



# СТРОИТЕЛЬНАЯ НАУКА



Саназ Эгбалник

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СОСТАВОВ СМЕСЕЙ ИННОВАЦИОННОЙ РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРВИЧНОЙ ЗАЩИТЫ БЕТОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДОБАВКИ СУЛЬФАТА АЛЮМИНИЯ

УДК 666.97

**Аннотация.** В статье приведены результаты внедрения инновационной ресурсоэффективной технологии, экспериментального обоснования и оптимизации ее технологических параметров, составов смесей для первичной защиты твердеющего бетона на основе дешевой, недефицитной, стандартизированной к применению для бетонных изделий добавки сульфата алюминия  $Al_2(SO_4)_3$ , обеспечивающей повышение качества, снижение трудоемкости и себестоимости работ по уходу за бетоном в сравнении с традиционными методами. По итогам выполненных исследований разработаны режимы ухода как за свежесформованным бетоном, так и после снятия с него опалубки (распалубки) на основе защитных растворов с добавкой  $Al_2(SO_4)_3$ , регламентирующие способ и время их нанесения, концентрацию добавки и ее удельный расход, количество наносимых слоев с учетом изменяющихся параметров: температуры воздуха  $t \sim 20-50$  °C, относительной влажности  $\varphi \sim 50-95$  % и скорости движения воздуха  $V_v \sim 0-7$  м/с. Разработка апробирована на ряде конференций (доложена, обсуждена) и в производственных условиях, подтвердивших ее эффективность. Новизна технологии подтверждена патентом.

**Annotation.** In article results of introduction of innovative resources-efficient technology, experimental substantiation and optimization of its technological parameters, compositions of admixtures for primary protection of hardening concrete on the basis of cheap and not scarce, standardized to application for concrete products aluminum sulfate additive  $Al_2(SO_4)_3$ , providing quality improvement, labour input of works and cost price decrease for their protection in comparison with traditional methods are given. Following the results of the executed researches care modes are developed for freshly formed concrete and after timbering removal on the basis of solutions with additive  $Al_2(SO_4)_3$ , regulating way and time of protective composition drawing, concentration of an additive and its specific consumption, quantity of put layers with the account of changing parameters: air temperatures  $t \sim 20-50$  °C, relative humidity  $\varphi \sim 50-95$  % and air movement velocity  $V_a \sim 0-7$  m/sec. Scientific work is approved on a number of conferences (reported, discussed) and under production conditions which confirmed its efficiency. Novelty of technology is confirmed by the patent.

## ВВЕДЕНИЕ

Проблема повышения качества бетона в первую очередь связана с разработкой методов (технологий), обеспечивающих в процессе твердения его защиту от потерь влаги, вызывающей рост пористости, проницаемости и, как следствие, ухудшение физико-технических характеристик и свойств цементного камня.

Организация ухода за твердеющим бетоном в современных условиях реализуется многочисленными и разнообразными традиционными методами и приемами, которые хорошо описаны в большом количестве работ,<sup>1</sup> [1–5 и др.]. Однако в свете современных задач, поставленных государством<sup>3</sup> перед строительством по ресурсосбережению и повышению его качества, указанные способы защиты твердеющего бетона как в естественных, так и в заводских условиях по-прежнему очень актуальны и требуют существенного повышения их эффективности. В связи с этим по результатам комплексных исследований автором предложено инновационное решение (технология защиты твердеющего бетона) на основе использования недефицитного и недорогого химического вещества – сульфата алюминия ( $Al_2(SO_4)_3$ ), который стандартизирован и разрешен к применению в качестве уплотняющей структуру твердеющего бетона добавки. Эффект уплотнения структуры цементного камня и бетона при обработке этим веществом наружных поверхностей изделий (конструкций) делает их труднопроницаемыми для воды (предотвращая ее испарение) и одновременно способствует упрочнению внешнего слоя бетона, повышая качество его сцепления с материалами последующей отделки строительных конструкций. Для оптимизации параметров составов растворов и режимов ухода за бетоном (с учетом температуры, расхода сульфата алюминия, скорости ветра и др.) выполнен большой комплекс исследований, основные результаты которых приведены в данной статье.

Целью работы является оптимизация параметров защитных составов растворов и разработка на их основе эффективной технологии первичной защиты бетона, твердеющего в воздушно-сухих условиях, которая по сравнению с известными традиционными способами обеспечивает более высокое и надежное качество его защиты, повышение качества работ, снижение их сроков, трудоемкости и стоимости.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

**1. Общая характеристика предмета работы. Предварительные сравнительные исследования.**  
Для сравнительных исследований в качестве гидрофобизирующего защитного состава использовалась

хорошо зарекомендовавшая себя водная эмульсия этилгидросилоксана (гидрофобизирующая жидкость 136–41 или ГКЖ–94), приготовленная по рекомендациям, изложенным в пособиях<sup>4, 5</sup>; серия образцов – «ГФ».

В качестве уплотняющих структуру цементного камня веществ по результатам ранжирования также приняты наиболее эффективные составы, разработанные в Белорусском национальном техническом университете (БНТУ) по перечислениям (1–3):

1 – многокомпонентный защитный состав «СИФТОМ» ( $MgSiF_6$ ); серии образцов – «С»,

2 – многокомпонентный защитный состав А.А. Шматова для уплотнения и упрочнения металлических поверхностей с целью повышения их износоустойчивости (расшифровки состава разработчиками не приводятся); серии образцов – «N»,

3 – химическая добавка в бетон<sup>6, 7, 8</sup> с эффектом уплотнения структуры цементного камня на основе добавки сульфата алюминия ( $Al_2(SO_4)_3$ ); серии образцов – «СА».

Решение об использовании сульфата алюминия в качестве реагента для сравнительных испытаний принято с учетом того, что другие входящие в группу неорганических уплотняющих структуру бетона традиционно применяемые вещества  $FeCl_3$ ,  $Ca(NO_3)_2$  и др., во-первых, имеют побочные эффекты коррозионного воздействия на стальную арматуру, значительно дороже и менее доступны (не производятся в Республике Беларусь), во-вторых, в то время как сульфат алюминия доступен, дешев и производится в Гомеле. Первые полученные результаты предварительных экспериментов по контролю за потерями влаги в твердеющем бетоне подтвердили правильность такого выбора.

Анализ результатов экспериментов (табл. 1) показал, что даже в камере с относительной влажностью не менее 90 % потеря влаги в твердеющем цементном камне к 28 суткам незначительна и составляет 0,8 %. При твердении в воздушно-сухих условиях с открытой верхней гранью образцы теряют влагу, по данным эксперимента: незащищенные – более 5 % (~ 25 % от количества воды затворения); при укрытии полиэтиленовой пленкой – 1,2 % (~ 5,5 %); с использованием защитных традиционных составов по перечислениям 1 и 2 – 1,5–1,8 % (или ~ 7–8 %) от количества воды затворения и при использовании гидрофобизирующей добавки по перечислению 3 – 2,3 % (~ 10–11 %) от количества воды затворения.

<sup>1</sup> Parrott L.J. In Research on the Manufacture and Use of Cements, Engineering Foundation. / L.J. Parrott. – New York. – 1986. – 43 p.

<sup>2</sup> Patel R.G. / R.G. Patel, D.C. Killoh, L.J. Parrott, W.A. Gutteridge. Mater. Constr. – Paris. – 1988. – P. 21–192.

<sup>3</sup> Прогноз научно-технического развития строительной отрасли Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.nestor.by/5n/2000/23/sn023/5.html> (дата обращения: 15.09.2008).

<sup>4</sup> Пособие по применению химических добавок при производстве сборных железобетонных конструкций и изделий (к СНиП 3.09.01–85) / НИИЖБ. – М.: Стройиздат, 1989. – 39 с.

<sup>5</sup> Применение добавок в бетоне. Пособие: П1–99 к СНиП 3.09.01–85. – Минск: Минстройархитектуры Республики Беларусь, 2000. – 23 с.

<sup>6</sup> См. сноску 4.

<sup>7</sup> См. сноску 5.

<sup>8</sup> СТБ 1112–98. Добавки для бетонов. Общие технические условия. – Минск: Минстройархитектуры Республики Беларусь, 1998. – 23 с.

Таблица 1. Результаты изменения массы и прочности бетона, обработанного защитным раствором, в серии из 7 образцов с размерами 20×20×20 мм относительно необработанных контрольных образцов (КБ)

Условия твердения образцов <sup>1</sup>	Обозначение серии образцов (марка) <sup>2</sup>	Потери массы образцов, г, в возрасте, сут. <sup>3</sup>				Прочность образцов, МПа в возрасте, сут. <sup>3</sup>			
		3	7	28		3	7	28	
		г		%		МПа		%	
НВУ	К	0	1,3	2,8	0,8	31,6	46,8	58,5	142
ВСУ	КП	2,7	3,6	4,2	1,2	42,0	52,9	55,3	134
ВСУ	КБ (контрольная)	11,7	17,3	19,25	5,5	36,3	39,8	41,1	100
ВСУ	СА	3,8	5,3	6,3	1,8	40,2	47,7	51,4	125
ВСУ	С	3,6	5,05	5,95	1,7	42,8	46,6	43,2	105
ВСУ	Н	3,1	4,9	5,25	1,5	43,6	47,5	44,4	108
ВСУ	ГФ	3,9	6,2	8,05	2,3	39,9	38,9	38,6	94

**Примечания:**

<sup>1</sup> НВУ – нормально-влажные условия, ВСУ – воздушно-сухие условия.

<sup>2</sup> Расшифровка аббревиатуры марок дана в тексте статьи.

<sup>3</sup> Изменение массы оценивается по изменению веса форм с образцами в возрасте 3, 7, 28 суток, отнесенному к исходной общей массе форм и образцов сразу после их формирования. Прочность образцов определялась после изменения их массы разрушающим методом по методике ГОСТ.

Анализ данных, приведенных в табл. 1, подтверждает эффект повышения качества образцов с защищенными поверхностями, уплотняющими структуру их поверхностного слоя многокомпонентными составами по перечислениям (1 и 2) (серии образцов «С» и «Н») и особенно кремнийорганической жидкостью ГЮЖ-94, в т. ч. составами с гидрофобизирующей добавкой  $Al_2(SO_4)_3$  по критерию снижения в них потерь воды затворения и уровню прочности цементного камня к 28-суточному возрасту. При этом в возрасте 3 суток прочность образцов, обработанных составами по перечислениям (1 и 2), возрастает интенсивнее, чем при обработке их поверхности раствором на основе сульфата алюминия ( $Al_2(SO_4)_3$ ), а после 7 суток, наоборот, становится ниже.

Особенностью разрушения под нагрузкой образцов серий «С», «Н» и «ГФ» было начало деструкции сторон, обработанных данными составами. Оценка твердости обработанных поверхностей (царапание стальной иглой цементного камня) показала, что их качество ниже, чем у необработанных граней этих же образцов (особенно серии «ГФ»), после чего эта добавка была снята с испытаний.

Для уточнения установленного явления и выбора наиболее эффективных защитных составов выполнены дополнительные сравнительные экспериментальные исследования составов по перечислениям (1–3) согласно общей методике для воздушно-сухих условий твердения образцов ( $t \sim 30^\circ C$ ;  $\varphi \sim 50\%$ ), а также в вариантах их твердения при температуре воздуха  $t = (40–50)^\circ C$ . Испытания показали факт снижения прочности цементного камня при повышении температуры среды твердения к возрасту 28 суток и более (до возраста в 14 суток (включительно) прочность образцов возросла относительно контрольных образцов (КБ) при обработке бетона многокомпонентным составом серии «Н» и, в несколько меньшей мере, составом

«СИФТОМ» ( $MgSiF_6$ ) серии «С». Исследовались также варианты с обработкой всех поверхностей образцов составами по перечислениям (1–3), включая вариант с предварительным их разогревом с целью проверки величины ускорения фильтрационно-диффузионного процесса и увеличения глубины проникновения раствора в бетон. Результаты опытов позволили оценить степень влияния воздействия компонентов составов на прочность цементного камня с течением времени и уточнить направление дальнейших исследований. В табл. 2 представлены данные экспериментов с образцами размерами 20×20×20 мм, изготовленными из теста нормальной густоты; ПЦ М500 – Д20;  $K_{нг} \sim 0,28$  с оценкой изменения их прочности на сжатие. Приняты следующие условные обозначения серий образцов (не менее 6 штук в серии):

- «КБ» – контрольные образцы с поверхностями, не обработанными защитными растворами;
- «СА» – образцы, обработанные раствором с добавками сульфата алюминия;
- «С» – то же, обработанные раствором «СИФТОМ»;
- «Н» – то же, обработанные раствором-дисперсным составом А.А. Шматова.

Для контрольных образцов с поверхностями, не обработанными защитными растворами, относительная прочность в 28 суток, выраженная в %, принята за 100 %.

Образцы цементного камня твердели первые 24 часа в формах при температурных условиях, указанных в табл. 2. Поверхности образцов после их распалубки (формования) защищались со всех сторон двумя слоями растворов соответствующих составов (или не защищались для серии «КБ»), затем выдерживались (твердели) в воздушно-сухой среде при  $t = 30, 40$  и  $50^\circ C$  в течение 2, 6 и 13 суток; от 14 суток до возраста 28 суток – в помещении лаборатории при  $t \sim 20 \pm 3^\circ C$ ;  $\varphi \sim 65–70\%$ .

Таблица 2. Результаты изменения прочности образцов твердеющего цементного камня при воздушно-сухих условиях хранения сравниваемых составов

Температура среды, °С	Обозначение серии образцов (марка <sup>2</sup> ) сравниваемых составов	Прочность цементного камня на сжатие в возрасте, сут.				
		3, Па	7, МПа	14, МПа	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
	Н	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
	Н	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
	Н	42,7	42,0	41,1	36,6	94
30*	СА-30 <sup>1</sup>	42,0	43,5	43,9	45,0	100
	С-30	42,9	42,9	41,8	39,5	88
	Н-30	43,8	43,0	41,4	38,3	85
	СА-50 <sup>1</sup>	44,4	44,7	44,7	46,2	100
	С-50	45,6	44,3	42,0	38,8	84
	Н-50	45,5	45,6	41,1	37,6	81

*Примечания:*  
<sup>1</sup> Твердение образцов до 14 суток при t ~ 30 °С, поверхность которых предварительно обработана составами, подогретыми до t = 30 °С и t = 50 °С.  
<sup>2</sup> Расшифровка марок дана в тексте статьи

Данные экспериментов (см. табл. 2) показали неоднозначность эффекта упрочнения при обработке поверхности образцов из испытываемых составов по перечислениям (1–3) во времени из сравниваемых составов.

Анализ табл. 2 показывает, что применение защитного раствора по перечислению 3 с добавкой  $Al_2(SO_4)_3$  дает устойчивый эффект стабильного повышения прочности обработанного им цементного камня образцов по сравнению с обработанными растворами по перечислениям (1–3), а также с необработанными при прочих равных условиях. В частности, до возраста (3–7) суток состав с  $Al_2(SO_4)_3$  незначительно уступает в эффективности сравниваемым защитным составам по перечислению (1–3), но с 14 суток твердения существенно их превосходит, и, в отличие от них, без снижения прочности образцов. При этом на отрицательный эффект снижения

прочности образцов серии «С» и «Н» к возрасту 28 суток особенно большое влияние оказывает обработка поверхности образцов защитными составами, подогретыми до 30–50 °С (см. табл. 2).

**2. Оптимизация технологических параметров защиты свежееотформованного бетона раствором с использованием сульфата алюминия. Методика исследования.** Отработка технологии первичной защиты свежееотформованного бетона включала экспериментальную оценку влияния концентрации вещества  $Al_2(SO_4)_3$  в растворе, способа нанесения (смачивание поверхности поролоновым тампоном, валиком, кистью и т. п. и распыление сжатым воздухом), количества нанесения слоев защиты, времени начала обработки после формирования при твердении в естественных воздушно-сухих условиях при t ~ 20±3 °С;

$\phi$  ~ 60–70 % и при повышенной до 30, 40 и 50 °С температуре в вариантах прогрева образцов в формах в течение 24 ч и дальнейшего их твердения после распалубки до 14–28 суток. Относительная влажность воздуха при повышенной температуре составляла  $\phi$  ~ 50–55 %.

Кроме указанных параметров исследовалось влияние скорости ветра (движения воздуха) в диапазоне  $V_v$  ~ 0–10 м/с (при расчетном значении  $V_v = 7$  м/с, практикуемом для расчетов режимов твердения бетона в зимний период<sup>9, 10</sup>).

Основной объем экспериментов выполнялся с использованием образцов с размерами кубов 20×20×20 мм цементного камня (ПЦ М500 – Д20;  $K_{нг} = 0,28$ ), а полученные важнейшие результаты апробировали на образцах-балочках 160×40×40 мм из мелкозернистого бетона и образцах-кубах с ребром 100 мм из тяжелого бетона. Дополнительные особенности методик отдельных экспериментов приведены ниже в соответствующих пунктах статьи.

**2.1. Оптимизация параметров защитных растворов на основе уплотняющей структуру бетона добавки сульфата алюминия ( $Al_2(SO_4)_3$ ).** Оптимизация концентрации в рабочих защитных растворах уплотняющей структуру бетона добавки связана с определением количества компонентов в их составе, обеспечивающих максимальные: а) снижение потерь влаги (особенно в начальный период твердения), б) прочность бетона. Согласно данным, приведенным в технической литературе и действующих нормах ТНПА<sup>11</sup>, эта концентрация рекомендуется в количестве 3 %, при общем ограничении количества химических добавок, вводимых в бетон, – 5 % от массы цемента.

<sup>9</sup> СТБ-ЕН 206-2016 Бетоны конструкционные тяжелые. Технические условия. Минск : Стройтехнорм, 2016. – 105 с.

<sup>10</sup> СТБ-ЕН 206-1-2009 Бетон. Часть 1. Требования, показатели, изготовление и соответствие. Минск. Республика Беларусь, 2009. – 69 с.

<sup>11</sup> См. сноску 5.

Исходя из этого, а также учитывая данные предварительных экспериментов, экспериментальные исследования по оптимизации дозировок добавок в составе защитных растворов выполнены с использованием образцов из тяжелого (обычного) бетона с расходом цемента:  $C = 350 \text{ кг/м}^3$ . При толщине «пропитанного» слоя бетона в 2–2,5 мм, с удельным объемом  $(1,0 \times 1,0 \times 0,002 (0,0025)) \sim 0,002 \text{ м}^3$  и  $0,0025 \text{ м}^3$  расход цемента равен:  $C_1 = 350 \text{ 000} \times 0,002 = 700 \text{ г}$  и  $C_2 = 350 \text{ 000} \times 0,0025 = 875 \text{ г}$ .

Для режима обработки поверхности образцов 5%-ным раствором  $Al_2(SO_4)_3$ , размещенных на поверхности металлической плиты размерами  $100 \times 100 \times 400 \text{ мм}$ , требуется расход раствора на один слой, наносимый на поверхность распылением струей воздуха  $200 \pm 15 \text{ г/м}^2$ , в среднем  $200 \text{ г/м}^2$ , а количество в растворе добавки  $Al_2(SO_4)_3$  с концентрацией в 5 % для одного слоя –  $200 \times 0,005 = 10 \text{ г}$ , а для двух слоев –  $20 \text{ г}$ . Исходя из этого концентрация («дозировка») добавки  $Al_2(SO_4)_3$  в слое толщиной 2–2,5 мм, при содержании в его объеме цемента:  $C_1 \sim 700 \text{ г}$  и  $C_2 \sim 875 \text{ г}$  соответственно составляет:  $D_1 \sim (20 : 700) \times 100 \sim 2,9 \%$  и  $D_2 \sim (20 : 875) \times 100 \sim 2,3 \%$  от массы вяжущего по сухому веществу, что соответствует требованиям (ограничениям) ТНПА.

На рис. 1 (а и б) показана экспериментально определенная тенденция изменения потерь воды (рис. 1а) и прочности при сжатии (рис. 1б) в бетонных образцах размерами  $20 \times 20 \times 20 \text{ мм}$  (серия из 18 образцов; средние значения – по 12 образцам), которые прогревались в воздушно-сухих условиях в течение 24 часов при температуре  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $\varphi \sim 50 \%$ ).

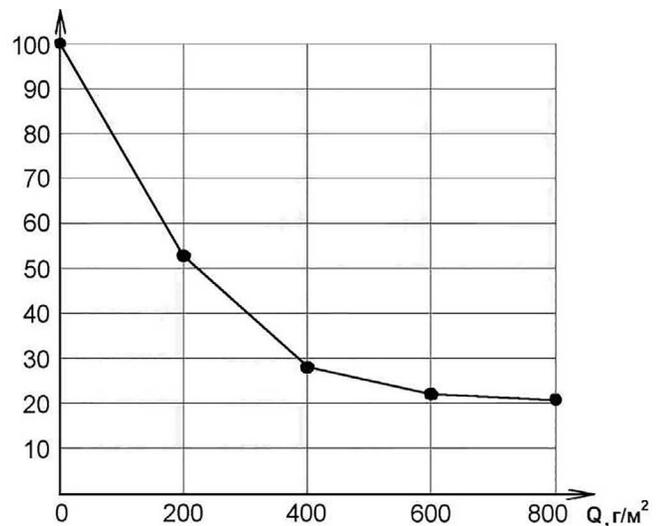
Расход защитного состава регулировался количеством наносимого защитного раствора в 1 слой из расчета  $200 \text{ г/м}^2$  через 0 (после формования), 10, 20 и 30 мин. Для обеспечения «впитывания» производился подогрев до  $30\text{--}35 \text{ }^\circ\text{C}$  цементного теста и форм.

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

Анализ рис. 1 показывает, что расход защитного состава раствора с 5%-ной добавкой  $Al_2(SO_4)_3$ , наносимого более чем в два слоя ( $400 \text{ г/м}^2$ ) на обрабатываемые поверхности, нецелесообразен, т.к. это не приводит к дальнейшему снижению потерь влаги и росту прочности образцов цементного камня. Очевидно, это обусловлено тем, что количество добавки  $Al_2(SO_4)_3$ , находящейся в объеме защитного раствора из более чем 2 слоев не может, начиная с 3 слоя, связаться продуктами гидролиза-гидратации цемента.

**2.2. Исследование влияния раствора с добавкой  $Al_2(SO_4)_3$  на эффективность защиты твердеющего бетона после его распалубки в зависимости от температуры, скорости ветра и удельного расхода состава.** В процессе ранжирования параметров, влияющих на эффективность защитных составов,

а)  $\Delta W, \%$



б)  $f_{ц.к.с}, \%$

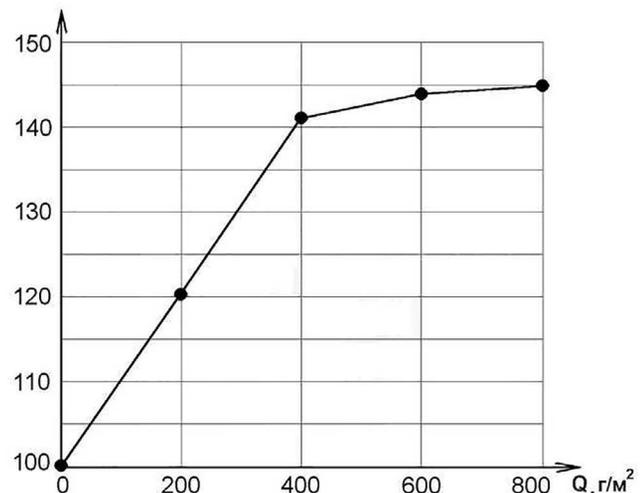


Рис. 1. Графики потерь воды W (а) и набора прочности образцов  $f_{ц.к.с}$  (б) в зависимости от расхода защитного состава (за 100 % приняты потери воды и прочность контрольных незащищенных образцов)

по литературным источникам определено, что основными факторами, воздействующими на частично затвердевший бетон изделий (конструкций) после его распалубки, являются температура воздушной среды, скорость движения воздуха (ветра) и относительная его влажность, которая в летний период в Республике Беларусь, как правило, не опускается ниже  $70\text{--}75 \%$ . Исходя из чрезвычайной сложности перманентного контроля фактора влажности подвижной воздушной массы, в исследованиях это влияние учитывалось косвенно, в интегральной совокупности с влиянием температуры и скорости движения воздуха (ветра), без выделения в отдельный эксперимент.

Рост прочности бетона стандартизированного состава (на ПЦ М 500; Д20) оценивался на образцах-кубах с ребром  $70 \text{ мм}$ , первые 24 часа твердевших в формах, затем после распалубки – на металлических площадках,

установленных в аэродинамической трубе для обдува воздухом с регулируемой скоростью.

Защитный состав раствора с 5%-ной добавкой  $Al_2(SO_4)_3$  наносился в два слоя на свежееотформованную верхнюю поверхность, а после распалубки – на боковые поверхности (из-под металла) по методике А.А. Шматова. Кроме того, при  $t = 40\text{ °C}$  и скорости ветра  $V_v = 7,0\text{ м/с}$  защитные составы наносились как в 2 слоя (~ 400 г/м<sup>2</sup>), так и в 3 слоя (~ 600 г/м<sup>2</sup> расход раствора).

Температурный режим твердения разных серий образцов производился при температуре 20 °C; 30 °C и 40 °C, при скорости ветра  $V_v = 0; 5,0$  и 7,0 м/сек.

Каждая серия образцов состояла из 12 образцов (4 формы на 3 образца каждая), которые твердели в воздушно-сухой среде с требуемой температурой и скоростью ветра согласно программе испытаний.

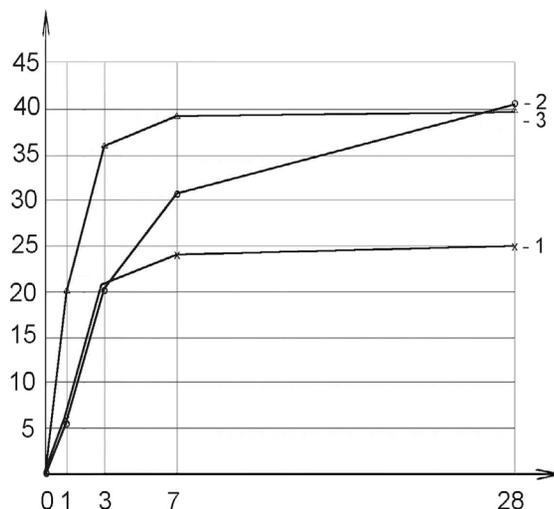
Прочность образцов определялась разрушающим методом, испытанием на прочность на сжатие по методике ГОСТ 10180-90<sup>12</sup>, с учетом поправочного масштабного коэффициента  $\alpha = 0,85$  при среднем значении единичных испытаний, принятом по двум наибольшим результатам серии из 3 образцов. Результаты испытаний образцов с защитными составами растворов на основе добавки  $Al_2(SO_4)_3$  в зависимости от температуры, скорости ветра и расхода раствора даны на рис. 1–3.

Прочность контрольных образцов в 28 суток нормально-влажностного твердения составила ~ 42 МПа. Результаты экспериментов, отражающих кинетику роста прочности бетона при различных режимах твердения в воздушно-сухих условиях, представлены на рис. 2 и 3.

На рис. 3 показана тенденция роста прочности образцов бетона, твердевших в нормально-влажностных условиях (график 1) и при  $t = 20\text{ °C}$  на воздухе (в помещении лаборатории) с защитой свежееотформованной верхней поверхности и остальных поверхностей образцов двумя наносимыми распылением слоями раствора на основе 5%-ной добавки  $Al_2(SO_4)_3$  (график 2) для сроков твердения 56 и 112 суток. Из экспериментальных данных видно, что образцы защищенного раствором бетона к 56 суткам воздушно-сухого твердения (в рамках выполненного эксперимента) достигают прочности бетона проектного возраста (т. е. 28 суток), твердевшего в стандартных нормально-влажностных условиях. Это свидетельствует о сохранении эффекта упрочнения бетона, обработанного растворами на основе  $Al_2(SO_4)_3$ , во времени, что позволяет не прибегать к повышению проектной прочности защищаемого бетона для гарантирования его прочностных свойств в течение всего проектного срока эксплуатации бетонных конструкций.

<sup>12</sup> ГОСТ 10180-90 Бетон. Методы определения прочности по контрольным образцам.

Прочность  $f_{ст28}$ , МПа

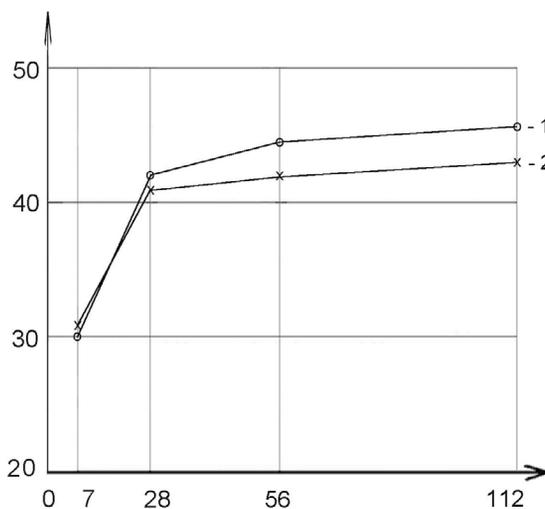


Возраст  $\tau$ , сут.

1 – образцы без защитных растворов ( $V_v = 0\text{ м/с}$ ,  $t = 20\text{ °C}$ ),  
2 – образцы с защитным раствором ( $V_v = 0\text{ м/с}$ ,  $t = 20\text{ °C}$ ),  
3 – образцы с защитным раствором ( $V_v = 7\text{ м/с}$ ,  $t = 40\text{ °C}$ )

Рис. 2. Графики зависимости прочности бетона от температуры и скорости ветра

Прочность  $f_{ст \tau}$ , МПа



Возраст  $\tau$ , сут.

1 – нормально-влажностные условия,  
2 – воздушно-сухие с защитой поверхности образцов.

Рис. 3. Тенденция роста прочности бетона с течением времени

По итогам выполненных исследований можно сделать вывод, что основным фактором, влияющим на кинетику твердения (темп роста прочности) обработанного защитным составом на основе сульфата алюминия бетона, является температура. Ее повышение с 20 до 40 °C способствует примерно 3-кратному росту прочности за первые сутки твердения, сохранению высокого темпа роста до 3–7 суток. В то же время это сопровождается понижением его прочности к 28 суткам на 2–4 %.

Фактор скорости ветра (в пределах данного эксперимента до  $V_b \leq 7$  м/сек) не имеет решающего значения для защищенного бетона. Можно предположить, что ускорение теплообмена между движущимся воздухом с повышенной температурой и поверхностью образцов бетона, обработанных защитным раствором с  $Al_2(SO_4)_3$ , является причиной некоторого повышения прочности с ростом скорости ветра для  $t = 30$  °C и 40 °C в пределах 1–3 суток твердения.

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

Одновременно полученные данные свидетельствуют о достаточной для практического использования эффективности защитных составов на основе уплотняющего структуру бетона добавки  $Al_2(SO_4)_3$ . При этом подтверждено ранее установленное положение о достаточности нанесения на защищаемую поверхность 2 напыляемых слоев раствора с добавлением 5 %  $Al_2(SO_4)_3$ . Увеличение расхода от ~ 400 г/м<sup>2</sup> до ~ 600 г/м<sup>2</sup> заметного эффекта не дало, при незначительной общей положительной тенденции влияния на прочность.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненной работы можно сделать следующие выводы.

1. Сравнительный экспериментальный анализ эффективности различных видов защитных веществ: гидрофобизирующей жидкости 136–41 (ГКЖ – 94), кольматирующей добавки «СИФТОМ» ( $MgSiF_6$ ), упрочняющего металлические поверхности состава А.А. Шматова и предлагаемой добавки из уплотняющего структуру бетона вещества сульфата алюминия ( $Al_2(SO_4)_3$ ), показал, что защитный раствор на основе  $Al_2(SO_4)_3$  эффективнее по сравнению с известными, т. к. повышает качество и снижает себестоимость работ по уходу за бетоном до 20 %.

2. Разработана инновационная ресурсосберегающая технология первичной защиты твердеющего бетона, включая уход за свежееотформованным бетоном и частично затвердевшим бетоном после распалубки изделий (конструкций). На основе выполненных исследований

по оптимизации технологических факторов, влияющих на эффективность защиты бетона раствором на основе  $Al_2(SO_4)_3$  (вида применяемого вещества; времени нанесения; расхода добавки  $Al_2(SO_4)_3$ , температуры и влажности среды твердения; скорости ветра и их сочетаний), оценено их влияние на потери влаги бетоном в процессе воздушно-сухого твердения и рост его прочности, разработаны рекомендации и получен патент.

3. Апробация инновационной технологии на основе сульфата алюминия в производственных условиях подтвердила результаты лабораторных исследований и ее эффективность.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Тейлор, К. Химия цемента / К. Тейлор. Пер. с англ. – М. : Мир, 1986. – С. 294–345.
2. Powers, T.C., Brownard, T.I. Studies of the physical properties of Hardened Portland Cement Paste / T.C. Powers, T.I. Brownard. (Bull. 22), p. 992. – Portland Cement Association, Chicago, 1948; reprinted from J.Am. Concr. Inst. (Proc.), 1947. – P. 43, 101, 249, 469, 549, 669, 845, 993.
3. Лыков, А.В. Тепло- и массообмен в процессах сушки / А.В. Лыков. – М. : Госэнергоиздат, 1956. – 464 с.
4. Лыков, А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. – М. : Госиздат, 1968. – 472 с.
5. Торопов, Н.А. Химия цементов / Н.А. Торопов. – М. : Промстройиздат, 1956. – 270 с.
6. Юнг, В.Н., Бут, Ю.М., Журавлев, В.Ф., Окороков, С.Д. Технология вяжущих веществ / В.Н. Юнг, Ю.М. Бут, В.Ф. Журавлев, С.Д. Окороков. – М. : Промиздат, 1952. – 262 с.
7. Мощанский, Н.А. Повышение стойкости строительных материалов и конструкций, работающих в условиях агрессивных сред / Н.А. Мощанский. – М. : Госстандарт, 1962. – 235 с.
8. Мощанский, Н.А., Стольников, В.В. Плотность и стойкость бетонов / Н.А. Мощанский, В.В. Стольников. – М. : Госстройиздат, 1951. – 175 с.
9. Стольников, В.В. Исследования по гидротехническому бетону / В.В. Стольников. – М. : Госэнергоиздат, 1953. – 330 с.
10. Рояк, С.М., Рояк, Г.С. Специальные цементы / С.М. Рояк, Г.С. Рояк. – М. : Стройиздат, 1969. – 278 с.
11. Сычев, Н.М. Твердение вяжущих веществ / Н.М. Сычев. – Л. : Стройиздат, 1974. – 80 с.
12. Дементьев, Г.К. Условие долговечности бетона и железобетона / Г.К. Дементьев. – Куйбышев : Куйбышевское книгоиздательство, 1965. – 120 с.
13. Гордон, С.С. Структура и свойства тяжелых бетонов на различных заполнителях / С.С. Гордон. – М. : Стройиздат, 1969. – 160 с.
14. Бруссер, М.И. Исследование структурной пористости бетона и факторов, ее определяющих : Автореф. дис. ... канд. техн. наук. 08.00.05. – Строительные материалы и изделия. – М., 1971. – 19 с.
15. Коупленд, Л.Э., Вербек, Д.Д. Структура и свойства затвердевшего цементного теста / Л.Э. Коупленд, Д.Д. Вербек // Шестой международный конгресс по химии цемента. – М. : Стройиздат, 1976. – Т. 2. – С. 258–274.
16. Волженский, А.В. Теоретическая водопотребность вяжущих, величина частиц новообразований и их влияние на деформации твердеющих систем / А.В. Волженский // Бетон и железобетон. – 1969. – № 9. – С. 35–36.
17. Шейкин, А.Е., Чеховский, Ю.В., Бруссер, М.И. Структура и свойства цементного бетона / А.Е. Шейкин, Ю.В. Чеховский, М.И. Бруссер. – М. : Стройиздат, 1979. – 344 с.