УДК 691.333

## В. : . Imħ\, , аспирант; =. B. Ydhǫ⊥, доктор технических наук, профессор; :..:. EmrgbdhZ, магистрант; H. <. BajyghZ, магистрант Ижевский государственный технический университет

## ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ СПОСОБ ДИСПЕРГАЦИИ МНОГОСЛОЙНЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК ПРИ МОДИФИКАЦИИ МИНЕРАЛЬНЫХ ВЯЖУЩИХ

gZ hkgh⊥ ihjleZg^ dhfihabpbhggu\_ fZljbZeu Bkkemxlky fbgjZevgu\_ iehlghc kljmdlmju pfglZ fb gZghÐkijkguſÐ kbklfZfb < dZq<u>kl</u> fhbnb gZghljm**f**lb Graphistrength<sup>TM</sup> dhjihjZpbb Arkema, Ðkij gZghðkijkgufb b bikZ , fhbnbpbjhZggu\_ m¢jhgufb fhbnb pbjmxsbo hZhd bkihevahZebkv mejhgu\_ ₿jhZggu\_  $h^{h^{n}}$ ijb ihfhsb bîhbgZfbqkdhc mklZghdb k ijbfggbf ihjoghklgh -Zdlbguo . Hlf<u>q</u>Z<u>lk</u>y ijhqghklb <u>fe</u>dhajgbklh**h** ijbjhkl [hgZ gZ ba∯[ ∖ kjĝ<u>f</u> gZ 45 %, gZ \skl\ ijhqghklb gZ kZlb\_ bikZ − gZ 46 %. Ihurgb\_ kZlb – 35 %, ij<u>ê</u> ijhqghklb kyaZgh k bafg\_\_\_\_ gb<u>f</u> fhjnheh₿b djbklZeehþjZlguo ghhh**[**ZahZgbc , h<u>k</u>iqbZxsbo nhjfbjhZgb\_ fZehħdl ghc kljmdlmju fbgjZevghc fZljbpu ihurgghc iehlghklb ih ihjoghklb litto  $nZa \setminus khklZ$ dhfihabpbhgghl fZljbZeZ

: многослойные углеродные нанотрубки, поверхностно-активные вещества, минеральные матрицы, морфология

Стоимость композиционных материалов строительного назначения в основном определяется стоимостью вяжущего, в то же время применяемые вяжущие имеют огромный потенциал в повышении механических характеристик за счет направленного изменения структуры матрицы при модификации протяженными углеродными наносистемами. При разработке цементных бетонов с улучшенными механическими свойствами рационально использование в качестве модифицирующих добавок углеродных нанодисперсных систем [1, 2]. Установлено [3–5], что введение углеродных наносистем в состав минеральных вяжущих матриц приводит к ее структурированию с формированием кристаллогидратных новообразований повышенной плотности и прочности.

Основной целью работы является установление возможности модификации структуры плотных минеральных композиционных материалов нанодисперсной добавкой в виде многослойных углеродных нанотрубок Graphistrength<sup>TM</sup> корпорации Arkema и влияние их на структуру, минералогический состав и свойства модифицированной минеральной матрицы.

В технической литературе отмечается [6–7], что модификация углеродными нанотрубками приводит к улучшению механических показателей цементных бетонов на 15–20 %. В то же время имеются исследования, в которых показано, что минеральные матрицы способны повысить свою прочность до 2–3 раз [8] при введении в состав вяжущего углеродных наносистем в пределах 0,0024 % от массы вяжущего. В работах [9–10] отмечается, что углеродные нанотрубки способны изменять микроструктуру матрицы «за счет увеличения содержания гидросиликатов кальция повышенной плотности и снижения нанопористости».

<sup>©</sup> Пудов И. А., Яковлев Г. И., Лушникова А. А., Изряднова О. В., 2011

Основной причиной несоответствия результатов у разных исследователей является недостаточная степень диспергации углеродных нанотрубок, так как изначально, в силу повышенной активности при их синтезе, они сворачиваются в гранулы. Известна работа [11], в которой сообщается об использовании для диспергации углеродных нанотрубок в ультразвуковой технике в среде этанола. Китайские ученые Гэн Ин Ли и другие (Geng Ying Li, Pei Ming Wang, Xiaohua Zhao) [12] использовали обработку ультразвуком многослойных углеродных нанотрубок в растворе серной и азотной кислот (функционализация) для обеспечения лучшего сцепления с цементной матрицей. В работе [13] для достижения однородной дисперсии многослойных углеродных нанотрубок в водном растворе использовалась полиакриловая кислота при ультразвуковой обработке. Но практически во всех работах отмечалось незначительное увеличение механической прочности минеральной матрицы, модифицированной углеродными нанотрубками.

Основной причиной недостаточного влияния наносистем на структуру и свойства модифицируемой цементной матрицы является неполное распределение углеродных нанотрубок на отдельные частицы в водной дисперсионной среде. При синтезе они объединяются в клубки или гранулы, размеры которых могут достигать 400–900 мкм [8], обладая при этом высокой поверхностной энергией. Для их распределения требуются специальные технологии диспергации. Главная задача при работе с углеродными нанотрубками – дезинтеграция пучков и крупных агломератов, возникающих при синтезе, и обеспечение их стабилизации в водной среде и устойчивость дисперсии нанотрубок при хранении.

Для стабилизации суспензий с наноструктурами используются различные поверхностно-активные вещества (сурфактанты) [14], молекулы которого адсорбируются на межфазной границе твердое тело – жидкость, окружая отдельные нанотрубки и их пучки. При адсорбции поверхностно-активных веществ (ПАВ) на поверхности нанодисперсных частиц поверхностное натяжение уменьшается. Чем плотнее упаковка ПАВ на поверхности, тем больше снижение поверхностного натяжения [15–16].

Диспергации подвергались многослойные углеродные нанотрубки Graphistrength<sup>TM</sup> C-100 корпорации Arkema, которые состоят из нескольких слоев нанотрубок с внешним диаметром от 10 до 15 нм, длиной от 1 до 15 мкм и средней плотностью 50–150 кг/м<sup>3</sup>, а также многослойные углеродные нанотрубки Graphistrength<sup>TM</sup> Master Batch CW 2-45, которые имеют гранулированный вид. Вышеперечисленные типы углеродных нанотрубок диспергировались также в сочетании с небольшим количеством микрокремнезема MK-85 (ООО «Торгово-промышленная компания "ИМПЕТ"», Липецк).

Благодаря диспергации углеродных наносистем в гидродинамической установке были получены углеродные наносистемы в первом и во втором случае с эффективным диаметром Cl 68,3 нм с наименьшим значением диаметра C73,3 нм.

В суспензиях неизбежны процессы седиментации из-за разности плотностей дисперсионной среды и дисперсной фазы. Со временем частицы твердой фазы агрегируют и оседают. После выдержки суспензии в течение тридцати дней в результате коагуляции эффективный диаметр наносистем составил 403,7 нм. Седиментация является обратимым процессом, и суспензию можно довольно легко редиспергировать повторной обработкой в диспергаторе.

Изготовление образцов для механических испытаний производили по стандартной методике. Применялись образцы-балочки размером 40 × 40 × 160 мм. Были

исследованы свойства мелкозернистого цементного бетона на портландцементе марки ПЦ400-Д0 и кварцевом песке с модулем крупности  $M_{\kappa} = 3,08$  и гипсового вяжущего с ООО «Аракчинский гипс» (Татарстан) марки Г-3.

В качестве сурфактантов при диспергации углеродных нанотрубок были использованы карбоксилметилцеллюлоза в сочетании со смесью солей полиметиленнафталинсульфокислот. Натриевая карбоксиметилцеллюлоза является аниоактивным полимером, продукт взаимодействия целлюлозы с монохлоруксусной кислотой.

Микроструктура и микроанализ цементной матрицы бетона исследовались на растровых электронных микроскопах QUANTA 200 производства FEI Company, XL30 ESEM FEG фирмы Philips и JSM JC 25S фирмы JEOL Ltd.

Анализ размеров наносистем в суспензиях проводился на приборе 90Plus/BI-MAS.

Полное тепловыделение и скорость изменения тепловыделения исследовались в термосном калориметре.

Оптимальное содержание углеродных нанотрубок при определении прочности образцов-балочек на растяжение при изгибе составило 0,006 % от массы цемента (рис. 1, Z). Прочность на изгиб достигла 3,35 МПа (у контрольного образца – 2,63 МПа), что дает увеличение прочности на 27,38 %. Оптимальное содержание нанотрубок при определении прочности балочек при сжатии составило 0,006 % от массы цемента (рис. 1, [). При этом прочность на сжатие достигла 36,33 МПа (у контрольного образца – 26,74 МПа), что составляет прирост прочности на 36,8 %.

Также в ходе эксперимента изучалась возможность сочетания многослойных углеродных нанотрубок с микрокремнеземом и их совместное влияние на механические свойства минеральных матриц. В табл. 1 приведены результаты испытаний пределов прочности на сжатие и на изгиб мелкозернистого бетона с применением многослойных углеродных нанотрубок в сочетании с микрокремнеземом в расчете 0,012 % по массе вяжущего (рис. 5, \).

LZ[ebpZ1.

№ п/п образ- ца	Тип угле- родных нанотрубок (УНТ)	Количество УНТ, % от массы вя- жущего	Количество микро- кремнезема, % от массы вяжущего	<i>R</i> <sub>сж</sub> , МПа	<i>R</i> изг, МПа	Прирост <i>R</i> <sub>сж</sub> от контрол. обр. 1	Прирост <i>R</i> <sub>изг</sub> от контрол. обр. 1
1	_	-	-	26,74	2,63	-	-
2	C-100	0,006	-	36,60	3,35	36,80 %	27,38 %
3	C-100	0,006	0,012	35,71	3,84	33,50 %	46,00 %
4	CW 2-45	0,010	0,012	36,17	4,38	35,26 %	66,54 %

Исследование микроструктуры цементного бетона показало, что введение углеродных нанотрубок приводит к кардинальному изменению морфологии кристаллогидратных новообразований в цементной матрице (рис. 2).

Для проведения экспериментов на гипсовом вяжущем также изготавливались образцы размером  $40 \times 40 \times 160$  мм при В/Г = 0,6. Для более равномерного распределения в массе гипсового раствора нанотрубки вводились в композицию в виде водной дисперсии. Там же растворялась известь. Испытания на прочность производились по истечении семи суток. Ниже (табл. 2) приведены результаты испытаний на прочность гипсовых образцов.



Jbk. 1. Влияние многослойных углеродных нанотрубок GraphistrengthTM, при использовании в качестве ПАВ СП-1: Z – на предел прочности на сжатие; [ – на предел прочности на изгиб

LZ	[eb	bΖ	2.

№ п/п образ- ца	Тип УНТ	Количество УНТ, % от мас- сы вяжущего	Количество мик- рокремнезема, % от массы вяжуще- го	Количество извести от массы вяжу- щего, %	<i>R</i> <sub>сж</sub> , МПа	Прирост <i>R<sub>сж</sub></i> от контрол. обр. 1		
1	-	-	-	—	4,9	-		
2	-	-	-	1	5,5	12 %		
3	C-100	0.006	0.012	1	7.2	46 %		

Введение дисперсии углеродных нанотрубок приводит к структурированию минеральной матрицы с образованием плотной бездефектной оболочки по поверхности твердых фаз, в частности включая частицы цемента и заполнителя (рис. 2, [), обеспечивающей лучшее сцепление с их поверхностью. При этом посредством контактных взаимодействий структурированных граничных слоев в структуре модифицированной минеральной матрицы формируются пространственные каркасные ячейки. Большое число точечных контактов обеспечивает формирование предельно наполненной системы, в которой коллективный переход к сцеплению в ближнем порядке вызывает резкое упрочнение структуры матрицы за счет образования пространственной упаковки.

Анализ микроструктуры мелкозернистого бетона, при больших увеличениях, показал, что в контактной зоне цементной матрицы без модифицирующих углеродных нанотрубок наблюдаются кристаллы гидросиликатов кальция рыхлой структуры, а контактная зона имеет дефекты структуры (рис. 3, Z). Структурирование цементной матрицы после введения дисперсии углеродных нанотрубок приводит к формированию плотной оболочки толщиной от 1 до 5 мкм с морфологией кристаллогидратов, ориентированных вертикально к поверхности твердой фазы (рис. 3, [).



ſ

Ζ



Jbk. 3. Морфология новообразований в межфазном слое на границе заполнителя: Z-рыхлая цементная матрица без углеродных нанотрубок; [ – модифицированная цементная матрица

Проведенный микроанализ элементного состава структурированного слоя цементной матрицы (рис. 2, [) на поверхности твердой фазы показал изменение соотношения между содержанием атомов кремния и кальция по толщине слоя (рис. 4). Так, на границе между твердой фазой и цементной матрицей отмечено существенное повышение интенсивности пиков, соответствующих атомам кальция, что позволяет говорить о повышении основности гидросиликатов кальция (рис. 4, \). По мере отдаления от граничного слоя нарастает интенсивность пиков, соответствующих атомам кремния (рис. 4, Z, [).

Гидросиликаты кальция отмечены в зарастающих усадочных трещинах, рост которых тормозится армирующим эффектом углеродных нанотрубок (рис. 5). Анализ диаметра нанотрубок явно превышает исходный диметр нанотрубок, который с учетом наличия на поверхности нанотрубок ПАВ составляет 40–50 нм. На рис. 5, [ диаметр нанотрубок составляет 300–400 нм, что свидетельствует о покрытии нанотрубок слоем гидросиликатов кальция, что также подтверждено работой [15]. При этом в статье отмечается, что в силу высокой активности зарастание поверхности наступает в первые часы гидратации портландцемента. По всей видимости, это связано с тем, что введение дисперсий нанотрубок интенсифицирует процессы гидратации портландцемента, что подтверждено исследованиями в термосном калориметре.



Jbk. 4. Микроанализ структурированного слоя гидросиликатов кальция: Z – на внешней оболочке слоя; [ – внутри оболочки; \ – на границе между твердой фазой и цементной матрицей



Jbk. 5. Зарастающая трещина в структуре цементной матрицы, модифицированной углеродными нанотрубками (Z), фрагмент трещины с нанотрубками, покрытыми гидросиликатами кальция ([), микроструктура цементного камня, модифицированного углеродными нанотрубками и микрокремнеземом (\)

Для изучения кинетики гидратации цемента в присутствии многослойных углеродных нанотрубок было проведено исследование полного тепловыделения и скорости изменения тепловыделения в термосном калориметре (рис. 6). Проведенные исследования показали, что введение многослойных углеродных нанотрубок вызывает повышение скорости протекания гидратационных процессов, выражающееся в увеличении скорости тепловыделения при образовании кристаллогидратных новообразований на этапе формирования первоначально каркаса (рис. 6, Z). В процессе формирования структурированных слоев повышенной плотности на поверхности цементных частиц интенсивность гидратации цемента уменьшается, соответственно, снижаются экзотермические процессы при твердении цементной матрицы, что наглядно отражается на интегральных кривых тепловыделения цементного камня, модифицированного углеродными нанотрубками (рис. 6, [).

При этом отмечается, что дополнительная обработка дисперсий с нанотрубками перед введением их в бетонную смесь позволяет ускорить структурообразование, отражающееся на форме кривых тепловыделения. Микроанализ элементного состава подтверждает снижение диффузии ионов кальция через структурированную оболочку, что приводит к формированию в контактной зоне на поверхности частиц цемента гидросиликатов кальция повышенной основности.



Jbk. 6. Влияние углеродных нанотрубок на скорость тепловыделения (Z) и общее тепловыделение ([) при гидратации цемента

Таким образом, результаты исследования показывают, что в процессе хранения суспензии углеродные нанотрубки склонны к коагуляции с образованием агломератов с размерами в несколько микрометров. Следовательно, для более эффективного обеспечения равномерного распределения нанотрубок в минеральных вяжущих матрицах необходимо применение свежеприготовленных суспензий.

Введение дисперсий углеродных нанотрубок в минеральные композиционные материалы плотной структуры позволяет улучшать их механические характеристики. При этом существенное влияние на механические характеристики оказывает вид сурфактанта, используемого при диспергации углеродных нанотрубок.

Введение сочетания многослойных углеродных нанотрубок и микрокремнезема (0,012 % по массе минерального вяжущего) в цементные и гипсовые вяжущие способствует значительному увеличению прочности на изгиб (до 66,5 %).

Анализ микроструктуры новообразований в цементной матрице показывает, что модификация цементных бетонов многослойными углеродными нанотрубками меняет морфологию кристаллогидратов с формированием контактных зон повышенной плотности по поверхности твердой фазы. Такая структура обеспечивает повышение прочности цементного бетона и морозостойкости, что подтверждается результатами физико-механических испытаний бетона, модифицированного многослойными углеродными нанотрубками.

1. A Review of the Possible Applications of Nanotechnology in Refractory Concrete / V. Antonovič, I. Pundienė, R. Stonys et al. // J. of Civil Engineering a. Management. – 2010. – Vol. 16, Iss. 4. – Pp. 595-602.

2. Получение углеродных металлсодержащих наноструктур для модификации строительных композиций / А. М. Липанов, В. В. Тринеева, В. И. Кодолов и др. // Альтернатив. энергетика и экология. – 2008. – № 8. – С. 82–85.

3. Nanobewehrung von Schaumbeton / G. Yakovlev, Ja. Keriene, T. Plechanova et al. // Betonund Stahlbetonbau: die Ztchr. für Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonkonstruktionen im gesamten Bauwesen. – 2007. – Vol. 102, Iss. 2. – Pp. 120-124. 4. Газобетон на основе фторангидрита, модифицированный углеродными наноструктурами / Г. И. Яковлев, Г. Н. Первушин, В. А. Крутиков и др. // Строит. материалы. – 2008. – № 3. – С. 70–72.

5. Модификация поризованных цементных матриц углеродными нанотрубками / Г. И. Яковлев, Г. Н. Первушин, А. Ф. Бурьянов и др. // Строит. материалы. – 2009. – № 3. – С. 99–102.

6. Konsta-Gdoutos, M. S., Metaxa, Z. S., Shah, S. P. Highly Dispersed Carbon Nanotube Reinforced Cement Based Materials // Cement and Concrete Research. – 2010. – Vol. 40. – Pp. 1052-1059. URL: http://konsta.civil.duth.gr/images/stories/ccr 2010.pdf (дата обращения: 26.04.2011).

7. Li, G. Y., Wang, P. M., Zhao, X. Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes // Carbon. – May 2005. – Vol. 43, Iss. 6. – Pp. 1239-1245.

8. Структурирование ангидритовой матрицы нанодисперсными модифицирующими добавками / И. С. Маева, Г. И. Яковлев, Г. Н. Первушин и др. // Строит. материалы. – 2009. – № 6. – С. 4–5.

9. Nanoscale Modification of Cementitious Materials / S. P. Shah, M. S. Konsta-Gdoutos, Z. S. Metaxa et al. // Nanotechnology in construction 3 : Proc. of the Third Intern. Symp. on Nanotechnology in construction / ed. by Z. Bittnar, P. J. M. Bartos, J. Němeček et al. – Springer, 2009. – Pp. 125-130. URL: http://konsta.civil.duth.gr/images/stories/nicom3.pdf (дата обращения: 26.04.2011).

10. Konsta-Gdoutos, M. S., Metaxa, Z. S., Shah, S. P. Nanoimaging of highly dispersed carbon nanotube reinforced cement based materials // Seventh International RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concrete: Design and Applications, Chennai, India / ed. by R. Gettu. – RILEM Publications S.A.R.L. 2008. – Pp.125-131.

11. Makar, J. M, Beaudoin, J. J. Carbon nanotubes and their applications in the construction industry // Proc. of the 1st Intern. Symp. on Nanotechnology in Construction, June 23-25, 2003, Paisley, Scotland. – Pp. 331-341. URL: http://www.nrc-cnrc.gc.ca/obj/irc/doc/pubs/nrcc46618/ nrcc46618.pdf (дата обращения: 26.04.2011).

12. Li, G. Y., Wang, P. M., Zhao, X. Pressure-sensitive and microstructure of carbon nanotube reinforced cement composites // Cement and Concrete Composites. – May 2007. – Vol. 29, Iss. 5. – Pp. 377-382.

13. *Cwirzen, A., Habermehl-Chirzen, K., Penttala, V.* Surface decoration of carbon nanotubes and mechanical properties of cement/carbon nanotube composites // Advances in cement research. – 2008. – Vol. 20, nr 2. – Pp. 65-73.

14. Поверхностно-активные вещества и полимеры в водных растворах / К. Холмберг, Б. Йенссон, Б. Кронберг и др. ; пер. с англ. – М. : БИНОМ. Лаб. знаний, 2007. – 528 с.

15. *Sakulich, A. R., Li, V. S.* Nanoscale characterization of engineered cementitious composites (ECC) // Cement and Concrete Research. – Febr. 2011. – Vol. 41, Iss. 2. – Pp. 169-175.

16. *Rasaiah, J. C.* Statistical mechanics of strongly interacting systems: liquids and solids // Encyclopedia of Chemical Physics and Physical Chemistry. Vol. 1 : Fundamentals / ed. by J. H. Moore a. N. D. Spencer. – Taylor & Francis 2001. – Pp. 379-476. URL: http://hotfile.com/dl/23269970/028c1fe/0750303131\_EChPPChemistry.rar.html (дата обращения: 26.04.2011).

\*\*\*

I. A. Pudov, Postgraduate Student, Izhevsk State Technical University

G. I. Yakovlev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Izhevsk State Technical University

A. A. Lushnikova, Magistrand, Izhevsk State Technical University

H. V. Izryadnova, Magistrand, Izhevsk State Technical University

Hydrodinamic Way of Dispergation of Multilayer Carbon Nanotubes at Modification of Mineral Binders

The possibility of using carbon nanostructures to improve the cement and gypsum composition and improve its physical and mechanical properties was studied. Graphistrength<sup>TM</sup> nanotubes produced by Arkema corporation were used as modifying agents. The nanotubes were dispersed in water on a hydrodynamic installation with use of surface-active reagents. It was noted that the flexing strength of concrete increased by 45 %, compression strength – 35 %, ultimate compressive strength of gypsum - 46 %.

Keywords: multilayer carbon nanotube, surfactant, mineral matrix, morphology

Получено: 13.04.11

УДК 691.335

К. <. Киqт [] , аспирант; В. : . Imf\ , аспирант; =. B. Ydhe\_\_\_\_, доктор технических наук, профессор; Ижевский государственный технический университет, Россия F. KZL\_\_\_, ассистент Египетско-российский университет, Каир, Египет

## ПРИМЕНЕНИЕ НАНОДОБАВОК ТЕХНОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ В КАЧЕСТВЕ МОДИФИКАТОРОВ ДЛЯ АНГИДРИТОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ

, fhðnbpbjhZgghlh JZkkfZljbZ lky jZajZħldZ dhfihabpbhgghl Zglfblhhl **v**msh gZħZdZfb hZhd ghkljmdlmjgufb iihbkoh&bv . < dZaklbkihevahZebkv ihihr loghtght db ZevZgbqkdbo reZfh∖ , khfZsb\_ qZklbpu gZghfljhuo jZafjh\ . gZeba obfbqkdhh khklZZ ihjhrdh∖ ihahebe k<u>ê</u>Zlv uh^ h p<u>ek</u>hh**j**Zaghklb bo ijbfggby fhðnbdZ b khckl ∖ dZq<u>k</u>l∖ b ljgby gZghðk lhjh\ bjZlZpbb êv Zgþfblhhh ∖yms<u>h</u> ihurgby Zdlbghklb ēч ihjhrdb h[Z[hld\_ ijb l<u>fij</u>ZlmjZo  $800 \div 1\ 000\ ^{o}K. < oh_{-}^{\wedge} bk$ ih**%Z**ebkv ljfbq<u>k</u>dhc ijkgu ke<u>ħ</u>Zgbc ueh mklZghegh ihehblevgh. ebygb\_ gZghðkijkghlþ reZfZ gZ kljmdlmjhh[ZahZ Zgþjblhhc gb\_ b nbabdh-foZgbqkdb\_ oZjZdljbklbdb fZljbpu Hiilegh hilbfZevgh\_ fhonbdZlhjZ  $\ \ khklZ_{\perp} \ dhfihabpbhgghl Zgl/blhhl$ khîZgb gZghbkijkghh **v**msh

: композиционные ангидритовые вяжущие, модификация, нанодисперсные добавки, степень активности, гидратация

Расширение номенклатуры строительных материалов за счет производства и применения бесклинкерных вяжущих на основе природного ангидрита целесообразно в силу ряда причин: наличие мощной сырьевой базы; низкая себестоимость сырья и невысокие затраты на его технологические переделы; экологичность материалов и изделий, а также их достаточная долговечность в различных температурно-влажностных условиях. В то же время создание конкурентоспособных материалов строительного назначения с улучшенными физико-механическими характеристиками возможно в случае применения композиционных вяжущих, свойства которых заранее можно прогнозировать.

Вяжущие на основе ангидрита достаточно известны в зарубежной практике, где накоплен опыт их производства. В России выпуск материалов, изделий, сухих строительных смесей сдерживается по причине недостатка целенаправленных исследований в области получения и применения композиционных ангидритовых вяжущих [1]. Одним из путей получения ангидритового вяжущего является использование молотого природного ангидрита с добавлением для интенсификации процессов гидратации и твердения щелочных и сульфатных активаторов [2, 4]. Для

<sup>©</sup> Сычугов С. В., Пудов И. А., Яковлев Г. И., Сабер М., 2011