

Саназ Мохаммад ЭГБАЛНИК, инженер, аспирант кафедры "Технология бетона и строительные материалы" Белорусского национального технического университета

Эдуард Иванович БАТЯНОВСКИЙ, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой "Технология бетона и строительные материалы" Белорусского национального технического университета

ТЕХНОЛОГИЯ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗАЩИТЫ ТВЕРДЕЮЩЕГО БЕТОНА ВЕЩЕСТВОМ СУЛЬФОАЛЮМИНАТА

THE TECHNOLOGY AND INFLUENCE OF HARDENING CONCRETE PROTECTION WITH SUBSTANCE OF SULFOALUMINATE

В статье представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований, обосновывающих и подтверждающих эффективность ухода за твердеющим цементным бетоном путем нанесения на защищаемую поверхность водного раствора уплотняющего структуру цементного камня вещества — сульфата алюминия ($Al_2(SO_4)_3$).

The article presents the results of theoretical and experimental researches proving and confirming the efficiency of care for hardening cement concrete by coating the protected surface with water solution of a cement stone sealing structure substance — aluminium sulphate ($Al_2(SO_4)_3$).

ВВЕДЕНИЕ

Физико-химические основы разрабатываемой технологии первичной защиты бетона базируются на физическом явлении массо-, влагопереноса, сопровождающем начальный период твердения цементного бетона, и на химическом взаимодействии наносимых на защищаемую поверхность веществ с продуктами процесса гидролиза-гидратации клинкерных минералов цемента, в результате которого образуются новые соединения большего объема, уплотняющие структуру камня на некоторую глубину. Как следствие — сужаются или колюматрируются (закупориваются) каналы движения жидкости [1–6], а в результате уменьшаются потери на испарение воды затворения, что обеспечивает условия, благоприятные для твердения цемента и соответственно для формирования более плотной и непроницаемой структуры цементного камня и бетона в целом.

Свежеотформованный бетон представляет собой систему, проницаемость которой для химических реагентов связана с наличием объема воды затворения и в частности той ее части, которая образует пленку некоторой толщины на поверхности бетона в первоначальный период после его укладки. Данное явление связано как с избыточным количеством жидкости по условиям формирования, так и с развитием контракционно-сидиментационных эффектов во времени [7–12]. Контракционные явления сопровождаются возникновением разрежения в объеме бетона, оцениваемого величиной перепада с атмосферным до 140–180 мм рт. ст. [13, 14], то есть до $\sim(18\ 660\text{--}24\ 000)$ Па. Кроме того, процесс формирования структуры цементного камня в твердеющем бетоне приводит к появлению системы сообщающиеся пор, обладающих способностью сорбировать (капиллярный подсос) контактирующую с поверхностью бетон жидкость. Все это в целом создает необходимые и достаточные условия для реализации приема защиты твердеющего бетона путем нанесения соответствующих химических реагентов в виде водных растворов на открытые поверхности конструкций. Проникновение их вещества в объем формирующейся структуры внешнего слоя цементного камня (бетона), очевидно, связано как с диффузией ионов молекул растворенных в воде ве-

ществ, так и с массопереносом раствора в пористой среде, которую представляет собой цементное тесто, трансформирующееся в цементный камень. Поэтому количественная оценка глубины и времени пропитки может быть дана с учетом фундаментальных представлений о процессе фильтрации жидкостей в пористых средах [15–20], а на этом основании могут быть разработаны режимы ухода за бетоном: время нанесения защитных составов, расход вещества, периодичность нанесения и иные параметры, в зависимости от условий твердения и других факторов.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОПИТКИ ВНЕШНЕГО СЛОЯ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

Исходя из фундаментальных закономерностей фильтрационной гидравлики [15–20] для пористых мелкозернистых твердофазных сред в [21] была получена формула для расчета глубины (l , м) проникновения в сухие бетонные смеси жидкости (воды, растворов химических добавок) в виде:

$$l = \frac{m_3 \cdot d_3}{1 - m_3} \cdot \sqrt{\frac{\beta P_n \cdot \tau}{\rho_x \cdot \mu_d}}, \quad (1)$$

где μ_d — динамическая вязкость жидкости, Н·с/м²;
 ρ_x — плотность, Н/м³;
 P_n — давление, при котором развивается процесс фильтрации, Па (Н/м²);
 τ — время, с;
 d_3 — эффективный (усредненный) размер (диаметр) частиц цемента, м;
 m_3 — пористость, доли ед.;
 β — эмпирический коэффициент Н/м³.

Формула (1) взаимоувязывает свойства фильтрата: μ_d , ρ_x , τ , характеристики фильтрационной среды: d_3 , m_3 , а также коэффициент β , введенный Козени в расчетные формулы фильтрационной гидравлики. Выражение (1) может быть упрощено для рассматриваемого авторами случая обработки поверхности бетона. В частности, приняв (с достаточной для практических расчетов точностью) [21–23] величину расчетного эффективного диаметра зерна цемента $d_3 \sim 11,5 \cdot 10^{-6}$ м, и введя величину давления

вакуума P_c , Па (Н/м^2), а также коэффициент пористости цементного теста $\epsilon_{ц.т} = m_3 / (1 - m_3)$, доли ед., и значение поправочного коэффициента β , Н/м^3 , формула (1) в общем случае при размерности (м) приобретает вид

$$\ell = 11,5 \cdot 10^{-6} \cdot \beta \cdot \epsilon_{ц.т} \cdot \sqrt{\frac{P_c \cdot \tau}{\rho_{ж} \cdot \mu_d}} \quad (2)$$

В частности, при дальнейшем ее преобразовании для установленного [13, 14] минимально значимого давления $P_c \sim 1200$ Па, в случае обработки защитным составом (раствором) свежееотформованного бетона вводим поправочный коэффициент: $\beta_{св}$, а для ухода за ним после снятия опалубки (бортоснастки) — поправочный коэффициент $\beta_{он}$, а также, учтя экспериментально установленную авторами статьи продолжительность наиболее интенсивного периода впитывания вещества добавки $\tau = 86\,400$ с (24 ч), зависимость (2) преобразуется в вид:

— для свежееотформованного бетона:

$$\ell_{св} = 117 \beta_{св} \cdot \epsilon_{ц.т} \cdot \sqrt{1 / \rho_{ж} \cdot \mu_0} \quad (3)$$

— для варианта ухода за бетоном после снятия опалубки:

$$\ell_{он} = 117 \beta_{он} \cdot \epsilon_{ц.т} \cdot \sqrt{1 / \rho_{ж} \cdot \mu_0} \quad (4)$$

Значения входящего в формулы (3) и (4) эмпирического (поправочного) размерного коэффициента β , который характеризует особенности фильтрационной среды, и, например, в исследованиях [21] для случая насыщения цементосодержащих сухих бетонных смесей водой под давлением был определен равным $\beta \sim 11,4 \text{ Н/м}^3$, а в классической гидравлике для фильтрации воды через песчаные грунты β — от 8,4 (Козени) до 350 Н/м^3 (Зауэрбрей) (по данным разных исследователей, приведенным в [15]), следовало уточнить для рассматриваемого авторами частного варианта фильтрации. Его особенностью является, с одной стороны, весьма низкое давление, инициирующее процесс массопереноса, и практически непредсказуемое влияние химического взаимодействия вводимого вещества с продуктами гидролиза-гидратации цемента.

На основании накопленных экспериментальных данных по формулам (3) и (4), при всех известных (кроме β) значениях входящих в эти зависимости других факторов, определено, что для обработки свежееотформованного бетона коэффициент $\beta_{св} \sim 2,42 \times 10^{-2} \text{ Н/м}^3$, а при уходе за бетоном после снятия опалубки $\beta_{он} \sim 1,36 \cdot 10^{-2} \text{ Н/м}^3$. В результате после введения этих значений коэффициента β в формулы (3) и (4) для случая ухода за свежееотформованным бетоном уплотняющими структурами веществами (растворами, характеризующимися известными $\rho_{ж}$ и μ_0) или после снятия опалубки соответственно они упрощаются до вида:

$$\ell_{св} = 2,83 \epsilon_{ц.т} \cdot \sqrt{1 / \rho_{ж} \cdot \mu_0} \quad (5)$$

$$\ell_{он} = 1,59 \epsilon_{ц.т} \cdot \sqrt{1 / \rho_{ж} \cdot \mu_0} \quad (6)$$

Сопоставление значений коэффициента β , полученных авторами, с приведенным в работах по исследованиям в области напорной фильтрационной гидравлики или при водонасыщении сухих смесей под давлением, по мнению авторов, реально отражает ухудшение (усложнение) условий массопереноса в рассматриваемых случаях. Согласно полученным (с учетом сделанных допу-

щений и упрощений) зависимостям (5) и (6), глубина проникновения вещества уплотняющей добавки вглубь объема цементного теста в бетоне связана прямой зависимостью с коэффициентом его пористости и обратной — с плотностью и динамической вязкостью раствора-фильтрата, что не противоречит физико-химической сути явления массопереноса.

Для практических расчетов по формулам (5) и (6) целесообразно использовать значения коэффициента пористости $\epsilon_{ц.т}$ цементного теста в тяжелом бетоне на заполнителях из плотных горных пород, установленные профессором И. Н. Ахвердовым и приведенные им в [24, с. 126], а также опубликованные в диссертационном исследовании автора (С. М. Эгбалник). В табл. 1 приведены данные экспериментальной проверки формул (5) и (6). В качестве защитного состава при выполнении этих экспериментов использовали 5%-ный водный раствор $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, характеризующийся при температуре 20°C общеизвестными справочными данными о плотности и динамической вязкости, составляющими для указанной концентрации и температуры: $\rho_{ж} \sim 1051 \text{ Н/м}^3$; $\mu_d \sim 0,001416 \text{ Н}\cdot\text{с/м}^2$, что необходимо для теоретического расчета по формулам (5) и (6); температура обрабатываемых образцов соответствовала $\sim 20^\circ\text{C}$ ($20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$).

На основании данных табл. 1 можно сделать вывод об адекватности зависимостей (5) и (6) и что они, в общем, дают возможность оценить вероятную глубину проникновения в цементный камень бетона вещества защитного состава и соответственно толщину формирующегося слоя цементного камня с уплотненной и менее проницаемой структурой. При этом подтверждается правомочность сделанного при выводе формул (5) и (6) допущения по расчетному времени $\tau_{расч} \sim 24$ ч. Очевидно, что глубина проникновения вещества защитного состава, которая достигается за первые 24 ч после обработки, в дальнейшем увеличивается незначительно.

ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ЗАЩИТЫ ТВЕРДЕЮЩЕГО БЕТОНА

При обосновании выбора материала защитного состава использовали гидрофобизатор — водную

Таблица 1. Расчетная и экспериментальная толщины измененного слоя цементного камня

Способ обработки поверхности; расчетная формула	Расчетная толщина слоя, мм	Экспериментальные данные о слое ЦК, мм, через период времени, сут			
		1	3	7	28
По свежееотформованной; (5)	2,25	2,231	2,233	2,238	2,249
		2,205	2,211	2,216	2,235
		2,229	2,235	2,239	2,257
		2,277	2,284	2,288	2,298
		2,306	2,310	2,318	2,339
		2,218	2,243	2,255	2,269
		2,245 *	2,252 *	2,259 *	2,275 *
		1,290	1,305	1,313	1,315
После распалубки; (6)	1,26	1,282	1,306	1,310	1,310
		1,247	1,255	1,265	1,269
		1,169	1,195	1,200	1,203
		1,283	1,289	1,306	1,306
		1,280	1,290	1,293	1,293
		1,258 *	1,273 *	1,281 *	1,282 *

* Среднее значение по шести образцам.

эмульсию этиленгидроксилосана (гидрофобизирующая жидкость 136-41 или ГЖ-94) [25], а в качестве уплотняющих структуру цементного камня веществ использовали разработанный в Белорусском государственном технологическом университете защитный состав "Сифтом" ($MgSiO_2F_6$) [26], а также разрабатываемые в БНТУ [27] защитный многокомпонентный состав для уплотнения и упрочнения металлических поверхностей с целью повышения их износоустойчивости (без расшифровки состава разработчиками) и стандартизированную химическую добавку в бетон, характеризующуюся эффектом уплотнения структуры цементного камня, — сульфат алюминия $Al_2(SO_4)_3$ [25].

После оценки эффективности по критерию потерь воды (испарения) в воздушно-сухих условиях твердения ($t - (20 \pm 2)^\circ C$; $\varphi - 60\% - 65\%$) образцов цементного камня ($20 \times 20 \times 20$ мм) исследовали влияние защитных составов (более эффективных по первому критерию) на прочность цементного камня. Из экспериментальных данных табл. 2 (средняя прочность на сжатие серий из шести образцов цементного камня, изготовленных из теста нормальной плотности ПЦ М500-Д20; $K_{нр} - 0,28$ и обозначенных: КБ — контрольные (поверхность не обрабатывали); СА — обработка раствором сульфата алюминия; С — раствор "Сифтом"; N — раствор-дисперсия состава А. А. Шматова) следует, что устойчивым эффектом увеличения прочности обработанных защитным составом образцов цементного камня над необработанными, при прочих равных условиях, характеризовался раствор $Al_2(SO_4)_3$. При этом до возраста 3–7 сут он уступал в эффективности веществам-обоих других защитных составов, а после 14 сут твердения ситуация изменялась, и к 28 сут прочность образцов цементного камня, обработанных ими (после формования — по верхней грани; через 24 ч и распалубки — по всем остальным), снизилась. Как видно, прочность снизилась не только у образцов, обработанных раствором $Al_2(SO_4)_3$, но и у контрольных (без обработки) образцов цементного камня. Данный отрицательный эффект к возрасту 28 сут значительно проявился при обработке поверхности образцов, подогретыми до $30^\circ C - 50^\circ C$, защитными составами.

Анализ отмеченного явления относительно вещества $MgSiO_2F_6$ показывает следующее. На начальной стадии взаимодействия ионы этого вещества вступают в обменные реакции и реакции присоединения с $Ca(OH)_2$, выделяемой при гидролизе-гидратации силикатных клинкерных минералов цемента и другими продуктами его гидратации, образуя труднорастворимые соединения, уплотняющие структуру цементного камня (как это показано разработчиками данного вещества в [26, 28, 29]). В результате ограничивается испарение воды из цементного камня, что способствует развитию реакций цемента с водой и росту его прочности. Однако содержащиеся в "Сифтоме" ионы фтора (и в достаточном большом количестве) начинают проявлять собственную реакционную активность, что и приводит к снижению прочности цементного камня за счет взаимодействия образуемой им кислоты как на затвердевший камень, так и на дальнейшее развитие процесса гидратации цемента и упрочнение камня. Поскольку в рассматриваемом случае эти процессы развиваются с поверхности вглубь образцов, то отрицательный эффект воздействия фтора прогрессирует со временем.

Таблица 2. Изменение прочности цементного камня в воздушно-сухих условиях твердения

Температура среды, °C	Обозначение серии образцов	Прочность цементного камня на сжатие, МПа, в возрасте, сут				
		3	7	14	28	
					МПа	%
30	КБ	35,4	38,8	39,3	39,5	100
	СА	38,4	42,5	43,6	43,9	111
	С	38,8	40,6	40,0	39,1	99
	N	41,2	41,5	39,5	38,4	97
40	КБ	38,8	39,5	39,8	40,0	100
	СА	42,3	43,1	43,0	43,4	110
	С	43,5	43,9	41,9	39,2	98
	N	43,6	44,0	38,2	37,5	94
50	КБ	39,2	40,1	39,0	39,0	100
	СА	41,7	42,6	42,8	43,6	110
	С	42,5	42,0	41,6	38,2	97
	N	42,7	42,0	41,1	36,6	94
30 *	СА-30	42,0	43,5	43,9	45,0	100
	С-30	42,9	42,9	41,8	39,5	88
	N-30	43,8	43,0	41,4	38,3	85
	СА-50	44,4	44,7	44,7	46,2	100
	С-50	45,6	44,3	42,0	38,8	84
	N-50	45,5	45,6	41,1	37,6	81

* Твердение до 14 сут при $t - 30^\circ C$ после обработки поверхности составами, подогретыми до $30^\circ C$ и $50^\circ C$.

Аналогичное влияние на изменение прочности цементного камня оказало вещество многокомпонентного защитного состава по разработке А. А. Шматова. Следует отметить, что оно хорошо зарекомендовало себя при обработке "мягких" металлов и придании им повышенной износоустойчивости [27]. Равно как и "Сифтом", но при обработке поверхностей затвердевшего бетона [28, 29]. В рассматриваемом случае, то есть при защите твердеющего бетона, вещества, содержащиеся в этих составах и впитывающиеся в его объем, проявили неоднозначный эффект. Так, обеспечивая рост плотности твердеющего цементного камня на начальном этапе, они вызывали эффект снижения его прочности к проектному возрасту. С учетом полученных результатов в дальнейшем основную работу вели с использованием вещества $Al_2(SO_4)_3$; использование иных веществ ограничивали экспериментами сравнения.

Отработка технологии первичной защиты свежесформованного бетона включала экспериментальную оценку влияния концентрации вещества $Al_2(SO_4)_3$ в растворе, способа нанесения (смачивание поверхности и распыление сжатым воздухом), количества раз нанесения, времени начала обработки после формования при твердении в естественных воздушно-сухих условиях ($t - (20 \pm 3)^\circ C$; $\varphi - 60\% - 70\%$ и при повышенной до $30^\circ C$, $40^\circ C$ и $50^\circ C$ температуре, $\varphi - 50\% - 55\%$) в вариантах прогрева образцов в формах в течение 24 ч и твердения после распалубки до 14–28 сут; кроме указанного оценивали влияние скорости ветра (движения воздуха) в диапазоне $v_a - 0 - 10$ м/с.

Эффективность защиты твердеющего цементного камня и цементного (мелкозернистого и с крупным заполнителем) бетона оценивали по потерям влаги и изменению прочности на сжатие образцов разных типов-размеров и времени твердения. На рис. 1а, б показана

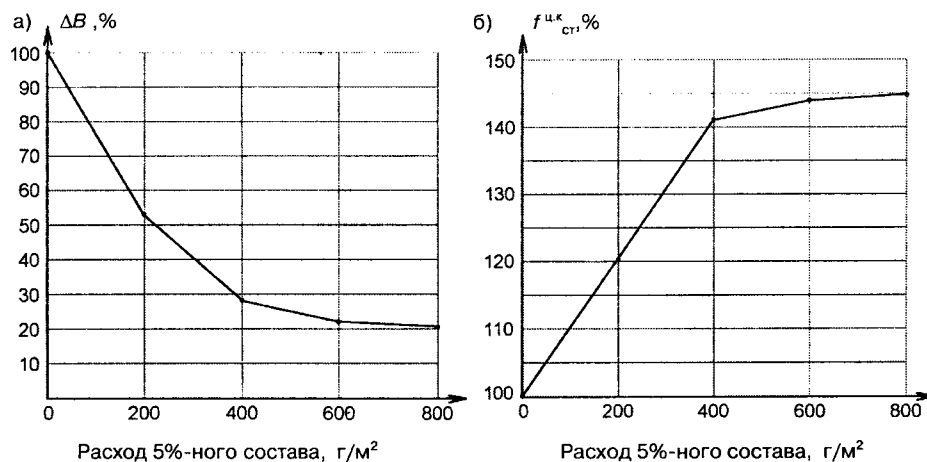


Рис. 1. Тенденция изменений потерь воды (а) и прочности образцов (б) в зависимости от расхода защитного состава

экспериментально определенная тенденция изменения потерь воды (см. рис. 1а) и прочности на сжатие (см. рис. 1б) образцами (20х20х20 мм) цементного камня (серия — 18 образцов; средние значения — по 12 образцам после исключения — по три максимальных и минимальных значений), которые прогревали в воздушно-сухих условиях в течение 24 ч при температуре 50 °С ($\phi \sim 50\%$). Расход защитного состава регулировали количеством раз нанесения (из расчета 200 г/м² за 1 раз) через 0 (после формования), 10, 20 и 30 мин. Для обеспечения ускоренного впитывания состава работали с подогревными до 30 °С–35 °С цементным тестом и формами.

Из тенденции, отраженной графиками рис. 1, следует, что расход защитного состава в виде 5%-ного раствора $Al_2(SO_4)_3$ более 400 г на 1 м² обрабатываемой поверхности нецелесообразен. Как снижение потерь влаги, так и рост прочности образцов цементного камня стабилизируются при таком расходе, мало изменяясь с его увеличением. Это можно объяснить тем, что сверх 2–3%-ного (относительно массы цемента) количества вещества $Al_2(SO_4)_3$ не может в тонком слое связаться продуктами гидролиза-гидратации цемента. При этом развитие реакций взаимодействия сульфата алюминия с ними, начинающихся с момента начала обработки, сопровождается перманентным уплотнением и снижением проницаемости обработанного слоя цементного камня, затрудняя диффузию вещества вглубь. Одновременно было установлено, что оптимальная концентрация рабочего раствора взаимосвязана с расходом уплотняющей структуру цементного камня (бетона) добавки и соответствует (при двухслойном нанесении) примерно: $C_p \sim 5\%$, что одновременно обеспечивает рациональный расход $Al_2(SO_4)_3$, соответствующий ~400 г защитного состава на 1 м² обрабатываемой поверхности.

Для разрабатываемой технологии ухода за твердеющим бетоном было необходимо оценить влияние температуры среды, оптимальное время и количество раз нанесения защитного состава. На рис. 2а, б и рис. 3а, б результаты экспериментов приведены в виде графических зависимостей потерь влаги и изменения прочности на сжатие образцов цементного камня в возрасте 28 сут при температуре среды твердения 30 °С, 40 °С и 50 °С и экспериментов с образцами тяжелого бетона (состав стандартизированный: цемента — 350 кг; гранитного щебня крупностью 5–20 мм — 1150 кг; природного песка — 675 кг; (В/Ц) = 0,5; подвижность — П1) с оценкой

изменений относительной прочности в зависимости от количества раз нанесения (интервал — 15 мин) распылением 5%-ного раствора $Al_2(SO_4)_3$. Обобщая частично приведенные и в целом полученные в исследованиях данные, сделан вывод, что период времени до нанесения защитного состава должен быть минимальным, и наиболее целесообразно наносить первый слой непосредственно после формирования и отделки (заглаживания) поверхности изделий или конструкций.

Анализ графиков на рис. 3а,

б показывает, что данные этого эксперимента коррелируются в целом с ранее приведенными (см. рис. 1) о необходимости и достаточности нанесения двух слоев защитного состава в виде 5%-ного раствора $Al_2(SO_4)_3$. Очевидно, что общий примерный расход раствора, соответствующий 400 г/м² для двухразового нанесения раствора указанной концентрации, близок к оптимальному. Вместе с тем фактическая стабилизация роста прочности получаемого бетона наступает при дополнительном нанесении третьего слоя раствора. Оценка ситуации по режиму ухода за бетоном, включая количество раз нанесения состава, потребовала дополнительных данных с учетом изменения температуры среды твердения и скорости ветра, так как выполненные эксперименты осуществляли при $v_a = 0$ м/с, что характерно для условий заводского производства, но не вполне соответствует условиям строительной площадки и открытым полигонам предприятий.

Влияние скорости движения воздуха и температуры

Для оценки влияния скорости движения воздуха (скорости ветра v_a , м/с) на процесс испарения влаги с защищаемой поверхности и прочность твердеющего бетона были выполнены эксперименты с образцами (20х20х20 мм) цементного камня и образцами-кубами (ребро — 70 мм) тяжелого бетона стандартизированного состава на цементе ПЦ М500-Д0. Их осуществили с использованием специально подготовленного приспособления в виде трубы-корпуса прямоугольного сечения (300х300 мм) 1000-миллиметровой длины с возможностью расположения до шести 18-гнездных форм с образцами цементного камня (с просветами между ними по высоте штабеля из форм), или до четырех трехгнездных форм с образцами бетона (кубы с ребром 70 мм). На входе трубы-корпуса фиксировался электрокалориферный нагреватель, позволявший обеспечивать регулируемый поток воздуха с температурой $t \sim 20$ °С (без включения нагревателя) и $t = 30$ °С и 40 °С с включением соответствующих диапазонов нагревателя. Вентилятор устройства был откорректирован на две позиции по скорости движения воздуха в начале трубы-корпуса — $v_a \sim 5,0$ и 7,0 м/с ($v_a \sim 0$ м/с при выключенном вентиляторе).

В настоящем эксперименте (результаты приведены в табл. 3) не практиковали сопоставление с незащищенным бетоном, как бесперспективное. Сравнительный базовый вариант — двухслойное защитное покрытие

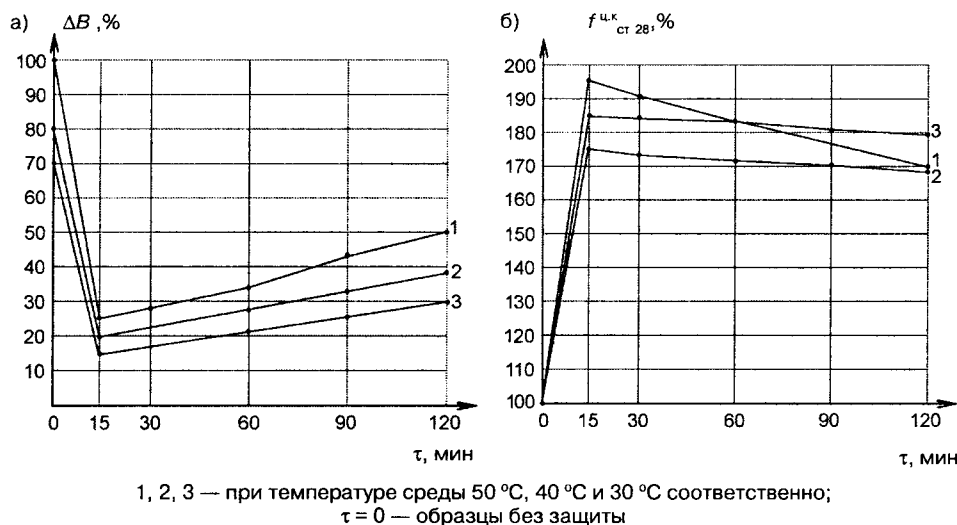


Рис. 2. Потери влаги образцами цементного камня (а) и изменение их прочности (б)

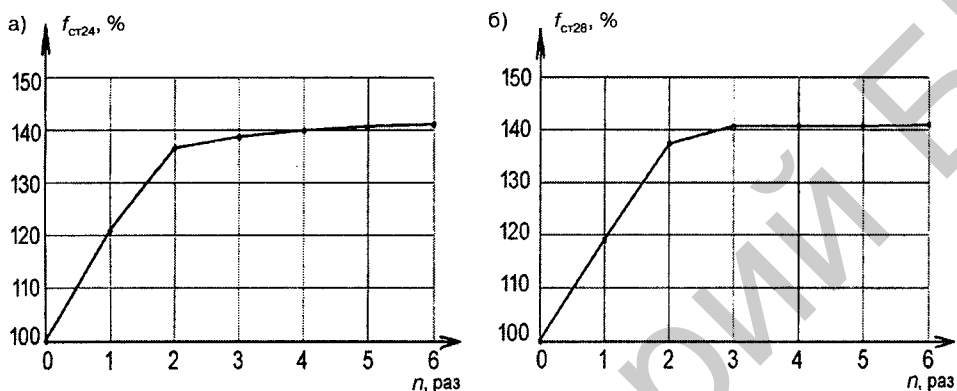


Рис. 3. Изменение относительной прочности бетона в зависимости от количества раз нанесения защитного состава в возрасте 24 ч (а) и через 28 сут (б)

Таблица 3. Влияние скорости ветра, температуры и расхода защитного состава на изменение прочности цементного камня

Температура воздуха, °С	Скорость ветра, м/с	Количество раз нанесения состава	Расход 5%-ного раствора $Al_2(SO_4)_3$, г/м ²	Прочность на сжатие цементного камня, МПа, в возрасте, сут			
				3	7	14	28
20	0	2	400	34,0	44,2	44,0	45,0
20	5,0	2	400	36,5	43,8	43,9	44,4
20	5,0	3	600	35,9	43,5	44,0	45,1
20	7,0	2	400	35,4	43,9	44,2	44,2
20	7,0	3	600	35,6	44,2	44,7	45,8
30	0	2	400	39,5	41,8	44,5	45,5
30	5,0	2	400	40,5	43,3	43,9	44,0
30	5,0	3	600	41,1	44,7	45,0	45,8
30	7,0	2	400	40,0	41,9	43,3	44,6
30	7,0	3	600	42,5	44,1	43,2	45,2
30	7,0	4	800	41,8	43,3	44,2	45,0
40	0	2	400	40,6	42,0	42,7	43,0
40	5,0	2	400	42,0	42,0	42,7	42,9
40	5,0	3	600	41,8	42,7	42,8	43,6
40	5,0	4	800	41,2	44,4	42,6	42,5
40	7,0	2	400	40,0	42,1	41,9	41,5
40	7,0	3	600	40,8	40,6	40,6	40,8
40	7,0	4	800	41,0	41,7	41,5	42,2

поверхности (то есть расход раствора $Al_2(SO_4)_3$ 5%-ной концентрации ~ 400 г/м²), с нанесением одного слоя сразу после формования, как и во всех вариантах (до четырех слоев) эксперимента. Последующие слои наносили с интервалами между ними в 15 мин. По нанесении последнего слоя все формы исследуемых вариантов помещали в устройство и подвергали испытаниям с фиксированной для каждого эксперимента скоростью ветра $v_b \sim 0; 5,0$ и $7,0$ м/с и температурой 20 °С, 30 °С и 40 °С.

Анализируя данные табл. 3 о результатах экспериментов с защищенными образцами цементного камня приходим к выводу, что существенных изменений в виде снижения их прочности не зафиксировано как с ростом температуры от 20 °С до 40 °С, так и при воздействии подвижного воздуха, включая одновременный рост температуры до 40 °С и скорости ветра до $7,0$ м/с. Можно отметить больший разброс значений прочности образцов в возрасте 3 сут, фактически наиболее интенсивного периода ее роста. К 7 сут твердения

прочность образцов достигает уровня (причем практически по всему объему эксперимента), который на 2%–4% ниже прочности в проектном возрасте. Очевидно также, что увеличение расхода раствора $Al_2(SO_4)_3$ в 1,5–2 раза над 400 г/м² (при двух слоях) эффекта не дает. Незначительный рост прочности образцов в трехсуточном возрасте не сопровождается таковым в более поздние сроки твердения, включая 28 сут. В целом приведенные результаты об изменениях прочности цементного камня коррелируют с полученными в исследованиях данными, включая закономерности потерь влаги цементным камнем (см. рис. 1, 2). Выявлено, что они стабилизируются после 3–7 сут твердения защищенных раствором $Al_2(SO_4)_3$ образцов. В определенной мере с этим связано явление стабилизации прочности цементного камня при твердении в воздушно-сухой среде с температурой ≥ 30 °С. В целом результаты этих экспериментов подтвердили достаточность расхода 5%-ного раствора $Al_2(SO_4)_3$ в 400 г/м² защищаемой поверхности свежесформованного цементного камня при его двухслойном нанесении.

Защита твердеющего после распалубки бетона

Основными факторами, воздействующими на частично затвердевший бетон после распалубки изделий или конструкций, являются температура воздушной среды и скорость движения воздуха (ветра). Дополнительный фактор — относительная влажность воздуха, которая в летний период работ в Беларуси преимущественно не

опускается ниже 70 %—75 %. С учетом этого обстоятельства, а также из-за чрезвычайной сложности перманентного контроля этого фактора для подвижной воздушной массы в последующих исследованиях его влияние учитывали косвенно, в совокупности с влиянием температуры и скорости движения воздуха (ветра), не выделяя в отдельный эксперимент.

В табл. 4 отражены изменения прочности бетона (стандартизированного состава на ПЦ М500-Д20), образцы которого первые 24 ч твердели в формах, а после распалубки — в экспериментальном устройстве (описание приведено ранее), расположенные на металлических подкладках так, чтобы воздушный поток в трубокорпусе соприкасался с их поверхностью по максимальной возможной площади.

В целом данные, полученные на образцах бетона, согласуются в общих тенденциях с ранее установленными закономерностями роста прочности образцов цементного камня в рамках экспериментов с изменением температуры и скорости движения воздуха. Особенностью полученных результатов является закономерное повышение темпа роста прочности образцов бетона в ранние сроки твердения (до 3 сут) с повышением температуры среды. Одновременно форсированный рост прочности при $t = 40\text{ }^\circ\text{C}$ приводит к ее стабилизации к 7 сут твердения и сопровождается недобором (относительно образцов, твердевших при $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$) на 2 %—4 % к проектному возрасту.

На рис. 4 показана тенденция роста прочности образцов бетона в более позднем возрасте, твердевших в стандартных нормально-влажностных условиях ($t \sim (20 \pm 2)\text{ }^\circ\text{C}$; $\phi \geq 90\%$ — график № 1) и при $t = (20 \pm 2)\text{ }^\circ\text{C}$ на воздухе (помещение лаборатории) с защитой свежееотформованной поверхности и после распалубки образцов двумя наносимыми распылением слоями 5%-ного раствора $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (график 2).

Из экспериментальных данных видно, что образцы защищенного бетона к 56 сут воздушно-сухого твердения (в рамках выполненного эксперимента достигают прочности бетона проектного возраста (то есть 28 сут), твердевшего в стандартных нормально-влажностных условиях. Это, с одной стороны, свидетельствует о сохранении защитного эффекта нанесенного состава во времени, а с другой — позволяет не прибегать к повышению проектной прочности защищаемого бетона с учетом ее последующего роста.

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЗАЩИЩАЕМОГО БЕТОНА

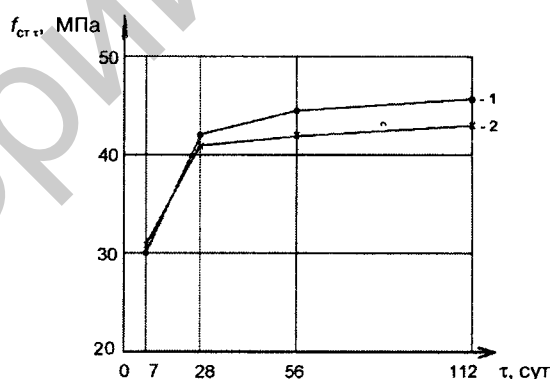
Испытания образцов мелкозернистого и тяжелого бетона с крупным заполнителем (составы стандартизированные) на прочность (сжатие, растяжение при изгибе, осевое растяжение раскалыванием), упруго-деформативные и эксплуатационные свойства (водо-, соле-, морозостойкость, истираемость, защитную способность по отношению к стальной арматуре) определяли в варианте сравнения: при наличии защиты поверхности образцов по разрабатываемой технологии 5%-ным раствором $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, либо без нее, либо в сопоставлении с иными вариантами защитных составов или приемов ухода за твердеющим в воздушно-сухих условиях бетоном.

Одним из существенных преимуществ защиты поверхности твердеющего бетона уплотняющим его структуру веществом является установленная экспери-

Таблица 4. Кинетика роста прочности бетона при различных режимах твердения в воздушно-сухих условиях

Температура среды твердения, $^\circ\text{C}$	Скорость ветра $v_{\text{в}}$, м/с	Прочность бетона на сжатие, МПа, в возрасте, сут				Относительная прочность бетона в возрасте 28 сут, %
		1	3	7	28	
20 (образцы не защищены)	0	7,6	22,0	23,3	24,5	60,5
20	0	6,2	21,1	30,8	40,8	100
20	5	6,5	21,8	31,0	40,0	98
20	7	6,7	22,9	30,6	39,6	97
30	0	11,3	30,2	38,8	40,0	98
30	5	12,0	31,6	38,9	39,6	97
30	7	12,2	32,5	37,7	39,2	96
40	0	18,2	36,5	37,0	39,5	97
40	5	18,8	35,2	37,0	39,3	97
40	7	19,5	36,1	39,0	38,6	95
40 *	0	18,9	35,5	38,4	40,0	98
40 *	5	19,0	35,3	38,9	39,4	97
40 *	7	20,1	36,3	39,0	39,3	97

* Раствор $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ наносили 3 раза (расход $\sim 600\text{ г/м}^2$).



1 — нормально-влажностные условия;
2 — воздушно-сухие с защитой поверхности образцов

Рис. 4. Тенденция роста прочности бетона с течением времени

ментально способностью обеспечивать достаточно высокое качество сцепления ранее уложенного (и затвердевшего) бетона с бетоном последующих слоев. Прочность сцепления старого (уложенного в форму за 24 ч до формирования второго слоя) и свежего (то есть второго) слоя тяжелого бетона с крупным заполнителем осуществляли, оценивая величину усилия и прочность на осевое растяжение образцов при испытаниях раскалыванием, с приложением сжимающей нагрузки в плоскости стыка слоев, в результате чего образец испытывает растягивающее усилие по сечению стыка.

Из данных табл. 5 следует, что наибольшим качеством сцепления слоев старого и свежего бетона характеризуются образцы, обработанные по разрабатываемой технологии 5%-ным раствором $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$. Далее по уровню прочности сцепления располагаются образцы при твердении первого слоя бетона под слоем воды (бассейновый вариант ухода), которая была налита на поверхность образцов через 30 мин после формирования

первого слоя, то есть в одно время с нанесением второго защитного слоя раствора $Al_2(SO_4)_3$ (№ 2), а также "Пенетрона" (№ 3) и пленкообразующего состава "Помороль-86".

Следует отметить практическое равенство средней плотности образцов бетона (естественное состояние) всех серий, твердевших до 28 сут в одинаковых условиях в помещении лаборатории, что свидетельствует о примерной однородности структуры бетона (одинаковом качестве формования) и обеспечивает принцип прочих равных условий при проведении эксперимента.

Сопоставление данных об уровне прочности в зоне контакта старого и свежего бетона без ухода за ним (принято за 100 %) показывает, что она в разрабатываемом варианте защиты бетона возрастает в 2,6 раза (до 263 %), то есть больше, чем при твердении старого бетона за этот период под слоем воды (в 2,3 раза; 230 %). В остальных случаях качество сцепления слоев значительно хуже, особенно при обработке поверхности пленкообразующим составом "Помороль-86". Сформировавшаяся пленка из его вещества предсказуемо снижает силы сцепления в зоне контакта старого и свежего слоев бетона.

Эффективность защитного состава из сульфата алюминия, по мнению авторов, связана со следующим. Во-первых, имеет место уплотнение и упрочнение поверхности первого слоя, то есть старого бетона в соответствии с ранее установленным механизмом взаимодействия вещества $Al_2(SO_4)_3$ с продуктами гидролиза-гидратации цемента с образованием дополнительных количеств гидрокристаллов гидросульфалюмината кальция и иных соединений, характеризующихся большим объемом, в сравнении с исходным объемом вступающих в реакцию веществ. Во-вторых, за 24 ч воздушного твердения не все нанесенное на поверхность образцов вещество $Al_2(SO_4)_3$ химически связывается. Та его часть, которая оседает на поверхности старого бетона, затем растворяется водой затворения при нанесении на эту поверхность свежего бетона. Диффундируя (впитываясь) в контактный слой цементного камня свежего бетона остаток вещества $Al_2(SO_4)_3$ вступает в реакции с продуктами гидролиза-гидратации цемента в этом слое, способствуя росту его плотности и прочности. В результате имеет место эффект срачивания контактирующих слоев с повышением сил их взаимодействия, что обеспечивает рост прочности в зоне их контакта, в сравнении с другими вариантами защиты бетона.

Одновременно отметим, что несмотря на выявленный рост сил сцепления в зоне контакта "старый — свежий" бетон, при его защите уровень прочности стыка ($f_{ctm} \sim 1,13$ МПа) существенно ниже прочности на осевое растяжение собственно бетона образцов-аналогов $f_{ctm} \sim 3,8$ МПа, установленный в данном эксперименте, то есть составляет ~30 % ее величины.

В табл. 6 приведены результаты сравнительной оценки физико-технических характеристик и свойств тяжелого бетона, твердевшего в воздушно-сухих условиях без мер защиты и с двухразовым нанесением 5%-ного раствора $Al_2(SO_4)_3$.

Таблица 5. Средние значения характеристик бетона серий из шести образцов

Номер серии и вариант защитного состава (ухода за стыком слоев бетона)	Масса образцов и средняя плотность бетона		Разрушающая нагрузка, Н	Прочность бетона на растяжение в зоне контакта слоев	
	m, г	ρ , кг/м ³		МПа	%
1. Без мер защиты	862	2390	2978	0,43	100
2. Нанесение 5%-ного раствора $Al_2(SO_4)_3$ в два слоя	885	2405	7884	1,13	263
3. Нанесение рабочего раствора состава "Пенетрон" в два слоя	875	2419	5081	0,73	170
4. Нанесение рабочего раствора пленкообразующего состава "Помороль-86" в один слой	877	2390	3677	0,53	123
5. Твердение 24 ч под слоем воды	885	2405	6931	0,99	230

Таблица 6. Физико-технические свойства бетона

Показатель и вид бетона	Размерность	Образцы без защиты	Обработка $Al_2(SO_4)_3$	Относительная величина показателя, %
1. Прочность на сжатие	МПа	28	40,5	145
2. Прочность на сжатие, мелкозернистый	МПа	32	48,5	152
3. Прочность на осевое растяжение (раскалыванием)	МПа	3,5	5,1	134
4. Прочность на осевое растяжение, мелкозернистый	МПа	3,9	5,3	136
5. Прочность на растяжение при изгибе, мелкозернистый	МПа	4,8	6,9	136
6. Модуль упругости, мелкозернистый	ГПа	22,0	28,0	127
7. Усадка при стабилизации к 42 сут, мелкозернистый	мкм	155	111	72
8. Количество химически связанной воды цементом (цементный камень) к 28 сут	%	9,7	13,2	136
9. Степень гидратации цемента	Доли ед.	43,0	58,1	135
10. Водопоглощение (по массе)	%	3,8	3,2	84
11. Морозостойкость	Марка	F200	F300–F350	150
12. Солестойкость в растворе NaCl по прочности к 20 циклам	МПа	31,4	38,8	124
13. Коррозионное состояние арматуры через 10 и 20 циклов	10 цикл.	Неустойчивое	Пассивное	—
	20 цикл.	Коррозия	Неустойчивое	—
14. Истираемость бетона	г/см ²	1,3	0,8	61

Из анализа результатов табл. 6 следует, что меры защиты или ухода за бетоном с помощью уплотняющей структуру добавки $Al_2(SO_4)_3$ обеспечивают рост степени гидратации цемента и непроницаемости цементного камня (бетона) за счет роста его плотности. Это отражается в снижении водопоглощения, как фактора снижения пористости бетона. На этом основании возрастают его прочностные характеристики и модуль упругости, а также морозо- и солестойкость, защитная способность по отношению к стальной арматуре; одновременно снижаются усадка и истираемость бетона.

С учетом того обстоятельства, что прочность сцепления слоев старого и свежего бетона при уходе за ним по разрабатываемой технологии оказалась выше, чем при твердении старого бетона в наиболее благоприятных условиях — под слоем воды, а также накопленных данных о том, что прочностные характеристики бетона, твердевшего в благоприятных нормально-влажностных условиях не более, чем на 5 %–7 % превышают аналогичные для разрабатываемой технологии защиты, но при твердении в воздушно-сухих условиях, она имеет большое практическое значение для строительного производства как в варианте изготовления сборных бетонных и железобетонных изделий, так и для монолитного строительства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- 1 Разработаны теоретические основы проникновения вещества уплотняющей структуру бетона добавки $Al_2(SO_4)_3$ вглубь при нанесении раствора на защищаемую поверхность, базирующиеся на фундамен-

тальных закономерностях фильтрационной гидравлики и физико-химических явлениях, развивающихся в процессе твердения цемента и проявляющихся в возникновении разрежения в объеме цементного камня (бетона), благодаря чему он сорбирует наносимый на его поверхность раствор защитного состава. Предложены эмпирические математические зависимости (5) и (6) для ведения (при необходимости) инженерных расчетов.

- 2 Предложены рациональные параметры осуществления ухода за свежееотформованным бетоном и после снятия опалубки (распалубки) раствором $Al_2(SO_4)_3$, включающие способ и время нанесения защитного состава, концентрацию раствора или его удельный расход, количество раз нанесения для изменяющихся факторов: температуры воздуха $t \sim (20-50)^\circ C$, относительной влажности $\phi \sim 50\% - 95\%$ и скорости движения воздуха $v_a \sim 0-7$ м/с.
- 3 Исследована кинетика твердения и установлены физико-технические свойства тяжелого конструкционного бетона при твердении в воздушно-сухих условиях при температуре в диапазоне $t = (20-50)^\circ C$ и совместном воздействии скорости ветра ($v_a = 0-7$ м/с), показана эффективность защиты поверхности свежееотформованного бетона и после его распалубки двухразовым нанесением (расход ~ 400 г/м²) 5%-ного раствора $Al_2(SO_4)_3$. Результаты выполненных экспериментальных исследований подтвердили эффективность использования разрабатываемой технологии с целью обеспечения требуемых физико-механических свойств и характеристик конструкционного тяжелого бетона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тейлор, К. Химия цемента / К. Тейлор; пер. с англ. — М.: Мир, 1986. — С. 294–345.
2. Powers, T. C. Studies of the physical properties of Hardened Portland Cement Paste (Bull. 22), p. 992, Portland Cement Association, Chicago, 1948; reprinted from J. Am. Concr. Inst. (Proc.), 1947 / T. C. Powers, T. I. Brownard. — P. 43, 101, 249, 469, 549, 669, 845, 993.
3. Parrott, L. J. In Research on the Manufacture and Use of Cements, Engineering Foundation / L. J. Parrott. — New York, 1986. — P. 43.
4. Passaglia, E. Bull. Mineral / E. Passaglia, R. Rinaldi. — Paris, 1984. — P. 107, 605.
5. Mater. Constr. / R. G. Patel [et al.]. — Paris, 1988. — P. 21, 192.
6. Цементный бетон в дорожном строительстве / С. В. Шестоперов [и др.]. — М.: Дориздат, 1950. — 132 с.
7. Технология вяжущих веществ / В. Н. Юнг [и др.]. — М.: Промстройиздат, 1952. — 262 с.
8. Мощанский, Н. А. Повышение стойкости строительных материалов и конструкций, работающих в условиях агрессивных сред / Н. А. Мощанский. — М.: Госстандарт, 1962. — 235 с.
9. Мощанский, Н. А. Плотность и стойкость бетонов / Н. А. Мощанский. — М.: Госстройиздат, 1951. — 175 с.
10. Стольников, В. В. Исследования по гидротехническому бетону / В. В. Стольников. — М.: Госэнергоиздат, 1953. — 330 с.
11. Деметьев, Г. К. Условие долговечности бетона и железобетона / Г. К. Деметьев. — Куйбышев: Куйбышевское книгоиздательство, 1965. — 120 с.
12. Лыков, А. В. Тепло- и массообмен в процессах сушки / А. В. Лыков. — М.: Госэнергоиздат, 1956. — 464 с.
13. Скрамтаев, Б. Г. Достижения технологии бетона в СССР и дальнейшие задачи / Б. Г. Скрамтаев // Труды IV Всесоюз. конф. по бетону и железобет. констр. Ч. III. Усовершенствование технологии бетона. — М.-Л.: Гос. из-во. строит. лит., 1949. — С. 3–25.
14. Шестоперов, С. В. Долговечность бетона / С. В. Шестоперов. — М.: Автотранспорт, 1955. — 480 с.
15. Лейбензон, Л. С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде / Л. С. Лейбензон. — М.-Л.: Гостехиздат, 1947. — С. 11–73.
16. Коллинз, Р. Течение жидкостей через пористые материалы / Р. Коллинз. — М.: Мир, 1964. — С. 68–104.
17. Полубаринова-Кончина, П. Я. Теория движения грунтовых вод / П. Я. Полубаринова-Кончина. — М.: Наука, 1977. — С. 17–88.
18. Щелкачев, В. И. Подземная гидравлика / В. И. Щелкачев, Б. Б. Лацук. — М.-Л.: Гостехиздат, 1949. — С. 50–89.
19. Аравин, В. И. Теория движения жидкостей и газов в недеформируемой среде / В. И. Аравин. — М.: Гостехиздат, 1953. — С. 11–80.
20. Чарный, И. А. Основы подземной гидравлики / И. А. Чарный. — М.-Л.: Гостехиздат, 1956. — 260 с.
21. Батяновский, Э. И. Особо плотный бетон сухого формирования / Э. И. Чарный. — Минск: Стринко, 2002. — С. 108–112.
22. Блещик, Н. П. Структурно-механические свойства и реология бетонной смеси и прессвакуумбетона / Н. П. Блещик. — Минск: Наука и техника, 1977. — 230 с.
23. Шалимо, М. А. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии / М. А. Шалимо. — Минск: Выш. шк., 1986. — 200 с.
24. Ахвердов, И. Н. Основы физики бетона / И. Н. Ахвердов. — М.: Стройиздат, 1981. — 464 с.
25. Применение добавок в бетоне: Пособие П1-99 к СНиП 3.09.01-85. — Минстройархитектуры, 2000. — 33 с.
26. Трахимчик, О. Е. Повышение эксплуатационных свойств бетона обработкой растворами на основе гексафторсилката магния: автореф. дис. ... канд. техн. наук; специальность: 05.17.11; 05.17.01 / Бел. гос. техн. ун-т. — Минск, 2006. — 19 с.
27. Многокомпонентные диффузионные карбидные покрытия на железоуглеродистых сплавах / Л. Г. Ворошнин [и др.]. — Минск: БНТУ, 2007. — 468 с.
28. Кузьменков, М. И. Эффективный химический препарат "Сифтом" для повышения долговечности бетона / М. И. Кузьменков, О. Е. Трахимчик, Д. М. Марковка // Технологии бетона. — 2006. — № 1. — С. 62–64.
29. Кузьменков, М. И. Флюат для антикоррозионной защиты бетона / М. И. Кузьменков, О. Е. Трахимчик // Белорусско-польский научно-практический семинар: тез. докл., Брест, 9–11 октября 2002 г. — Брест, 2002. — С. 213.

Статья поступила в редакцию 20.03.2013.