

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

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРВИЧНОЙ ЗАЩИТЫ ТВЕРДЕЮЩЕГО БЕТОНА УПЛОТНЯЮЩИМ СТРУКТУРУ СОСТАВОМ

THE MAIN CONCEPTS OF TECHNOLOGY OF HARDENING CONCRETE PRIMARY PROTECTION WITH SUBSTANCE CONSOLIDATING ITS STRUCTURE

В статье отражены результаты исследований по разработке технологии ухода или первичной защиты твердеющего в воздушно-сухих условиях цементного бетона с помощью наносимого на защищаемую поверхность защитного состава — раствора $Al_2(SO_4)_3$. Определены условия и режимы осуществления ухода за бетоном с учетом основных воздействующих факторов: температуры, влажности, скорости ветра, расхода вещества, времени ухода и других с целью создания благоприятных условий для его твердения.

In article researches results on working out of primary protection technology of cement concrete hardening in air-dry conditions using chemical reagent — the solution $Al_2(SO_4)_3$ put on a protected surface are cited. Conditions and modes of caring for concrete accounting the basic influencing factors are defined: temperature, humidity, wind speed, expense of substance, time of caring and others for the purpose of creating favorable conditions for its hardening.

ВВЕДЕНИЕ

Возрастающие объемы монолитного строительства в летний период года, а также стремление снизить энергетические затраты в производстве сборного бетона и железобетона, использование в этой связи сухих теплоносителей, включая и вариант твердения изделий на открытых площадках и в помещениях цехов, делают все более острой проблему ухода за твердеющим в воздушно-сухих условиях бетоном. Общеизвестно, что потери им воды затворения, как свежееотформованного, так и частично затвердевшего (после распалубки), сопровождаются ростом пористости и снижением качественных характеристик материала.

Среди разнообразных приемов ухода за твердеющим бетоном [1–10] наибольшее распространение в современных условиях строительства получило применение различных пленкообразующих составов. Они технологичны, широко представлены на рынке, удобны в использовании. Однако им присущ ряд недостатков, наиболее важным среди которых является ухудшение сцепления ранее уложенного (старого) бетона и его последующих слоев, а также отделки с бетоном конструкций. Кроме этого, непроницаемая полимерная пленка способна спровоцировать чрезмерный разогрев массивных конструкций под воздействием солнечной энергии. Этих недостатков нет у разрабатываемого авторами варианта защиты твердеющего в воздушно-сухих условиях бетона с помощью уплотняющих структуру веществ [11–14]. В статье приведены результаты исследований технологических переделов и режимов разрабатываемой технологии ухода за бетоном с использованием раствора сульфата алюминия ($Al_2(SO_4)_3$), обеспечивающих ее успешное применение в производственных условиях.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЗАЩИТЫ БЕТОНА

Материалы и общая методика исследований

В качестве защитных составов апробированы водная эмульсия этиленгидроксидоксана (гидрофобизирующая жидкость 136-41 (ГКЖ-94)), защитный состав "СИФТОМ" ($MgSiO_2F_6$) [15–17], защитный многокомпонентный состав А. А. Шматова [18] и уплотняющие структуру бетона добавки [19, 20] нитрат кальция $Ca(NO_3)_2$ и сульфат алюминия $Al_2(SO_4)_3$, вещество которого было принято для дальнейших исследований и использования по сочетанию функционального эффекта, доступности и стоимости (могут использоваться соответствующие отходы производства (побочные продукты) неорганических удобрений Гомельского химкомбината).

В качестве вяжущего использовали портландцемент ОАО "Красносельскстройматериалы" (ПЦ М500-Д0; активность 52,5 МПа; $K_{тр} \sim 0,26$) и ПРУП "Кричевцементношифер" (ПЦ М500-Д20; активность 49,0 МПа; $K_{тр} \sim 0,28$).

Крупный заполнитель — щебень гранитный крупностью 5–20 мм; $\rho_{щ}^0 \sim 1420$ кг/м³, $\rho_{щ}^a \sim 1640$ кг/м³, $\rho_{щ}^3 \sim 2670$ кг/м³.

Песок природный, характеризовавшийся $M_x \sim 2,66$; $\rho_n^0 \sim 1540$ кг/м³, $\rho_n^a \sim 1790$ кг/м³, $\rho_n^3 \sim 2650$ кг/м³.

Общая методика исследований включала оценку изменений свойств (в частности потерю воды затворения, количества химически связанной воды цементом, изменений прочности и др.) образцами (20x20x20 мм) цементного камня (приготовленного из теста нормальной густоты по стандартизированной методике), а затем мелкозернистого (образцы-балочки 70x40x160 мм) и обычного тяжелого бетона (образцы-кубы с ребром 70 и 100 мм) под влиянием воздушно-сухой среды твердения и изменяющихся факторов: температуры $t \sim 20$ °С, 30 °С, 40 °С и 50 °С; влажности $\phi \sim 50$ %–70 % (95 %);

скорости движения воздуха (ветра) — $v_a \sim 0; 5$ и 7 м/с; вида и количества слоев (расхода), нанесенных на защищаемую поверхность цементного камня (бетона) испытываемого состава (раствора); времени начала ухода (нанесения 1-го слоя защитного состава) и других факторов.

Данные, полученные для образцов цементного камня, оценивали испытанием образцов мелкозернистого бетона ($\rho = 800$ кг; $P = 1500$ кг; $V/\rho \sim 0,43-0,45$) и бетона со щебнем стандартизированного состава [21] ($\rho = 350$ кг; $\rho_{щ} = 1150$ кг; $P = 675$ кг; $V = 175$ л ($V/\rho = 0,5$)) на 1 м^3 бетона, изготовленного вибрированием со стандартными для бетона параметрами: амплитуда — $0,5$ мм; частота колебаний — 50 Гц.

Защита свежесформованного бетона

Отработка технологии первичной защиты свежесформованного бетона включала экспериментальную оценку влияния концентрации вещества $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ в растворе, способа нанесения (намачивание поверхности (поролоновый тампон, валик, кисть и т. п.) и распыление сжатым воздухом), количества раз нанесения, времени начала обработки после формования при твердении в естественных воздушно-сухих условиях ($t \sim (20 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$; $\varphi \sim 65\% - 70\%$ и при повышенной до $30 \text{ }^\circ\text{C}$, $40 \text{ }^\circ\text{C}$ и $50 \text{ }^\circ\text{C}$ температуре — $\varphi \sim 50\% - 55\%$); 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 $v_a \sim 0-7$ м/с.

Рациональная концентрация и расход рабочего раствора вещества уплотняющей структуру бетона добавки взаимосвязана с оптимальным расходом его по критерию обеспечения защитных свойств, то есть снижения потерь влаги (особенно в начальный период твердения) и прочности бетона.

Тяжелый бетон, используемый в дальнейших исследованиях, характеризовался расходом цемента $\rho = 350 \text{ кг/м}^3$. При экспериментально установленной толщине пропитанного слоя бетона в $2,0-2,5$ мм удельный объем этого слоя составит $1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,002(0,0025) \sim 0,002 \text{ м}^3$ и $0,0025 \text{ м}^3$. При содержании в 1 м^3 бетона цемента $\rho = 350 \text{ кг}$ в объеме пропитанного слоя будет $350 \cdot 0,002 = 700$ г и $350 \cdot 0,0025 = 875$ г цемента. Авторами установлено, что при одинаковом режиме обработки 5%-ным раствором $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ поверхности его расход на один слой при нанесении распылением составил $(200 \pm 15) \text{ г/м}^2$, то есть в среднем 200 г/м^2 . В таком количестве раствора указанной концентрации вещества $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ содержится $200 \cdot 0,005 = 10$ г. Данными последующих исследований будет показано, что рационально нанесение защитного состава не менее 2 раз, то есть в два слоя с перерывом между ними. С учетом этого расход вещества $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ на 1 м^2 поверхности составит примерно 20 г, а дозировка $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ в слое толщиной $2,0-2,5$ мм при содержании в его объеме цемента $\rho_1 \sim 700$ г и $\rho_2 \sim 875$ г составит $D_1 \sim (20:700) \cdot 100 \sim 2,9\%$ и $D_2 \sim (20:875) \cdot 100 \sim 2,3\%$ от массы вяжущего по сухому веществу, что удовлетворяет требованиям (ограничениям) нормативных документов [20–23].

На рис. 1а, б показана экспериментально определенная тенденция изменения потерь воды (см. рис. 1а) и прочности на сжатие (см. рис. 1б) образцами ($20 \times 20 \times 20$ мм) цементного камня (серия — 18 образцов; средние значения — по 12 образцам после исключе-

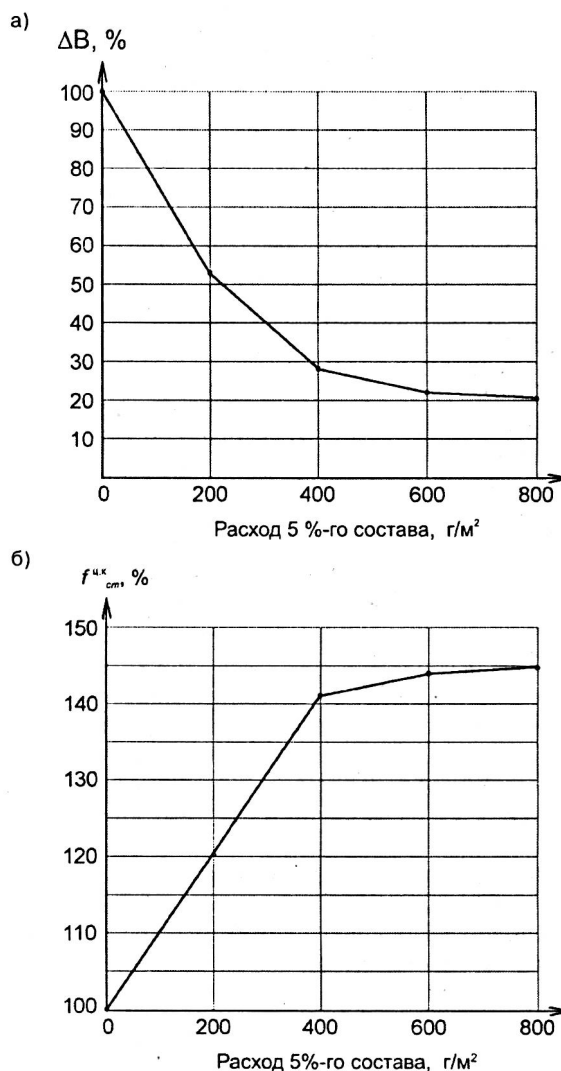


Рис. 1. Тенденция изменения потерь воды образцами (а) и их прочности на сжатие (б) в зависимости от расхода защитного состава

ния — по три максимальных и минимальных значений), которые прогревали в течение 24 ч при температуре $50 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\varphi \sim 50\%$). Расход защитного состава регулировали количеством раз нанесения (из расчета 200 г/м^2 за один раз). Для обеспечения ускоренного впитывания состава работали с подогревателями до $30 \text{ }^\circ\text{C}-35 \text{ }^\circ\text{C}$ цементным тестом и формами.

При оценке потерь воды затвердения (см. рис. 1а) за 100% принято снижение массы формы с образцами без защиты (по абсолютной величине $\Delta B \sim 21\% - 25\%$ от воды затвердения); при контроле прочности за 100% принята прочность образцов без защиты.

Из тенденции, отраженной графиками рис. 1а, б, следует, что расход защитного состава в виде 5%-ного раствора $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ более 400 г на 1 м^2 обрабатываемой поверхности нецелесообразен. Как снижение потерь влаги, так и рост прочности образцов цементного камня стабилизируются при таком расходе, мало изменяясь с его увеличением.

По мнению авторов, это можно объяснить тем, что сверх $2-3\%$ -ного (относительно массы цемента) количества вещества $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 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. Изложенное подтверждает наличие на поверхности образцов высолов из вещества $Al_2(SO_4)_3$ (в данном эксперименте — незначительно при 400 г/м^2 , увеличивающихся количественно для расходов в 600 и 800 г/м^2).

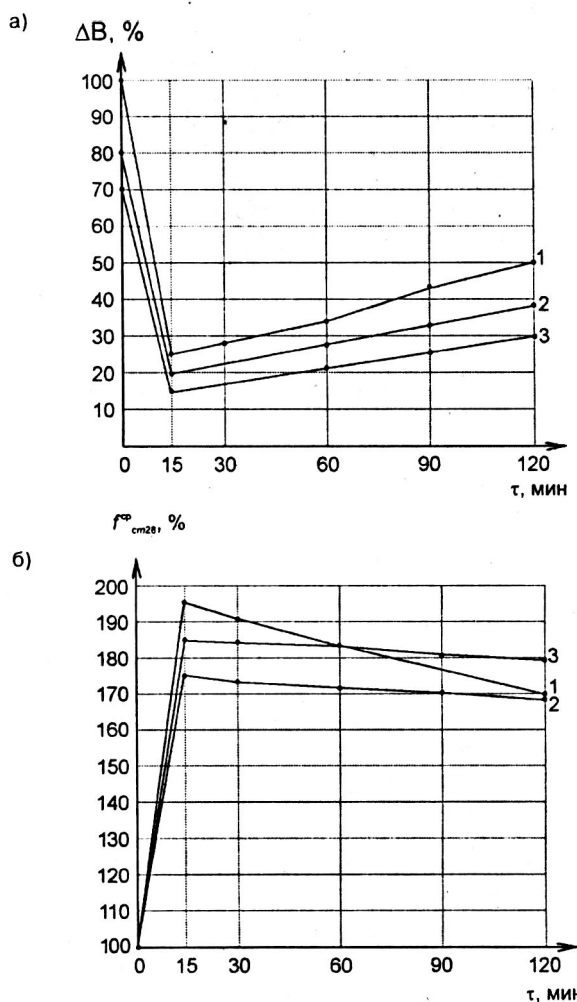
Оптимальная концентрация рабочего раствора взаимосвязана с расходом уплотняющей структуру цементного камня (бетона) добавки и соответствует (при двухслойном нанесении) примерно $C_p \sim 5 \%$, что одновременно обеспечивает рациональный расход $Al_2(SO_4)_3$, соответствующий $\sim 400 \text{ г}$ защитного состава на 1 м^2 обрабатываемой поверхности.

Влияние температуры среды, времени начала обработки и количества раз нанесения раствора

Способ нанесения раствора. В существующей производственной практике нанесения жидких веществ на смазываемые, увлажняемые, гидрофобизируемые и т. д. поверхности наиболее рационален способ их распыления под давлением (с образованием факела за счет специальных устройств — форсунок), либо эжекцией жидкости сжатым газом (преимущественно — воздухом), что также обеспечивается использованием специальных камер-форсунок для образования факела. Приемы нанесения рабочих растворов (эмульсий, дисперсий) иными средствами (валики, щетки, кисти и т. д.) менее производительны и существенно (в $1,5\text{--}2$ раза) увеличивают расход используемого материала.

При уходе за свежееотформованным бетоном (особенно из высокопластичных и литых смесей) нанесение защитного состава методами без распыления (валики, кисти и т. п.) возможно только после полного исчезновения капельно-жидкой влаги с обрабатываемой поверхности, то есть после выдержки некоторой продолжительности. Как было установлено и будет показано далее, увеличение времени до нанесения защитного состава в воздушно-сухих условиях твердения сопровождается увеличением потерь влаги и снижением прочности цементного камня (бетона) и, закономерно, тем больше, чем выше температура среды твердения. В этой связи, а также на основании экспериментальной оценки эффективности (по критериям "уровень защиты — расход раствора") принят вариант нанесения защитного состава сжатым воздухом (эжекцией).

Влияние температуры среды, оптимальное время и количество раз нанесения защитного состава. С целью обоснования наиболее рационального времени начала работ по первичной защите твердеющего бетона и режима ухода — оптимального количества раз нанесения состава и интервалов между ними — при температуре среды $t = 30 \text{ }^\circ\text{C}$, $40 \text{ }^\circ\text{C}$ и $50 \text{ }^\circ\text{C}$ были выполнены эксперименты, результаты которых приведены в виде графических зависимостей рис. 2а, б и 3а, б, отражающих потери влаги и изменения прочности на сжатие образцами цементного камня (среднее — по 12 из 18 результатов, исключая по три минимальных и максимальных значения) в возрасте 28 сут. На рис. 4а, б и рис. 5а, б приведены результаты экспериментов с образцами тяжелого бетона (среднее — по четыре наибольших из шести значений). При обобщении во всех этих случаях экспериментальных данных по потере воды ($\Delta B, \%$) образцами за 100% принята снижение массы форм с ними без защиты поверхности ($\tau = 0$ мин) при температуре среды



1, 2, 3 — при температуре среды $50 \text{ }^\circ\text{C}$, $40 \text{ }^\circ\text{C}$ и $30 \text{ }^\circ\text{C}$ соответственно; $\tau = 0$ мин — образцы без защиты
Рис. 2. Потери влаги образцами цементного камня (а) и изменение их прочности на сжатие (б)

$t = 50 \text{ }^\circ\text{C}$. При оценке изменений прочности на сжатие в возрасте 28 сут за 100% принята прочность образцов без защиты ($\tau = 0$ мин), твердевших в среде с $t = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ (№ 1); $t = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ (№ 2) и $t = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ (№ 3).

Данные эксперимента с цементным камнем (см. рис. 2а, б) подтверждают наибольшую эффективность начала ухода сразу после формования ($\tau \leq 15$ мин), что снижает потери влаги и способствует росту прочности бетона при твердении в диапазоне температур $t \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}\text{--}50 \text{ }^\circ\text{C}$. Наибольший эффект закономерно проявляется с повышением температуры среды твердения. В целом эти результаты, полученные для ПЦ М500-Д0, корреспондируются с подобными экспериментами на ПЦ М500-Д20, отражая общие закономерности. В равной степени это относится к результатам экспериментов с бетоном, отраженных графическими зависимостями на рис. 3а (для потерь воды) и на рис. 3б (изменение прочности) для среды твердения при $t = 40 \text{ }^\circ\text{C}$, в зависимости от времени начала ухода.

Обобщая полученные данные, можно сделать вывод, что период времени до нанесения защитного состава должен быть минимальным и наиболее целесообразно наносить первый слой непосредственно после формования и отделки (заглаживания) поверхности изделий или конструкций.

Экспериментальное установление оптимального количества слоев (или раз) наносимого защитного состава

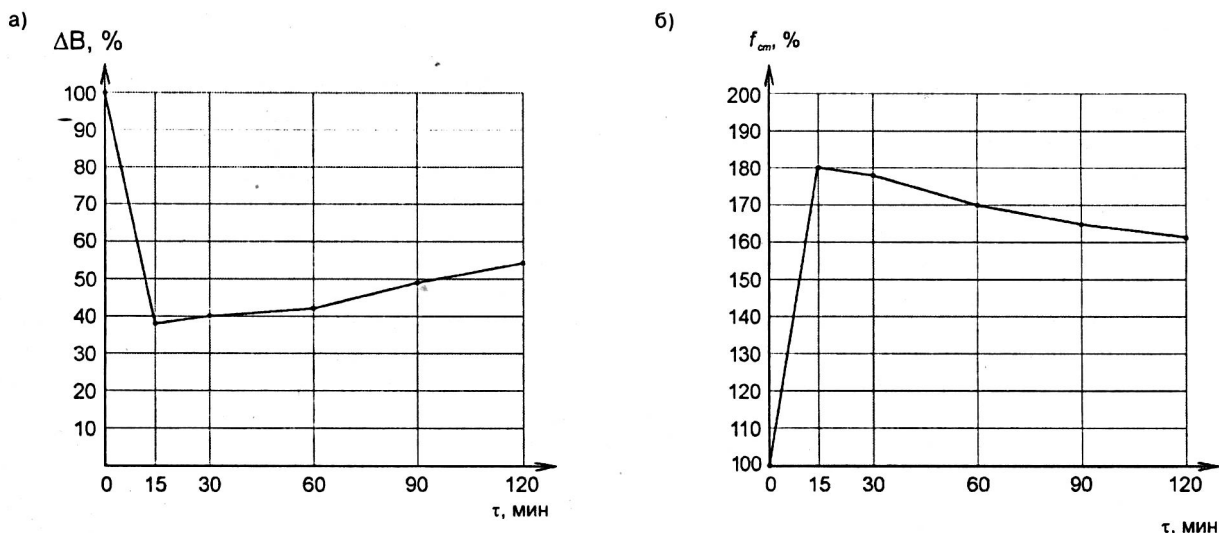


Рис. 3. Потери влаги бетоном (а) и изменение прочности на сжатие образцов (б)

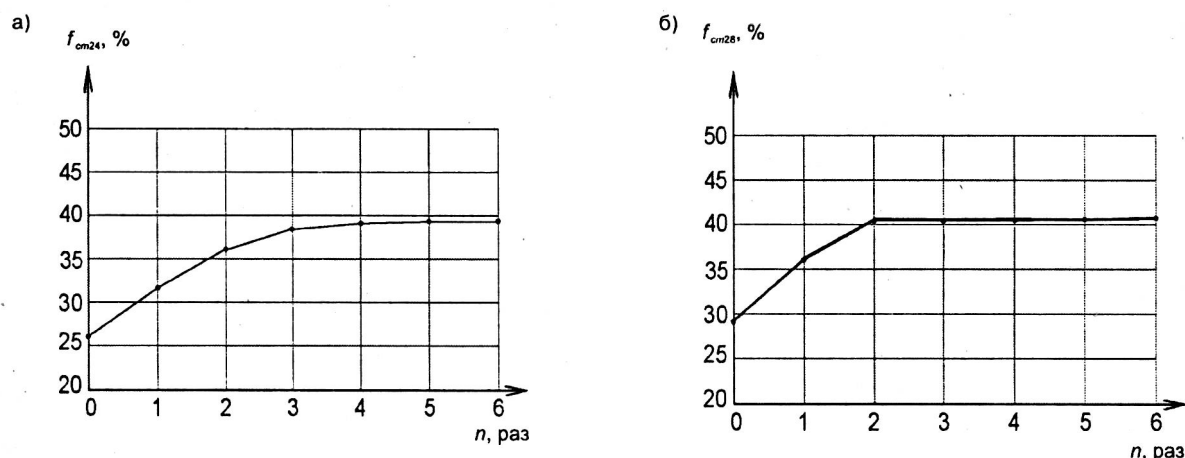
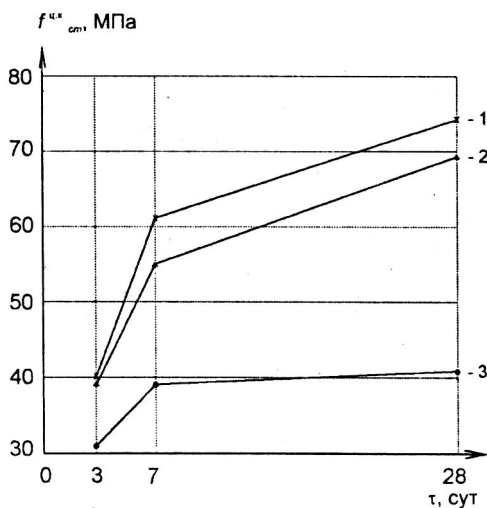


Рис. 4. Зависимость прочности на сжатие бетона от количества раз нанесения защитного состава в возрасте 24 ч (а) и через 28 сут (б)

ва 5%-ного раствора $Al_2(SO_4)_3$ осуществляли с учетом ранее полученных данных (см. рис 1) о влиянии расхода материала на эффективность защиты бетона. Эксперимент выполняли на образцах-кубах с ребром 100 мм из бетона стандартизированного состава, твердевших в течение 28 сут от момента изготовления при температу-

ре $t = 40^\circ C$ и $\phi \sim 55\%$. Серии образцов — по четыре штуки, средние значения прочности на сжатие — по трем наибольшим (по ГОСТ 10180-90.). Защитный состав (5%-ный раствор $Al_2(SO_4)_3$) наносили распылением сжатым воздухом сразу после формования, формы помещали в разогретый сушильный шкаф, извлекая для нанесения последующих слоев. Каждый последующий слой наносили через 15 мин от момента нанесения предыдущего слоя. Здесь следует отметить, что, несмотря на постоянное повышение температуры форм и бетона (помещали в сушильный шкаф сразу после формования), начиная с третьего-четвертого слоев впитывание нанесенного на поверхность бетона раствора замедлялось.

На рис. 4 представлены результаты эксперимента в виде изменений прочности на сжатие образцов бетона через 24 ч и в возрасте 28 сут в зависимости от количества раз нанесения защитного состава на их открытую поверхность. За 0 принята прочность (МПа) образцов, твердевших в формах без защиты поверхности, которая через 24 ч составила: $f_{сж24} = 27,0$ МПа, а к 28 сут — $f_{сж28} = 29,5$ МПа (при прочности бетона образцов-аналогов, твердевших в стандартизированных нормально-влажностных условиях $f_{сж28} = 44,5$ МПа). Данные этого эксперимента коррелируют в целом с ранее сделанным выводом о необходимости нанесения не менее двух слоев защитного состава на бетон в виде 5%-ного раствора $Al_2(SO_4)_3$. Очевидно, что общий примерный



1 — нормально-влажностные условия; 2 — воздушно-сухие с защитой поверхности; 3 — то же, без защиты

Рис. 5. Тенденция изменения прочности на сжатие цементного камня, твердевшего при $t \sim 20^\circ C$

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, требует 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 (20x20x20 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 (сечением 300x300 мм) 1000-миллиметровой длины с возможностью расположения до шести 18-гнездных форм с образцами цементного камня и до четырех трехгнездных форм с образцами бетона (куб с ребром 70 мм), с просветами между ними по высоте штабеля из форм. 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 $v_a \sim 5$ и 7 м/с ($v_a \sim 0$ м/с — при выключенном вентиляторе).

Табл. 1. 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

В настоящем эксперименте не практиковали сопоставление с незащищенным бетоном, как бесперспективное. Сравнительный базовый вариант — двухслойное защитное покрытие поверхности (то есть расход раствора $Al_2(SO_4)_3$ 5%-ной концентрации ~400 г/м²) с нанесением первого слоя сразу после формования, как и во всех вариантах (до четырех слоев) эксперимента. Последующие слои наносили с интервалами между ними 15 мин. После нанесения последнего слоя все формы исследуемых вариантов помещали в устройство и подвергали испытаниям с фиксированной для каждого эксперимента скоростью ветра $v_a \sim 0$; 5 и 7 м/с и температурой 20 °С, 30 °С и 40 °С. В табл. 1 каждое единичное значение прочности — средняя величина результатов испытаний не менее шести образцов.

Анализируя результаты 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 совместный рост температуры до 40 °С и скорости ветра до 7 м/с.

Можно отметить большой 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 (два слоя покрытия) эффекта не дает. Незначительный рост прочности образцов в трехсуточном возрасте не сопровождается таковым в более поздние сроки твердения, включая 28 сут.

В целом полученные результаты об изменениях прочности цементного камня коррелируются с ранее приведенными данными, включая приведенные на рис. 1 закономерности потерь влаги цементным камнем. Выявлено, что они стабилизируются после трех–семи суток 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. Результаты этих экспериментов подтвердили достаточность расхода 5%-ного раствора $Al_2(SO_4)_3$ в 400 г/м² защищаемой поверхности свежееотформованного цементного камня при его двухслойном нанесении.

Количество химически связанной воды и степень гидратации цемента. Эксперименты выполняли с использованием образцов цементного камня (из теста нормальной густоты; ПЦ М500-Д20; $K_{нр} = 0,28$) размерами 20x20x20 мм. При отборе проб для оценки количества химически связанной воды цементом (далее — ХСВ) использовали сердцевинную часть образцов, чтобы исключить возможное влияние на этот показатель вещества защитного состава $Al_2(SO_4)_3$.

Во всех случаях 5%-ный раствор $Al_2(SO_4)_3$ наносили на защищаемую поверхность в два слоя через 0 и 30 мин после формования, а также сразу после распалубки и через 15 мин по граням из-под металла форм (по 18 образцов в форме). Методика определения ХСВ соответствовала традиционно применяемой (высушивание порошкообразных проб — $t = 105$ °С–110 °С, прокалывание — $t \sim 700$ °С, $\tau = 4$ ч). Результаты экспериментов сведены в табл. 2.

Анализ данных из табл. 2 показывает, с одной стороны, очевидную эффективность защиты твердеющего в воздушно-сухих условиях цементного камня уплотняющей структурой добавкой, то есть веществом $Al_2(SO_4)_3$, а с другой — наличие разницы в степени гидратации цемента, твердевшего в нормально-влажностных и воздушно-сухих условиях.

В частности, количество химически связанной воды цементом и степень его гидратации к 28 сут твердения, принятые за 100 % для нормально-влажностных условий, составляют к этому времени для образцов без защиты 68 % и с защитой 5 %-ным раствором $Al_2(SO_4)_3$ — 92,3 %; 90,2 % и 86,7 %, для температуры среды твердения 20 °С, 30 °С и 40 °С соответственно.

Следует отметить, что в начальные сроки твердения (3 сут) промежуточные значения степени гидратации цемента были выше для $t = 40$ °С и 30 °С, чем у камня, твердевшего при $t = 20$ °С. Затем ситуация изменилась, что связано с ускорением развития гидролизно-гидратационного процесса с повышением температуры, с одной стороны, а с другой — с нарастанием потерь влаги при росте температуры воздушно-сухой среды.

На рис. 5 приведены (в виде графиков) зависимости роста прочности образцов цементного камня, из которых после испытаний отбирали пробы на определение ХСВ и степени гидратации (α , %). Очевидна непосредственная и прямая связь между данными табл. 2 и рис. 5 — снижение количества ХСВ и степени гидратации цемента сопровождается снижением прочности образцов цементного камня. В особой мере это относится к образцам, твердевшим без защиты поверхности (график № 3).

Оценивая полученные результаты, в целом приходим к выводу, что уход за твердеющим бетоном с помощью уплотняющего его структуру вещества $Al_2(SO_4)_3$ в достаточной мере эффективен и обеспечивает удовлетворительные условия для развития процессов взаимодействия цемента с водой и формирования достаточно плотной структуры цементного камня и бетона строительных изделий (конструкций) при твердении в воздушно-сухой среде. Этот вывод подтверждается тем, что снижение прочности образцов защищаемого цементного камня к 28 сут воздушно-сухого твердения составило (74 – 69):74 ~ 0,0676, или ~6,8 % от прочности образцов, твердевших в стандартизованных нормально-влажностных условиях.

Кинетика твердения защищаемого после распалубки бетона в зависимости от температуры и скорости ветра. Основными факторами, действующими 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 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.

Рост прочности бетона (стандартизованного состава на ПЦ М500-Д20) оценивали на образцах-кубах с ребром 70 мм, первые 24 ч твердевших в формах, а после распалубки — расположенных на металлических подкладках так, чтобы воздушный поток в трубе-корпусе

Табл. 2. Количество химически связанной воды и степень гидратации цемента для различных условий твердения

Среда твердения t , °С; φ , %	Номер пробы	Количество химически связанной воды цементом, %, в возрасте, сут			Степень гидратации цемента α , %, в возрасте, сут		
		3	7	28	3	7	28
20 °С; (70±5) % (образцы без защиты)	1	9,3	9,7	9,8	—	—	—
	2	9,7	9,8	10,0	—	—	—
	3	9,2	9,3	9,3	—	—	—
	Среднее	9,4	9,6	9,7	41,4	42,4	43,0
20 °С; (70±5) %	1	9,5	12,9	12,9	—	—	—
	2	10,1	12,8	13,1	—	—	—
	3	9,5	12,6	13,6	—	—	—
	Среднее	9,7	12,5	13,2	42,7	55,1	58,1
30 °С; 50 %–55 %	1	9,9	11,8	12,8	—	—	—
	2	10,3	12,5	12,6	—	—	—
	3	10,4	12,3	13,3	—	—	—
	Среднее	10,2	12,2	12,9	44,9	53,7	56,8
40 °С; 50 %–55 %	1	10,9	11,6	12,2	—	—	—
	2	9,8	11,8	12,0	—	—	—
	3	11,1	12,3	13,0	—	—	—
	Среднее	10,6	11,9	12,4	46,7	52,4	54,6
Нормально-влажностные условия; 20 °С; 90 %–95 %	1	10,4	12,6	14,1	—	—	—
	2	11,2	13,7	14,2	—	—	—
	3	10,8	13,9	14,6	—	—	—
	Среднее	10,8	13,4	14,3	47,6	59,0	63,0

соприкасался с их поверхностью по максимально возможной площади.

Защитный состав (5%-ный раствор $Al_2(SO_4)_3$) наносили в два слоя по свежееотформованной поверхности, а после распалубки — по всем граням из-под металла. Отличие касалось только случая при $t = 40$ °С и скорости ветра $v_w = 7$ м/с, для которого защитный состав наносили по два (~400 г/м² расход раствора) и три раза (~600 г/м² расход раствора). Температурный режим твердения разных серий образцов соответствовал 20 °С, 30 °С и 40 °С при скорости ветра $v_w = 0$; 5 и 7 м/с.

Серия образцов соответствовала 12 штукам (четыре формы по три образца). Их подвергали воздействию воздушно-сухой среды с указанной температурой и скоростью ветра сразу после формирования (нанесения первого защитного слоя), продолжая после распалубки и нанесения защитного состава на поверхность образцов.

Образцы испытывали на прочность на сжатие в соответствии с ГОСТ 10180-90 с учетом поправочного масштабного коэффициента $\alpha = 0,85$ при среднем значении единичных испытаний, принятом по двум наибольшим результатам серии из трех образцов. Прочность контрольных образцов при 28 сут нормально-влажностного твердения составила ~42 МПа. Результаты экспериментов, отражающих кинетику роста прочности бетона при различных режимах твердения в воздушно-сухих условиях, представлены в табл. 3 и частично интерпретированы графическими зависимостями рис. 6.

Табл. 3. Кинетика роста прочности бетона при различных режимах твердения в воздушно-сухих условиях

Температура среды твердения, °С	Скорость ветра v_w , 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 ($Al_2(SO_4)_3$) наносили три раза (расход ~600 г/м²).

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 защищенных образцов бетона в ранние сроки твердения (до 3 сут) с повышением температуры среды. Одновременно форсированный рост прочности при $t = 40^\circ C$ приводит к ее стабилизации к 7 сут твердения и сопровождается недобором (относительно образцов, твердевших при $t = 20^\circ C$) на ~5 % к проектному возрасту.

На рис. 6б показана тенденция роста прочности образцов бетона, твердевших в нормально-влажностных условиях (график № 1) и при $t = 20^\circ C$ на воздухе (помещение лаборатории) с защитой свежетоформованной поверхности и после распалубки образцов двумя нано-

симыми распылением слоями 5%-ного раствора $Al_2(SO_4)_3$ (график 2) в более поздние сроки — 56 и 112 сут. Из экспериментальных данных видно, что образцы защищенного бетона к 56 сут воздушно-сухого твердения (в рамках выполненного эксперимента) достигает 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.

По данным, полученным в пределах эксперимента, можно сделать ряд выводов. Очевидно, что основным фактором, влияющим на кинетику твердения (темп роста прочности) защищенного после формования и после снятия опалубки бетона является температура. Ее повышение с $20^\circ C$ до $40^\circ C$ способствует почти трехкратному росту прочности за первые сутки твердения, сохранению высокого темпа роста до 3–7 сут. Как уже отмечалось, это сопровождается понижением прочности к 28 сут на 2%–5%.

Фактор скорости ветра (в пределах данного эксперимента до $v_w \leq 7$ м/с) не имеет решающего значения для защищенного бетона. Можно предположить, что ускорение теплообмена между движущимся воздухом с повышенной температурой и поверхностью образцов защищенного бетона является причиной некоторого повышения прочности с ростом скорости ветра для $t = 30^\circ C$ и $40^\circ C$ в пределах 1–3 сут твердения. В целом же к проектному возрасту в этом случае влияние ветра отразилось примерно 2%-ным снижением прочности, а для среды при $t = 20^\circ C$ — 2–3%-ным, то есть примерно одного уровня. Это в целом незначительное снижение прочности защищенного бетона из-за роста скорости ветра следует отнести за счет усиливающегося эффекта испарения воды (возросло на 1,5%–2,5% в рамках данного эксперимента).

Результаты экспериментов подтверждают абсолютную необходимость защиты твердеющего в воздушно-сухих условиях после съема опалубки бетона. Так, прочность к 28 сут твердения незащищенных образцов снизилась, в сравнении с защищенными, на $(40 - 26):40 = 0,35$, или на 35%, что недопустимо для конструкционного материала.

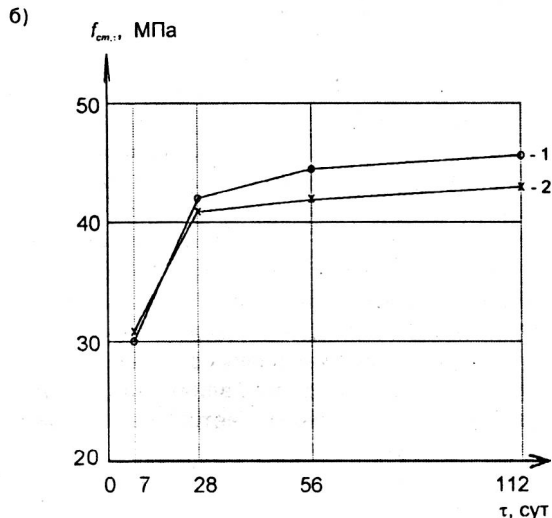
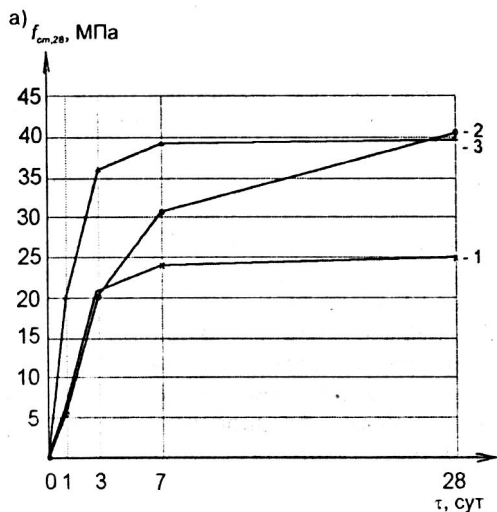


Рис. 6. Тенденция роста прочности бетона в зависимости от температуры, скорости ветра и времени:
 а — № 1 — образцы без защиты ($v_w = 0$ м/с, $t = 20^\circ C$); № 2 — защищенные образцы ($v_w = 0$ м/с, $t = 20^\circ C$); № 3 — защищенные образцы ($v_w = 7$ м/с, $t = 40^\circ C$);
 б — № 1 — нормально-влажностные условия; № 2 — воздушно-сухие с защитой поверхности образцов

Одновременно полученные данные свидетельствуют о достаточной для практического использования эффективности защитного состава на основе уплотняющего структуру бетона вещества — $Al_2(SO_4)_3$. При этом подтверждено ранее установленное положение о достаточности нанесения на защищаемую поверхность двух напыляемых слоев 5%-ного раствора $Al_2(SO_4)_3$. Увеличение расхода от ~400 до ~600 г/м² (нанесение трех слоев, образцы серии 40* по табл. 3) заметного эффекта не подтвердило при незначительной общей положительной тенденции влияния на прочность (см. соотношение прочности образцов серий 40 и 40*, табл. 3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выполнении теоретических и экспериментальных исследований, направленных на разработку технологии первичной защиты твердеющего бетона уплотняющим его составом, были получены следующие научные и практические результаты.

- 1 Разработана технология первичной защиты твердеющего бетона, включая уход за свежееотформованным и частично затвердевшим бетоном после распалубки изделий (конструкций). Экспериментально оценено влияние основных факторов: вида применяемого вещества, времени нанесения, расхода защитного состава, температуры и влажности среды твердения, скорости ветра и их сочетаний на потерю влаги бетоном в процессе воздушно-сухого твердения и рост его прочности.
- 2 Разработаны режимы ухода за свежееотформованным бетоном и после снятия опалубки (распалубки) растворами $Al_2(SO_4)_3$, включающие способ и время нанесения защитного состава, концентрацию раствора или его удельный расход, количество раз нанесения для изменяющихся параметров: температуры воздуха $t \sim 20\text{ }^\circ\text{C} - 50\text{ }^\circ\text{C}$, относительной влажности $\varphi \sim 50\% - 95\%$ и скорости движения воздуха $v_a \sim 0 - 7\text{ м/с}$.
Установлено, что рациональной является концентрация рабочего раствора $Al_2(SO_4)_3$ в 5%, обеспечивающая при двукратном нанесении состава распылением содержание в обрабатываемом поверхностном слое бетона вещества $Al_2(SO_4)_3$ порядка 3% от массы цемента. Этого количества уплотняющей структуры добавки достаточно для формирования плотного и малопроницаемого слоя цементного камня 2,0–2,5 мм при обработке свежееотформованного бетона и 1,0–1,5 мм — после распалубки. Удельный расход 5%-ного раствора $Al_2(SO_4)_3$ составляет при этом 400 г/м².
- 3 Выявлено, что время до нанесения первого слоя защитного состава должно быть минимально необходимым по условиям ведения работ как для свежееот-

формованного бетона, так и для его защиты после распалубки. Время повторного нанесения защитного состава определяется конкретикой ведения работ, температурой (влажностью, скоростью ветра) воздушной среды при рекомендуемом 15–30 мин — для свежееотформованного бетона и 10–20 мин — после распалубки.

- 4 Подтверждена экспериментально закономерная связь между количеством химически связываемой воды цементом и степенью его гидратации в процессе твердения 28 сут в воздушно-сухих условиях в зависимости от температуры ($t \sim 20\text{ }^\circ\text{C}$, $30\text{ }^\circ\text{C}$ и $40\text{ }^\circ\text{C}$) и относительной влажности ($\varphi \sim 50\% - 95\%$), при наличии защиты (двухслойное нанесение 5%-ного раствора $Al_2(SO_4)_3$) и без нее. При этом выявлено, что степень гидратации цемента с защитой составляет 87%–92%, а без защиты — 68% от принятой за 100% степени гидратации образцов, твердевших в нормально-влажностных условиях. В соответствии с этим прочность образцов цементного камня с защитой составляла 60–74 МПа, а без защиты — 40–42 МПа, что подтверждает эффективность защиты твердеющего бетона добавкой $Al_2(SO_4)_3$.
- 5 Исследованиями кинетики твердения (рост прочности в 1–28 сут) бетона в воздушно-сухих условиях при температуре в диапазоне $t = 20\text{ }^\circ\text{C} - 40\text{ }^\circ\text{C}$ и совместном воздействии скорости ветра ($v_a = 0 - 7\text{ м/с}$) подтверждена эффективность защиты поверхности бетона после распалубки двухразовым нанесением 5%-ного раствора $Al_2(SO_4)_3$ (расход ~400 г/м²). Показано, что прочность образцов бетона к 28 сут твердения при $t = 40\text{ }^\circ\text{C}$ и скорости ветра 7 м/с снизилась на 2%–5%, в сравнении с твердением при температуре $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$ и скорости ветра $v_a = 0\text{ м/с}$.
Одновременно подтверждена известная закономерность повышения темпа роста прочности защищенного бетона в первые 1–3 (7) сут с повышением температуры воздуха от $20\text{ }^\circ\text{C}$ до $30\text{ }^\circ\text{C}$ и особенно до $40\text{ }^\circ\text{C}$. В последнем случае ее рост даже для защищенных образцов практически прекратился после 7 сут твердения и к 28 сут их прочность была (39,6; 40,8) 100 = 97%, то есть на 3% ниже прочности образцов-аналогов, твердевших при $20\text{ }^\circ\text{C}$, без перспектив существенного роста в дальнейшем (в воздушно-сухих условиях твердения), судя по динамике графических зависимостей (см. рис. 6).
- 6 В совокупности результаты выполненных экспериментальных исследований обеспечили обоснование режимов ухода за твердеющим бетоном (свежееотформованным и после распалубки) с помощью уплотняющей структуры добавки $Al_2(SO_4)_3$ с целью обеспечения требуемых физико-механических свойств и характеристик конструкционного тяжелого бетона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Монолитные бетонные и железобетонные конструкции. Правила возведения: ТКП 45-5.03-131-2009 (02250). — Минск: Минстройархитектуры, 2009. — 28 с.
2. Руководство по производству бетонных работ в условиях сухого жаркого климата. — М.: НииЖБ Госстроя СССР, 1977. — С. 29–38.
3. Хигерович, М. И. Улучшение свойств бетона органическими поверхностно-активными добавками / М. И. Хигерович. — М.: ВНИИЭСМ, 1975. — 45 с.
4. Вододисперсионные пленкообразующие составы для бетонов в условиях сухого жаркого климата / Б. А. Крылов [и др.] // Бетон и железобетон. — С. 15–17.

5. Фам, Ван Хоан. Бетоны без защитного слоя для безрулонных кровель, эксплуатируемых в условиях влажного жаркого климата Вьетнама: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Ван Хоан Фам. — М., 1993. — 19 с.
6. Осама, Мохомед Мохаммед. Бетоны с химическими добавками в условиях сухого жаркого климата: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Мохомед Мохаммед Осама. — Алма-Аты, 1994. — 17 с.
7. Топильский, Г. В. Влияние пароводонепроницаемых покрытий на процессы твердения бетона / Г. В. Топильский // Прикладная химия. — 1981. — № 2. — С. 374–380.
8. Мбарки, Фетхи. Бетон повышенной водонепроницаемости и трещиностойкости в сухом жарком климате Туниса: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Фетхи Мбарки. — СПб., 2003. — 18 с.
9. Пунагин, В. Н. Бетон и бетонные работы в условиях сухого жаркого климата / В. Н. Пунагин. — Ташкент, 1974. — 244 с.
10. Вавренюк, С. В. Эффективные защитные цементные покрытия, модифицированные полимерами: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.05 / С. В. Вавренюк. — М., 2006. — 38 с.
11. Эгбалник, С. М. Теоретические основы фильтрационно-диффузионной защиты поверхности твердеющего бетона / С. М. Эгбалник, Э. И. Батяновский // Строительная наука и техника. — 2011. — 6 (39). — С. 9–13.
12. Эгбалник, С. М. Методы, приемы и режимы ухода за бетоном в процессе твердения / С. М. Эгбалник, Э. И. Батяновский // Повышение качества подготовки студентов специальности "Промышленное и гражданское строительство": сб. науч. статей науч.-метод. семинара. — Минск, 2011. — С. 230–242.
13. Защита твердеющего бетона уплотняющими структурами составами / С. М. Эгбалник [и др.] // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров РБ: сб. тр. XVI Междунар. науч.-метод. семинара. — Гродно: ГрГУ, 2010. — С. 375–380.
14. Эгбалник, С. М. Теоретические аспекты первичной защиты твердеющего бетона / С. М. Эгбалник, Э. И. Батяновский, В. И. Коваженкова // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров РБ: сб. тр. XVI Междунар. науч.-метод. семинара: в 2 ч. — Брест: БрГУ, 2009. — С. 25–29.
15. Трахимчик, О. Е. Повышение эксплуатационных свойств бетона обработкой растворами на основе гексафторсилката магния: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.17.11; 05.17.01 / О. Е. Трахимчик; Бел. гос. технол. ун-т. — Минск, 2006. — 19 с.
16. Кузьменков, М. И. Эффективный химический препарат "СИФТОМ" для повышения долговечности бетона / М. И. Кузьменков, О. Е. Трахимчик, Д. М. Марковка // Технология бетона. — 2006. — № 1. — С. 62–64.
17. Кузьменков, М. И. Флюат для антикоррозионной защиты бетона / М. И. Кузьменков, О. Е. Трахимчик // Белорусско-Польский науч.-практич. семинар: тез. докл., Брест, 9–11 октября 2002 г.; Белорус. ин-т систем. анализа и информ. обеспечения науч.-техн. сферы. — Брест, 2002. — С. 213.
18. Многокомпонентные диффузионные карбидные покрытия на железоуглеродистых сплавах / Л. Г. Ворошнин [и др.]. — Минск: БНТУ, 2007. — 468 с.
19. Пособие по применению химических добавок при производстве сборных железобетонных конструкций и изделий (к СНиП 3.09.01-85). — М.: Стройиздат, 1989. — 39 с.
20. Применение добавок в бетоне. Пособие П1-99 к СНиП 3.09.01-85. — Минск: Минстройархитектуры, 2000. — 33 с.
21. Добавки для бетонов. Методы определения эффективности: ГОСТ 30459-96.
22. Бетоны конструкционные тяжелые. Технические условия: СТБ 1544-2005.
23. Бетон. Часть 1. Требования, показатели, изготовление и соответствие: СТБ-ЕН 206-1-2009.

Статья поступила в редакцию 19.09.2012.