

# КИНЕТИКА ТВЕРДЕНИЯ И СВОЙСТВА ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ С УСКОРЯЮЩИМИ ТВЕРДЕНИЕ БЕТОНА ДОБАВКАМИ

## HARDENING KINETICS AND PROPERTIES OF CEMENT STONE WITH ADDITIVES ENHANCING CONCRETE HARDENING



**Н. С. Гуриненко,**  
аспирант, старший  
преподаватель кафедры  
«Технология бетона  
и строительные материалы»  
Белорусского национального  
технического университета,  
г. Минск, Беларусь

**Э. И. Батяновский,**  
доктор технических наук,  
профессор, заведующий  
кафедрой «Технология бетона  
и строительные материалы»  
Белорусского национального  
технического университета,  
г. Минск, Беларусь

В статье приведены результаты исследований влияния на кинетику твердения и свойства цементного камня разработанной отечественной многокомпонентной добавки-ускорителя твердения цементного бетона и добавок микро- и ультрадисперсного аморфного кремнезема. Данные исследования проводились с целью повышения темпа роста и уровня прочности бетона путем формирования более плотной структуры цементного камня.

Экспериментально подтверждена эффективность предлагаемой авторами двухкомпонентной добавки, содержащей ускоритель твердения и уплотняющее структуру цементного камня вещество, действие которого ускоряет твердение цемента. Приведены экспериментальные данные, подтверждающие эффективность использования ультрадисперсного микрокремнезема (УДМК) в сопоставлении с «традиционным» микрокремнеземом (МК), дозировка которого в высокопрочном бетоне может быть уменьшена до 1 % от массы цемента (вместо не менее 10 % для МК) с обеспечением прочности не менее 100 МПа.

The article cites results of study of the influence of locally developed cement concrete hardening multicomponent accelerated admix and admixes of micro- and ultrafine amorphous silicon oxide on the hardening kinetics and cement stone properties. The research was carried out with a view to enhance growth rate and concrete strength level through formation of more dense cement stone structure.

Effectiveness of two-component admix proposed by the authors, containing hardening accelerator and substance compacting cement stone structure whose action accelerates cement hardening has been experimentally proven. Experimental data is given confirming effectiveness of using ultrafine microsilica (UFMS) as compared to «traditional» microsilica (MS), whose gauging in high-strength concrete can be reduced down to 1 % of cement mass (against at least 10 % for MS), while providing minimal strength of 100 MPa.

### Введение

Бетон для дорожного полотна (сборных изделий и монолитного варианта устройства) должен иметь высокую плотность и прочность, чтобы обеспечивать долговременную эксплуатационную надежность в «жестких» условиях постоянного комплексного воздействия эксплуатационной среды и механических нагрузок. Известно [1, 2], что в этом случае процесс деструкции бетона при воздействии циклов замораживания-оттаивания, насыщения-высушивания ускоряется, особенно в присутствии солей (например, применяемых в качестве антиобледенителей). Одновременно рационально (особенно при монолитном варианте строительства), чтобы бетон (при необходимом периоде

формуемости смеси) быстро набирал прочность, обеспечивая высокий темп ведения бетонных и сопутствующих работ. В статье отражены результаты исследований, направленных на решение задач повышения структурной плотности цементного камня и бетона в сочетании с обеспечением высокого темпа роста прочности. Результат достигается за счет использования усовершенствованной химической добавки (с «ускоряюще-уплотняющим» эффектом действия) и минеральной добавки в виде ультра- и микрокремнезема. В составе усовершенствованной добавки ускоряющим твердение бетона компонентом является сульфат натрия ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), действие которого усилено введением вещества «А», уплотняющего структуру бетона. Авторы приносят извинения за кодирование вещества «А» в связи с рассмотрением в настоящее время заявки на патент Беларуси. Оба эти вещества разрешены и рекомендуются к применению в цементных бетонах [3, 4].

## Материалы и концепция исследований

### Характеристики материалов

В исследованиях использовался портландцемент ПЦ500-Д0 ОАО «Красносельскстройматериалы» (примерный минералогический состав:  $\text{C}_3\text{S} \sim 58,44\%$ ;  $\text{C}_2\text{S} \sim 18,9\%$ ;  $\text{C}_3\text{A} \sim 5,57\%$ ;  $\text{C}_4\text{AF} \sim 13,03\%$ ); активностью  $R_{\text{ц}} = 49,2$  МПа; нормальной густотой 24,75%; со сроками схватывания: начало – 120 мин, конец – 266 мин (получен для выполнения исследований от филиала «ЗЖБМК» ОАО «Дорстройиндустрия») [5]. Вода (питьевая) для затворения и последующего твердения (отдельных серий образцов) по СТБ 1188-99.

Сульфат натрия ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ; СН) кристаллизационный – по ГОСТ 21458-75.

Дополняющий компонент добавки «А» относится к группе стандартизованных химических веществ, разрешенных к применению в бетоне в качестве уплотняющих структуру добавок. Отобран по результатам сравнительных испытаний ряда добавок этой группы на эффективность в цементном камне по критерию роста прочности в нормальных условиях и при прогреве в диапазоне температур 30 °С–80 °С.

В качестве активной минеральной добавки аморфного кремнезема использовали УДМК, со-

Таблица 1 – Характеристики ультрадисперсного микрокремнезема

Показатель	Фактически
Внешний вид и цвет	Белый рыхлый порошок
Запах	Не выражен
Массовая доля диоксида кремния (в сухом остатке), %	98
Массовая доля воды, %	6
Массовая доля растворимого Fe, %	0,1
Массовая доля сульфатов, %	1,8
Площадь удельной поверхности, м <sup>2</sup> /г	350
pH (5 %-ная водная суспензия)	6,1
Насыпная плотность при 20 °С, г/л	55

ответствующий ТУ 2168-002-14344269-09 «Ковелос» (диоксид кремния осажденный) с характеристиками, приведенными в таблице 1.

В качестве пластификатора использовали «Стахемент 2000» – пластифицирующую добавку I группы согласно СТБ 1112 [3] (суперпластификатор с повышенным водоредуцирующим эффектом). Сертификат соответствия требованиям СТБ 1112-98 [3] – № ВУ /112 03.1.3 ГА 1764. В исследованиях использовали водный раствор добавки 30 %-ной концентрации.

### Концепция исследований

Рабочая гипотеза исследований влияния предлагаемой ускоряющей твердение бетона добавки базируется на исходной посылке авторов статьи, что механизм действия химических добавок-ускорителей на процессы гидратации, схватывания и твердения цемента представляет собой комплексное физико-химическое явление, включающее (обобщающее) различные воззрения исследователей [6–13 и др.]. Рационально исходить из того, что их воздействие – это сочетание эффекта «пептизации» («физико-химического» диспергирования флокул цемента) и «связывания»  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (с эффектом ускорения растворения  $\text{C}_3\text{S}$  и  $\text{C}_2\text{S}$ ), а также реакций с алуминатами и ферритами с образованием сложных солей-соединений, а в нашем случае – и увеличение объема новообразований за счет влияния уплотняющего структуру компонента при итоговом повышении плотности и прочности цементного камня и бетона. При этом преобладающий эффект может быть связан со свойствами химических веществ в составе конкретной добавки, что по существу показано в работах Ратинова, Розенберг [8, 9] и других исследователей [10, 11].

В случае введения в состав аморфного кремнезема, дисперсность и значительная удель-

ная поверхность зерен которого обуславливают высокие пуццоланические свойства, резко возрастает количество гидратированных силикатов типа «CSH» в результате реакции:  $\text{SiO}_2 + n\text{Ca}(\text{OH})_2 + m\text{H}_2\text{O} \rightarrow k\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot p\text{H}_2\text{O}$ .

Известно [14–16], что прочность зоны контакта (переходной зоны) между цементным камнем и заполнителем меньше прочности самого цементного камня. Зона контакта характеризуется большей пористостью, образующейся вследствие большего количества свободной воды около зерен заполнителя и меньшей плотностью упаковки частиц цемента у его поверхности. В этом пространстве скапливается большое количество портландита и формируются крупные кристаллы  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , ориентированные перпендикулярно поверхности заполнителя (и арматуры). Кристаллы портландита обладают меньшей прочностью, чем гидратированные силикаты кальция CSH, и с учетом большей пористости контактная переходная зона является слабым местом в тяжелом бетоне.

Добавка в бетон аморфного кремнезема приводит к уплотнению структуры контактной переходной зоны за счет реакции с  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . В результате снижается ее пористость, возрастает качество (сила) сцепления цементного камня с заполнителем (и арматурой в железобетоне). Пуццоланические реакции как фактор химического воздействия вызывают дальнейшее повышение плотности и прочности бетона.

Одновременно тонкодисперсные частицы (особенно УДМК) могут служить центрами кристаллизации, вокруг которых с меньшими затратами энергии, а значит и в более высоком темпе, формируются кристаллогидратные новообразования – продукты взаимодействия клинкерных минералов цемента с водой. Являясь своеобразной «подложкой», мельчайшие частицы УДМК катализируют процесс формирования кристаллогидратной структуры в твердеющем цементном камне, что отражается в росте темпа набора прочности бетоном.

Кроме изложенного, нельзя исключить развитие реакции между аморфным  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  не только по ранее приведенной схеме, относящейся к уплотнению и упрочнению контактной переходной зоны между цементным камнем и заполнителем, но (и даже в первую очередь) следует учитывать ее развитие по ходу гидролизно-гидратационного взаимодействия цемента с водой. Очевидно, что появление

с первых минут этого взаимодействия [17 и др.] в жидкости щелочи вызовет развитие реакции с кремнеземом, что, в свою очередь, будет способствовать повышению скорости гидролиза и гидратации трех- и двухкальциевого силиката клинкерной части цемента.

## Свойства и кинетика твердения цемента

### Водопотребность цемента

Из данных таблицы 2, полученных на примере ПЦ 500-Д0 Красносельского завода (практически аналогичных для цементов других отечественных заводов), следует, что двухкомпонентная добавка из веществ – «истинных» электролитов, распадающихся в водной среде на ионы, – незначительно (на 1 %–1,5 %) снижает водопотребность вяжущего.

Следует отметить, что в растворных и бетонных смесях, уплотняемых вибрированием, этот эффект более значителен (не менее 3 %). Выявлено, что для двухкомпонентной добавки он соответствует «нормативному» [4] для добавок ускоряющей твердение группы, т. е. без изменения расхода воды бетонная смесь по подвижности переходит в марку «П2» от исходной «П1». Этот «квазипластифицирующий» эффект связан с повышенным водоотделением, он проявляется при механических воздействиях на бетонную (растворную) смесь из-за частичной «блокировки» ионами растворенного вещества потенциала поверхности твердой фазы (цемента, зерен заполнителей, пылевидных частиц) и в уменьшении количества связываемой жидкости, что приводит к кратковременному «разжижению» смеси за счет «высвобождения» части воды затворения из внешних слоев сольватных оболочек частиц твердой фазы. Введение в цемент микрокремнезема, характеризующегося высокой удельной поверхностью и ее потенциалом, закономерно сопровождается повышением количества воды, необходимой для обеспечения

Таблица 2 – Изменение нормальной плотности (НГ)

Номер состава	Вид добавки и ее количество, % от МЦ	Количество воды для теста НГ, г	$\Delta B$ , %	$K_{нг}$ , доли ед.
1	Без добавки	99	100	0,2475
2	1 % СН	97,5	98,5	0,2437
3	0,5 % СН	98	99	0,2450
4	0,5 % СН + 0,125 % А	98	99	0,2450
5	0,5 % СН + 0,25 % А	98	99	0,2450
6	0,5 % СН + 0,5 % А	97,5	98,5	0,2437
7	10 % МК	124	125	0,283
8	1 % УДМК	105	106	0,2625

консистенции теста на уровне нормальной густоты цемента без добавок.

### Сроки схватывания (таблица 3)

Для заводских технологий изготовления бетонных и железобетонных изделий сокращение срока начала схватывания (но в пределах времени, необходимого для качественного формования изделий) способствует сокращению времени предварительной выдержки и цикла твердения бетона в целом. Такой вариант приемлем также и для монолитного строительства в случае приобъектного приготовления бетона. При необходимости транспортирования бетона на значительное расстояние или при продолжительном периоде его укладки в конструкцию возможная потеря подвижности смеси и сокращение сроков схватывания бетона представляют собой требующую разрешения проблему.

Влияние добавки сульфата натрия на сроки схватывания цементов отечественных заводов разных марок (активности) и групп эффективности при пропаривании исследовано в работах [18, 19]. В таблице 3 показано влияние на сроки схватывания цемента исследуемых добавок, которые определены на цементном тесте нормальной густоты в соответствии с СТБ ЕН 196-3-2007 (ГОСТ 310.3-76). Из данных, полученных для портландцемента марки ПЦ500-Д0 1-й группы эффективности при пропаривании (соответствует классу СЕМ I 42,5N), следует, что двухкомпонентный ускоритель твердения в целом сокращает срок начала схватывания в большей степени, чем монодобавка сульфата натрия (при прочих равных условиях). Так, по данным [18, 19], сокращение срока начала схватывания для исследованного вяжущего достигло не более 25 %, а в нашем случае (при рациональной дозировке уплотняющего структуру компонента не более 0,25 % от МЦ) составило не более 30 % и 9 %–17 % для добавок микрокремнезема. Сокращение срока начала схватывания не является критическим, но должно учитываться при ведении бетонных работ.

Таблица 3 – Изменение сроков схватывания цемента

Номер состава	Состав цементного теста (вид добавки и ее количество от массы цемента)	Начало схватывания		Конец схватывания	
		ч, мин	%	ч, мин	%
1	Без добавки	2 <sup>00</sup>	100	4 <sup>26</sup>	100
2	0,5 % СН	1 <sup>35</sup>	79,2	3 <sup>40</sup>	82,7
3	0,5 % СН + 0,125 % А	1 <sup>33</sup>	77,5	3 <sup>38</sup>	82,0
4	0,5 % СН + 0,25 % А	1 <sup>25</sup>	70,8	3 <sup>30</sup>	78,9
5	0,5 % СН + 0,5 % А	1 <sup>20</sup>	66,7	3 <sup>28</sup>	78,2
6	10 % МК	1 <sup>50</sup>	91,7	4 <sup>26</sup>	100
7	1 % УДМК	1 <sup>40</sup>	83,3	4 <sup>16</sup>	96,2

### Кинетика твердения цементного камня (рис. 1–3)

Прочность на сжатие цементного камня определяли на сериях (не менее шести образцов в каждом единичном испытании) образцов 20 × 20 × 20 мм, изготовленных из цементного теста «нормальной» густоты и твердевших в воде (первые сутки – в нормально-влажностных условиях (НВУ) либо в НВУ, а также подвергавшихся кратковременному (за 2 часа) разогреву-пропариванию (нагрев в форме над водой в кипятильном бачке) до температуры 30 °С–50 °С с последующим остыванием в бачке (изолирован пенополистиролом) до 24 ч от момента испытаний и (после распалубки) до момента испытаний в нормально-влажностных условиях.

На рисунке 1а приведены данные в виде графических зависимостей роста прочности на сжатие (в МПа), а на рисунке 1б – относительной прочности (выраженной в процентах от принятой за 100 % прочности образцов без добавок в возрасте 28 суток) образцов цементного камня, подвергшихся кратковременному начальному пароразогреву ( $t \sim 40$  °С) при твер-

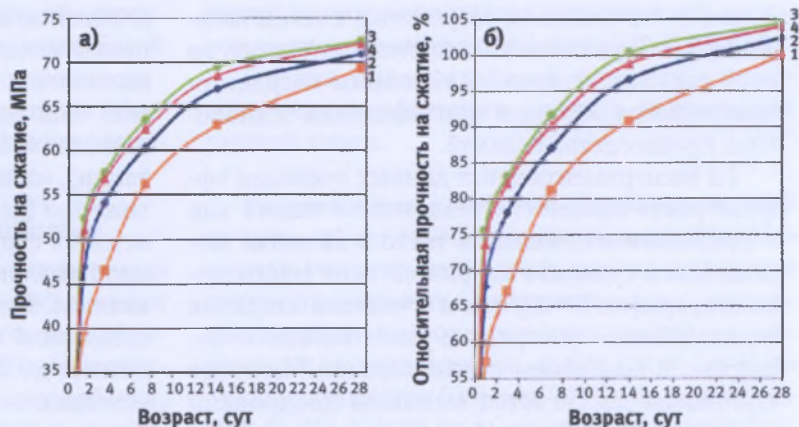
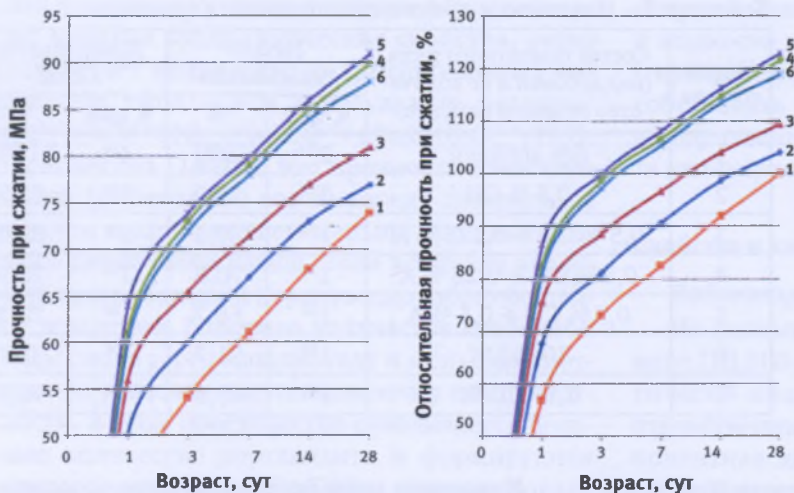
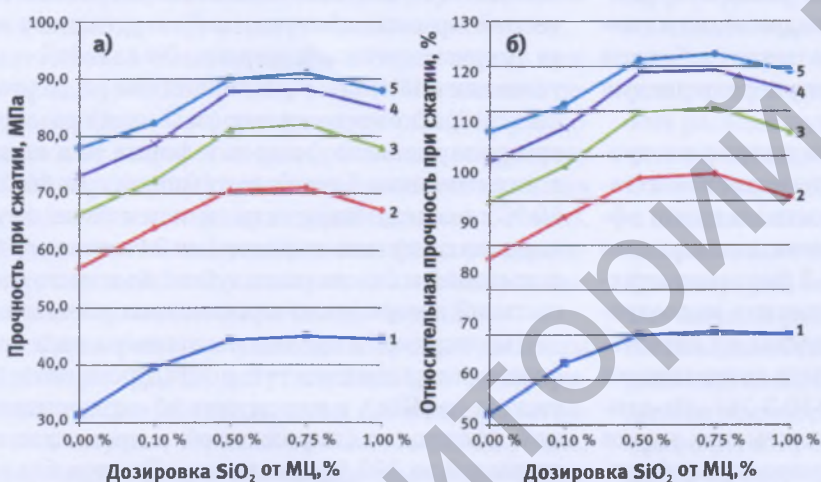


Рисунок 1 – Тенденция роста прочности цементного камня с разогревом до  $t \sim 40$  °С (№ 1 – без добавок, № 2 – 1 % СН, № 3 – 0,5 % СН + 0,25 % А, № 4 – 0,5 % СН + 0,5 % А)



**Рисунок 2 – Тенденция роста прочности цементного камня в нормально-влажностных условиях (№ 1 – без добавки, № 2 – 1 % St2000, № 3 – 0,1 % SiO<sub>2</sub> + 1 % St2000, № 4 – 0,5 % SiO<sub>2</sub> + 1 % St2000, № 5 – 0,75 % SiO<sub>2</sub> + 1 % St2000, № 6 – 1 % SiO<sub>2</sub> + 1 % St2000)**



**Рисунок 3 – Влияние дозировки SiO<sub>2</sub> на прочность цементного камня (в возрасте № 1 – 1 суток, № 2 – 3 суток, № 3 – 7 суток, № 4 – 14 суток, № 5 – 28 суток (нормально-влажностные условия твердения))**

дении 24 ч в тепловом устройстве, а затем твердевших в нормально-влажностных условиях, то есть вариант, близкий к условиям твердения контрольных образцов при заводских технологиях производства изделий.

Из экспериментальных данных очевиден эффект роста прочности цементного камня как с введением в цементное тесто в качестве монодобавки сульфата натрия (1 % от массы цемента; график № 2), так и в случаях введения комплексного «ускоряюще-уплотняющего» вещества. В последнем случае больший прирост прочности достигается меньшей дозировкой комплексной добавки (0,75 % от массы цемента; график № 3), что свидетельствует об ее эффективности. Следует отметить, что оптимальное соотношение этих веществ в открытой

печати будет приведено несколько позже в связи с рассмотрением заявки на патент Беларуси.

На рисунках 2–3 представлены результаты испытаний в виде графиков, отражающих изменения прочности цементного камня во времени в зависимости от дозировки аморфного SiO<sub>2</sub> (УДМК) относительно массы цемента в сочетании с неизменной дозировкой пластификатора без начального нагрева (рис. 2) и с начальным нагревом до 30 °С–40 °С. Их анализ показывает наличие общей тенденции роста прочности цементного камня с введением в цементное тесто (вместе с водой затворения) аморфного кремнезема.

Выявлен оптимум расхода (дозировки) добавки УДМК, составляющей 0,5 %–0,75 % от массы цемента (рис. 3), за пределами которого ее эффективность, отраженная в росте прочности цементного камня, не возрастает или даже снижается (что не подтвердилось при последующих экспериментах с высокопрочным бетоном, оптимум для которого составил ~ 1 % от массы цемента).

Для выявления причинно-следственной связи установленного роста прочности цементного камня в зависимости от применения указанных

добавок из материала образцов были отобраны пробы-аналоги, на которых были комплексно выполнены эксперименты по оценке вызываемых ими изменений в количестве химически связываемой цементом воды (степень его гидратации), «поведения» проб при термическом разложении (дериватографический анализ) и изменений в структурно-морфологическом составе проб-аналогов с помощью рентгено-фазового анализа. Все приведенные далее результаты исследований получены на пробах образцов, твердевших до 28 суток в нормально-влажностных условиях.

**Степень гидратации вяжущего** (таблица 4) определили по количеству химически связанной воды из зависимости:  $\alpha = w_{xc} / w_0 \cdot 100$  (%), где

Таблица 4 – Результаты определения степени гидратации цемента

Номер пробы	Состав пробы	$m_{110}$	$m_{\text{прок}}$	$w_{\text{зс}}$	$w_0$	$\alpha$	$\alpha_{\text{среднее}}$
1	Без добавки	3,07	2,75	0,1164	const: 0,227	51,26	51,28
2		3,72	3,33	0,1171		51,59	
3	0,5 % СН + 0,5 % А	1,58	1,37	0,1530		67,52	69,16
4		1,3	1,12	0,1607		70,80	
5	0,5 % СН + 0,25 % А	1,21	1,04	0,1630		72,00	70,92
6		0,95	0,82	0,1585		69,84	
7	10 % МК	2,42	2,08	0,1635		72,01	73,13
8		3,12	2,67	0,1685		74,25	
9	1 % УДМК	2,31	1,98	0,1667		73,42	73,18
10		2,96	2,54	0,1656		72,95	

$w_0$  – количество воды, которое связывается при полной гидратации вяжущего и которое принято равным 22,7 %, или приблизительно 23 %, от массы вяжущего [13]. В таблице 4 приведены результаты испытаний проб образцов (в возрасте 28 суток) цементного камня без добавок и содержащего исследуемые добавки. Очевидно влияние последних, отражающееся в росте количества химически связанной воды и степени гидратации вяжущего.

Необходимо отметить, что абсолютные значения как количества химически связанной цементом воды, так и степени его гидратации зависят от условий проведения эксперимента и множества влияющих факторов (свойств вяжущего, условий приготовления цементного теста и формования образцов, влажности и времени их твердения и т. д.). В данном случае существенно относительное увеличение количества химически связанной воды и степени гидратации цемента под влиянием вещества добавок (особенно микрокремнезема) «при прочих равных условиях». Следствием этого явилось формирование более плотной и «организованной» структуры цементного камня, что послужило базой для ранее установленного роста его прочности.

Пробы указанных в таблице 4 составов были подвергнуты испытаниям термическим разложением и рентгенофазовому анализу.

#### Результаты детермического анализа

Возможные фазово-структурные изменения затвердевшего цементного камня исследовали в сравнительном варианте: испытывали пробы на «чистом» цементе (ПЦ500–Д0), сопоставляя с испытаниями проб, содержащих добавку, с помощью методов детермического и рентгеноструктурного (рентгенофазового) анализа.

В результате сопоставления графиков детермического анализа не было выявлено суще-

ственных отличий. Вместе с тем установлено, что «пик» эндокринного эффекта при разложении кристаллогидратов в пробах с добавками смещается в сторону меньшей температуры (~ 720 °С–750 °С), чем у проб «чистого» цемента (~ 770 °С). Согласно данным [11] это может свидетельствовать о некотором снижении основности гидросиликатов и, соответственно, гидратов. Кроме этого, оценка геометрической площади «треугольников» полученных дериватограмм: без добавки площадь  $F_1 \sim 193 \text{ мм}^2$ ; с добавкой «0,5 % СН + 0,5 % А» –  $F_2 \sim 210 \text{ мм}^2$  и для «0,5 % СН + 0,25 % А» –  $F_3 \sim 227,5 \text{ мм}^2$  (для разновидностей микрокремнезема эти эксперименты находятся в стадии исполнения), показала ее рост под влиянием вещества добавки, что свидетельствует о возросшем количестве кристаллогидратных новообразований в соответствующих пробах цементного камня при прочих равных условиях (тесто нормальной густоты, одинаковые условия изготовления и твердения). Как следствие, формирование более плотной, мелкокристаллической структуры новообразований цементного камня закономерно сопровождается ростом его прочности [20–23 и др.].

Оценка материала проб-аналогов с помощью рентгенофазового анализа подтвердила данный вывод.

**Результаты рентгено-фазового анализа** (рис. 4) по оценке влияния веществ ускоряюще-уплотняющей добавки на продукты гидратации цемента, полученные на контрольных пробах «чистого» цементного камня (образец № 1), содержащего «0,5 % СН + 0,5 % А» от массы цемента (образец № 2), содержащего «0,5 % СН + 0,25 % А» от массы цемента (образец № 3), для возраста 1, 7 и 28 сут нормально-влажностного твердения подтвердили отсутствие новых фаз в камне с добавками.

Анализ данных, полученных по контрольной пробе и пробам с добавкой, включая дифрактограммы, приведенные на рисунке 4, показал, что в «привязке» ко времени твердения (1, 7 и 28 сут) во всех пробах закономерно уменьшаются в рентгеновских спектрах дифракционные отражения исходных клинкерных минералов – алита ( $C_3S$ ), белита ( $\beta$ - $C_2S$ ), трехкальциевого алюмината ( $C_3A$ ), четырехкальциевого алюмоферрита ( $C_4AF$ ), как следствие развития процесса взаимодействия цемента с водой. Одновременно нарастает интенсивность отражений портландита ( $Ca(OH)_2$ ) и этtringита ( $C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ ). В некоторой

степени особенностью дифрактограмм проб с добавкой (в большей мере при содержании «0,5 % СН + 0,25 % А») является возросшее отражение этtringита и появление наряду с тоберморитовым гелем  $C_2SH$  низкоосновного  $CSH(II)$  который отсутствует в пробе без добавки. При этом появление соединений гидросиликатов  $C_2SH$  и  $CSH(II)$  в пробах возраста 1-х суток характерно только для цементного камня с добавкой «0,5 % СН + 0,25 % А». Так, эти соединения в исходном цементном камне (без добавки) зафиксированы только в пробах 28-суточного возраста, а при содержании в добавке 0,5 % А – в пробах 7-суточного и 28-суточного возраста.

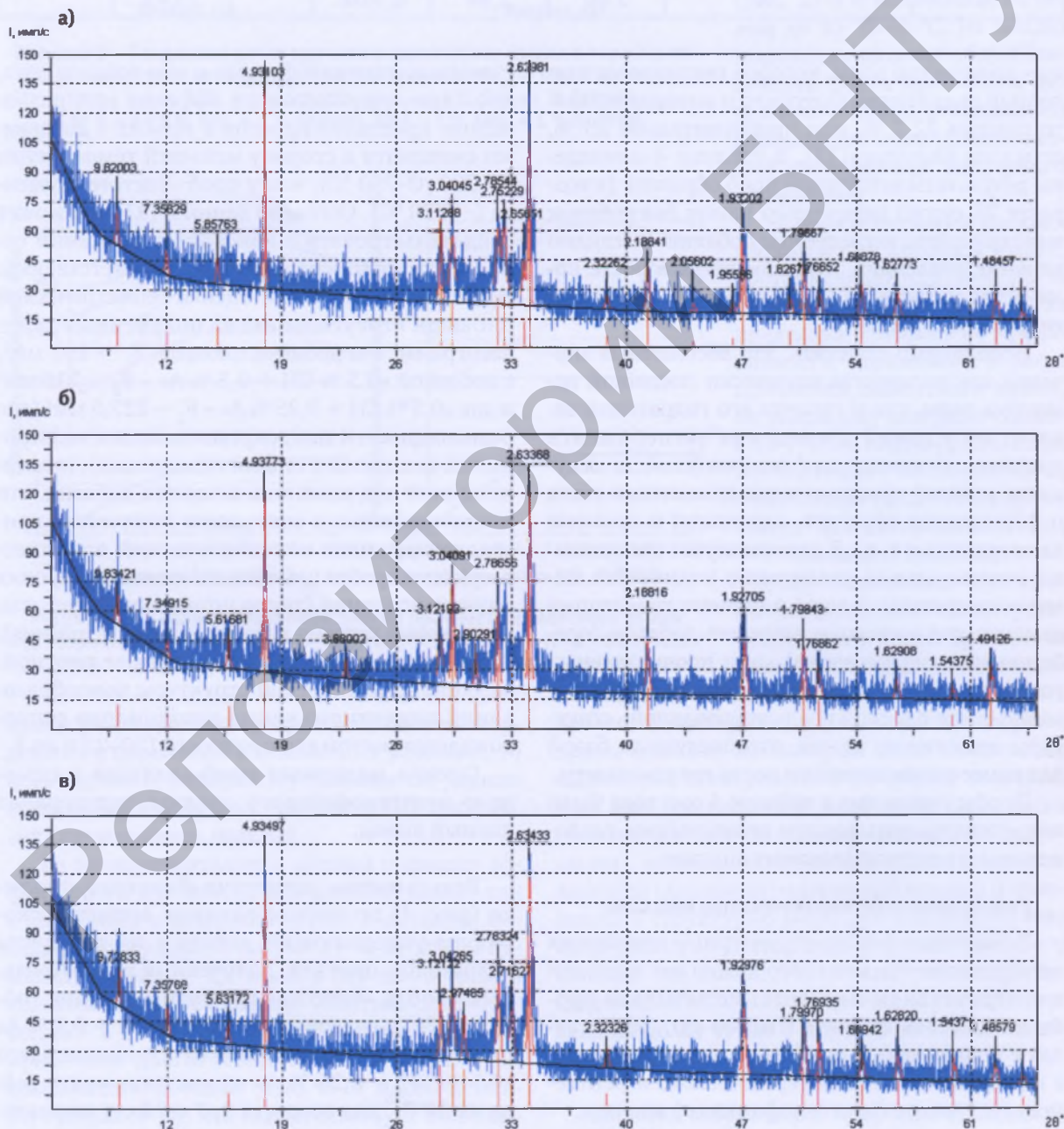


Рисунок 4 – Дифрактограммы проб № 1(а); № 2(б); № 3(в)

Таблица 5 – Составы бетона

Номер состава	Расход компонентов, кг						Хим. добавка, St2000, % от МЦ (С ~ 35 %)	ОК, см	
	Цемент	Песок	Кубовидный щебень		МК	УДМК			Вода
			2-4	4-6					
1	530	604	370	806	53	-	147	1,5	6
2	530	654	370	806	-	5,3	149	1,5	5

С учетом того обстоятельства, что низкоосновные соединения формируют и гидрокристаллы меньших размеров, что в каменных материалах сопровождается ростом их плотности и прочности, данные рентгенофазового анализа коррелируются с результатами испытаний образцов цементного камня на предел прочности при сжатии, приведенными на рисунке 1.

### Кинетика твердения тяжелого бетона

Результаты экспериментов с цементным камнем явились основанием для исследований по оценке эффективности добавок в конструкционном бетоне, полная информация о которых будет представлена в последующих публикациях. В настоящей статье частично приведены данные о кинетике твердения высокопрочного бетона (100–110 МПа), полученного на составах, приведенных в таблице 5, и характеризующегося наличием в составе «традиционного» микрокремнезема (МК) в дозировке 10 % от массы цемента (МЦ) и с заменой его на ультрадисперсный микрокремнезем (УДМК) в дозировке 1 % от МЦ.

Из данных рисунка 5 следует, что такая замена возможна, т. к. ультрадисперсный микрокремнезем практически обеспечивает равенство как темпа роста прочности бетона, так и ее значение в проектном возрасте, при дозировке, на порядок меньшей относительно МК.

Тем самым упрощается технология приготовления бетонной смеси для высокопрочного бетона, т. к. УДМК вводят в состав с водой затворения.

Обобщение результатов комплекса экспериментов с оценкой данных о кинетике твердения, количестве химически связываемой цементом воды (степени его гидратации), данных термического разложения проб и их рентгенофазового анализа позволяет сделать следующие выводы.

### Заключение

1. Результаты экспериментов подтвердили эффективность совместного воздействия на твердеющий цемент ускоряющего и уплотняющего структуру компонентов разрабатываемой добавки, которая проявляется в росте прочности до 60 %–80 % в 1–3 сут твердения и увеличении прочности на 5 %–10 % в проектном (28 сут) возрасте.

2. Установлено, что повышение темпа роста прочности цементного камня в присутствии добавки обеспечивается за счет повышения степени гидратации цемента, что (при прочих равных условиях) сопровождается увеличением количества новообразований и ростом плотности структуры цементного камня и, как следствие, бетона. При этом выявлено отсутствие изменений в морфологии образующихся про-

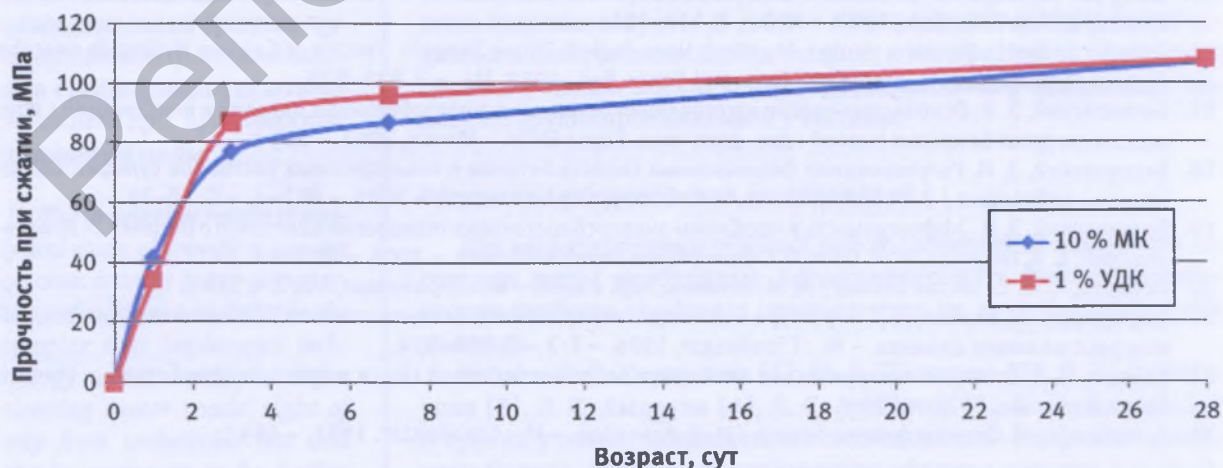


Рисунок 5 – Тенденция роста прочности бетона



дуктов гидратации цемента, что подтверждает взаимосвязь роста прочности с повышением плотности цементного камня.

3. Приведенные в статье данные и результаты сопоставления эффективности аморфного УДМК и «классического» микрокремнезема (дозированного в бетон в количестве 5 %–10 % и более от МЦ) явились основанием для проводимых в настоящее время исследований с бетоном прочностью не менее 100 МПа с целью совершенствования технологии его получения. В частности, обосновывается переход от использования МК к введению в бетон УДМК, что упрощает процесс его приготовления. Одновременно оцениваются структурно-морфологические изменения в цементном камне под влиянием вещества ультрадисперсного микрокремнезема,

обеспечивающего рост его прочности и влияние на другие свойства высокопрочного бетона. Информацию о результатах исследований авторы планируют представить в последующих публикациях.

4. Оба варианта исследуемых добавок – химическая и минеральная (в виде разновидностей аморфного кремнезема), целесообразно использовать в «дорожном» бетоне, т. к. их применение позволяет повысить его плотность и непроницаемость, что является основой повышения эксплуатационной надежности и долговечности конструкций дорожных покрытий. Также значителен обеспечиваемый ими эффект повышения темпа роста прочности бетона, а значит ведения бетонных работ и темпов строительства. ♣

### Список использованной литературы

1. Батяновский, Э. И. Влияние многократных механических нагрузок на свойства тяжелого бетона / Э. И. Батяновский, А. И. Бондарович, П. В. Рябчиков // Строительная наука и техника. – 2007. – № 1 (10). – С. 12–22.
2. Батяновский, Э. И. Морозо- и солестойкость бетона, подверженного механическим нагрузкам / Э. И. Батяновский, А. И. Бондарович // Вестник БНТУ. – 2008. – № 4. – С. 5–16.
3. Добавки для бетонов. Общие технические условия : СТБ 1112-98 / Минстройархитектуры. – Минск, 1998. – 23 с.
4. Применение добавок в бетоне. Пособие : П1-99 к СНиП 3.09.01-85 / Минстройархитектуры. – Минск, 2000. – 33 с.
5. Цемент. Ч. 1. Состав, технические требования и критерии соответствия общих цементов : СТБ ЕН 197-1-2007.
6. Кинд, В. В. Об ускорителях схватывания и твердения цемента / В. В. Кинд, Е. В. Лавринович, Р. Е. Литвинова // Цемент. – 1955. – № 3. – С. 11–13.
7. Солнцева, В. А. Добавки в бетон / В. А. Солнцева. – Лениздат, 1965. – 108 с.
8. Ратинов, В. Б. Химия в строительстве / В. Б. Ратинов, Ф. М. Иванов. – М. : Стройиздат, 1969. – 200 с.
9. Ратинов, В. Б. Добавки в бетон / В. Б. Ратинов, Т. И. Розенберг. – М. : Стройиздат, 1989. – 188 с.
10. Довнар, Н. И. Эффективность действия электролитов на физико-механические свойства цементного камня и бетона : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / Н. И. Довнар. – Минск, 1983. – 228 с.
11. Чистяков, В. В. Интенсификация твердения бетона / В. В. Чистяков, Ю. М. Дорошенко, И. Г. Грановский. – Киев : Стройиздат, 1988. – 118 с.
12. Батраков, В. Г. Модифицированные бетоны / В. Г. Батраков. – М. : Стройиздат, 1990. – 400 с.
13. Тейлор, Х. Химия цемента / Х. Тейлор; пер. с англ. – М. : Мир, 1996. – 500 с.
14. Scrivener, Karen L., Crumbie, Alison K., Pratt, P. L. A Study of the Interfacial Region between Cement Paste and Aggregate in Concrete // Bond. Cementitious Compos. : Symp., Boston, Mass., Dec. 2–4, 1987. – Pittsburgh (Pa), 1988. – P. 87–88.
15. Wang Jia. Investigation of structure and properties of the Interfacial Zone between Lime Aggregate and Cement Paste // J. Chin. Silic. Soc., 1987. – № 2. – P. 114–121.
16. Detwiler Rachel J., Monteiro Paulo J. M., Wenk Hans-Rudolf, Zhong Zengqiu. Texture of Calcium Hydroxide near the Cement Paste-Aggregate Interface // Cem. and Concr. Res., 1988, M5. – P. 823–829.
17. Батяновский, Э. И. Основы технологии изготовления бетонных и железобетонных изделий и конструкций с применением сухих бетонных смесей : дис. докт. техн. наук : БНТУ. – Минск, 2002. – 351 с.
18. Батяновский, Э. И. Регулирование формовочных свойств бетонов и инъекционных растворов сульфатосодержащими добавками / Э. И. Батяновский, Р. Ф. Осос // Строительство. – 2003. – № 3–4. – С. 10–21.
19. Батяновский, Э. И. Эффективность и проблемы энергосберегающих технологий цементного бетона / Э. И. Батяновский, Е. А. Иванова, Р. Ф. Осос // Строительная наука и техника. – 2006. – № 3. – С. 7–17.
20. Невиль, А. М. Свойства бетона / А. М. Невиль; пер. с англ. – М. : Стройиздат, 1972. – 344 с.
21. Коупленд, Л. Э., Вербек, Д. Д. Структура и свойства затвердевшего цементного теста // Шестой международный конгресс по химии цемента. – М. : Стройиздат, 1976. – Т. 2. – С. 258–274.
22. Блещик, Н. П. Структурно-механические свойства и реология бетонной смеси и пресс-вакуум-бетона. – Минск : Наука и техника, 1977. – 230 с.
23. Ахвердов, И. Н. Основы физики бетона / И. Н. Ахвердов. – М. : Стройиздат, 1981. – 464 с.

Статья поступила в редакцию 16.11.2014