дальнейшей эксплуатации [1, 3].

2. Разработана, экспериментально обоснована и апробирована методика

ускоренной оценки морозостойкости бетона вибропрессованных изделий – элементов благоустройства (мощения), не подвергавшихся эксплуатации, позволяющая произвести оценочные испытания бетона в течение пяти дней с использованием методов неразрушающего контроля влажности и скорости ультразвука (без проведения циклических испытаний) и определить данный показатель, а на этом основании вносить (при необходимости) корректировки в технологический процесс изготовления изделий с целью обеспечения требуемой морозостойкости бетона и качества продукции [2, 4, 5].

3. Получены новые результаты комплексных экспериментальных исследований, выявившие закономерности «накопления» изменений в структуре (пористости) вибропрессованного бетона под влиянием циклического воздействия замораживания-оттаивания в водной среде или растворе NaCl при одновременном дополнительном воздействии статической или динамической (ударной, сосредоточенно приложенной) нагрузки, что позволило установить возрастающее деструктивное влияние статической нагрузки, превышающей уровень в 50 % от его проектной прочности, резко нарастающее при ее увеличении не менее 70 % от проектной, и, особенно, под действием ударной сосредоточенно приложенной динамической нагрузки, в итоге приводящих к снижению устойчивости бетона при циклических воздействиях как испытательной, так и эксплуатационной среды, снижению его эксплуатационной надежности и долговечности в 2–3 и более раза [4, 5, 6].

4. Получены новые результаты экспериментальных исследований, выявившие закономерности изменения скорости распространения ультразвукового импульса в бетоне, подверженном комплексному воздействию размораживания и механических нагрузок, которые подтверждают взаимосвязь этих изменений с нижней (не менее 40 % проектной прочности бетона на сжатие) и верхней (не менее 70 % проектной прочности бетона) границами трещинообра-

зования и адекватно отражают соответствующие изменения в состоянии структуры (пористости) бетона. Данные закономерности позволили разработать графические зависимости для оценки фактического состояния бетона в процессе его эксплуатации и количественно (по установленным значениям влажности и скорости ультразвука) оценить степень морозной деструкции испытываемого (или – эксплуатируемого) бетона. На этом основании (по разработанной методике) рассчитать его «остаточную» морозостойкость и ожидаемую эксплуатационную долговечность, а также определить возможность повторного использования изымаемых при ремонтах (заменах) элементов мощения и ожидаемый период их эксплуатации [2, 4].

5. Получили развитие представления о влиянии технологических факторов: состава бетона, свойств материалов, степени уплотнения и условий твердения, на структурные и прочностные характеристики вибропрессованного бетона, что позволяет определять рациональное сочетание их с целью обеспечения требуемой морозостойкости элементов благоустройства, изготавливаемых способом вибропрессования; выявленные при этом закономерности изменения скорости ультразвука в процессе испытаний бетона на морозостойкость позволили предложить и обосновать ускоренную методику ее оценки в вибропрессованных изделиях, не подвергавшихся эксплуатационным воздействиям. В совокупности это развивает и дополняет теоретические и эмпирические положения о морозной деструкции конструкционного бетона, методах и приемах ее оценки [1, 2, 6].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горчаков, Г. И., Капкин, М. М., Скрамтаев, Б. Г. Повышение морозостойкости бетона в конструкциях промышленных и гидротехнических сооружений. – М.: Стройиздат, 1965. – 195 с.
2. Москвин, В. М., Подвальный, А. М. Морозостойкость бетона в напряженном состоянии. Бетон и железобетон, 1960, № 2.
3. Ахвердов, И. Н., Каплан, Э. Л. Механизм упрочнения бетона при его раннем замораживании/ДАН БССР, Т. 17, № 7. – Минск, 1967. – С. 688–691.
4. Батяновский Э. И. Влияние многократных механических нагрузок на свойства тяжелого бетона / Э. И. Батяновский, А. И. Бон-

дарович, П. В. Рябчиков // Строительная наука и техника, 2007. – № 1–10. – С. 12–22.

5. Батяновский Э. И. Морозо- и солестойкость бетона, подверженного механическим нагрузкам / Э. И. Батяновский, А. И. Бондарович // Вестник БНТУ, 2008. – № 4. – С. 5–16.

6. Бондарович, А.И. Влияние комплексного воздействия эксплуатационной среды и механических нагрузок на динамику изменения свойств бетона элементов благоустройства / А. И. Бондарович, Э. И. Батяновский // Вопросы внедрения норм проектирования и стандартов европейского союза в области строительства: материалы научно-методического семинара (Минск, 22–23 мая 2013 г.): сб. науч. статей науч.-метод. семинара. в 2-х частях. – Минск: БНТУ, 2013 г. Ч. 2. С. 28–39.

УДК 691.41

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ МЕМБРАННОЙ ГИДРОИЗОЛЯЦИИ

ГАЛУЗО О. Г., РОМАНОВ Д. В.

Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Республика Беларусь

К гидроизоляционным материалам относят строительные материалы, обладающие водонепроницаемостью и соответствующие определенным эксплуатационным требованиям по прочности, биостойкости, теплостойкости, деформативности. Применяются для защиты строительных конструкций и сооружений от воздействия воды с целью обеспечения их долговечности, а также для предотвращения утечки воды или других жидкостей из резервуаров и других емкостей.

В XXI веке, учитывая загрязненность атмосферы и воздействие агрессивных веществ на конструкции, может проникать в материал конструкции не только вода, но и водные растворы различных агрессивных веществ. Поэтому, кроме водонепроницаемости, важным показателем качества гидроизоляции становится ее химическая стойкость.