

СИНТЕЗ НАНОДИСПЕРСНОГО МОДИФИКАТОРА НА ОСНОВЕ SiO_2 ДЛЯ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ

© 2014 О. В. Артамонова¹, О. Р. Сергуткина¹, И. В. Останкова², М. А. Шведова¹

¹Воронежский государственный архитектурно-строительный университет, ул. 20-летия Октября, 84, 394006 Воронеж, Россия

²Воронежский государственный университет, Университетская пл., 1, 394006 Воронеж, Россия
e-mail: ol_artam@rambler.ru

Поступила в редакцию 13.12.2013 г.

Аннотация. Гидролизом и последующей конденсацией водного раствора кристаллогидрата силиката натрия синтезирована нанодисперсная добавка на основе SiO_2 для модифицирования структуры и свойств цементного камня. Методами физико-химического анализа проведена идентификация продуктов синтеза.

Установлен оптимальный состав прекурсоров и параметры синтеза наномодификаторов; предложена эволюционная модель образования частиц гидратированных оксидов в данной системе.

Ключевые слова: синтез, система $\text{SiO}_2\text{--H}_2\text{O}$, нанодисперсная добавка, модификатор, цементный камень.

ВВЕДЕНИЕ

Цементные композиты представляют собой многокомпонентные, многофазные системы сложной структуры. Одним из современных направлений получения высокопрочных бетонов является модифицирование их структуры наночастицами (НЧ) различного состава и морфологии [1, 2]. Нанодисперсные добавки, как правило, не существуют в готовом виде, а должны быть синтезированы и обладать комплексом свойств, важнейшие из которых: эффективность применения, устойчивость во времени, сходная с синтезируемым камнем кристаллохимическая структура, близость размера её частиц к таковым для частиц цементного геля и гелевых пор, и т. д. Эффективность применения оценивается по улучшению механических и физико-химических свойств модифицируемых материалов; устойчивость во времени необходима в связи с особенностями технологии производства цементных композитов.

Выбор химической природы объекта исследований основан на химическом составе основных клинкерных минералов портландцемента: $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, $\beta\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$, $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ [3], которые после затворения исходной смеси водой в результате процессов частичного гидролиза и гидратации переходят в соответствующие гидратные

формы. Технические характеристики затвердевшего цементного камня определяются во многом состоянием, структурой и свойствами образовавшихся гидросиликатов кальция, которые являются наноструктурированными системами [4]. Особое внимание, уделяемое исследователями модификаторам структуры цементного камня на основе $\text{SiO}_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$, объясняется тем, что синтезируемые добавки, имея сходную с гидросиликатами кальция кристаллохимическую природу, могут являться центрами кристаллизации гидросиликатных фаз цементного камня, а также встраиваться в структуру цементного камня [5].

В качестве модификатора структуры цементного камня нанодисперсные частицы целесообразно использовать до их заметной агломерации, когда размеры не превышают нескольких нанометров, что близко к диаметру частиц цементного геля и гелевым порам. В работе [6] сформулированы основные требования (структурообразующий, технологический, экономический и экологический аспекты) к НЧ, как модификаторам структуры цементного камня.

Применение НЧ на основе кремнезема может быть технологически затруднено, так как необходимо обеспечить равномерное распределение нанодисперсного модификатора по объему материала.

ла. Задача крайне сложная, поскольку наномодификаторы вводятся в количестве десятых и сотых долей процента по отношению к массе цемента. Данная проблема может быть решена в том случае, если НЧ получают в водной среде, которая является водой затворения. Синтез золей кремниевой кислоты чаще всего проводится добавлением кислот к раствору силиката или пропуская раствор солей через ионообменную колонку [7]. В обоих случаях продукт получается в виде водной дисперсии, которая, по нашему мнению [8], может быть определённой частью воды затворения (с учётом рассчитанной массовой доли SiO₂ от массы цемента) при изготовлении строительных материалов на цементных системах.

Анализ периодической литературы, посвящённой практике наномодифицирования цементных систем [9—13], показывает, что авторы не приводят сведений о способе ввода НЧ в твердеющую смесь, за исключением работы [9], в которой агломераты НЧ, полученные в виде аморфного порошка SiO₂ с размерами частиц 22—23 нм, распределяли ультразвуковым диспергатором в воде затворения.

Цель данного исследования состоит в разработке методики синтеза устойчивых и оптимальных по физико-химическим свойствам модификаторов структуры цементного камня с размерами частиц в 5—10 нм, а также в предложении эволюционной модели образования частиц в системе SiO₂–H₂O.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исходными компонентами для получения НЧ SiO₂ являлись кристаллогидраты силиката натрия (Na₂SiO₃·9H₂O и Na₂SiO₃·5H₂O) ХЧ, ГОСТ 4239-66 и ГОСТ 50418-992; соляная кислота (HCl) ХЧ, ГОСТ 3118; уксусная (CH₃COOH) и серная (H₂SO₄) кислоты ХЧ, ТУ6-09-2540-72; дистиллированная вода, ГОСТ 6709.

Между идеей золь-гель синтеза НЧ SiO₂ методом добавления кислот к раствору растворимого силиката [7] и реальной методикой лежит большое число экспериментальных исследований по установлению оптимальных параметров синтеза. Скорость роста и морфология частиц наноразмерного кремнезема, полученного золь-гель методом, исследована при варьировании следующих параметров: состава и концентрации прекурсоров, pH среды, способа и времени дозирования прекурсоров.

Частично результаты данных исследований представлены в табл. 1. С учётом полученных данных исследования были расширены в направлении изменения природы аниона кислоты (табл. 2).

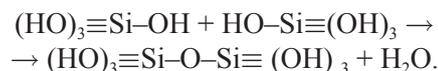
Процесс образования золей и агломерацию наночастиц системы SiO₂–H₂O исследовали физико-химическими методами анализа:

— установление качественного и количественного состава системы — рентгенофазовый анализ (РФА), (дифрактометр ARL X'TRA); рентгенофлуоресцентный анализ (VRA-30, Carl Zeiss Jena); дифференциально-термический анализ (дериватограф «Paulik-Paulik 3M»); ИК-спектроскопия (ИК-спектрометр VERTEX 70, образцы прессовали в таблетки KBr с ω = 5 %);

— определение формы и размера частиц, процессов агломерации частиц в полученных системах — методами лазерной дифракции (лазерный анализатор размера частиц «Анализетте 22»); просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), (Transmission Electron Microscope H — 9500 с 75 кВ); динамического светорассеяния (спектрометр Photocor Complex).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В работе [7] авторы рассматривают основную суть процессов образования золей кремниевой кислоты следующим образом. Монокремниевая кислота слабая и может существовать лишь в разбавленных растворах при концентрациях <0.011 г/л в области pH от 1.0 до 8.0. Выделяющаяся в результате реакции гидролиза силикатов кремниевая кислота содержит в своем составе силанольные группы (≡Si–OH), способные к реакции поликонденсации с образованием силоксановых связей (≡Si–O–Si≡). В процессе поликонденсации образуются заподимеризованные кремниевые кислоты:



Мономолекулярные кремниевые кислоты неустойчивы и обычно конденсируются в полимерные состава xSiO₂·yH₂O. Поликремниевые кислоты в воде практически нерастворимы, легко образуют коллоидные растворы — золи.

Установлено существование различных стадий процесса поликонденсации в водных растворах кремниевых кислот, включающих гомогенную поликонденсацию, флуктуационное образование зародышей новой фазы, последующий рост частиц.

Из вышесказанного следует, что методика синтеза должна создавать первоначальные условия для контроля гидролиза силикатов, это, прежде всего, pH среды, который определяется действием следу-

Таблица 1. Влияние состава кристаллогидрата силиката натрия и концентрации водных растворов прекурсоров на размер и морфологию нанодисперсных частиц кремнезёма

Номер системы	Прекурсоры		Нанодисперсные частицы (данные ПЭМ)			
	формулы	концентрация, моль/л	иследование ПЭМ, сутки	средний размер НЧ, нм	особенности морфологии и кинетики агломерации	
1	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$, HCl	0.10 0.01	33	~ 50	Крупные агломераты. [Первые признаки агломерации наблюдали через 20 дней (опалесценция)]	
2	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$, HCl	0.10 0.01	83	~ 50	Крупные агломераты. [Через 16 дней ПЭМ частицы не обнаружены; 40 дней начало агломерации]	
3	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$, HCl	0.10 0.10	83	$(10 \div 30) \times$ $\times (70 \div 90)$	Волокнистые кристаллы. [Через 16 дней ПЭМ частицы не обнаружены; 40 дней начало агломерации]	
4	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9 \text{H}_2\text{O}$, HCl	1.00 0.01	14	30 ÷ 50	Небольшие агломераты. [Через 12 дней первые признаки агломерации (опалесценция)]	
5	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$, HCl	1.00 0.01	14	–	Через 30 дней раствор прозрачный	
6	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9 \text{H}_2\text{O}$, HCl	1.00 0.10	14	15 ÷ 20	Агломераты цепочечной структуры. [Через 14 дней первые признаки агломерации (опалесценция). Затем агломерация увеличивалась]	
7	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$, HCl	1.00 0.10	14	2 ÷ 5	Отдельные частицы и небольшие агломераты. [Через 16 дней заметна очень слабая опалесценция]	
7	то же	то же	21	20 ÷ 50	Крупные агломераты. [Признаки явной агломерации, интенсивная опалесценция]	
7	то же	то же	30	50 ÷ 70	Сростки агломератов. [Наблюдается образование геля]	

ющих факторов: методом дозирования, т. е. порядком ввода прекурсоров (прямой или обратный), мольным соотношением (SiO₃²⁻): (H⁺), зависящим от концентрации и объема растворов прекурсоров, скорость дозирования силиката (данный фактор может оказывать влияние на скорость формирования первоначальных мицелл).

В табл. 1 приведены результаты исследования семи систем. При постоянном во всех системах объеме растворов прекурсоров скорость дозирования составляла 1 мл/мин. Процесс созревания золь изучали методом визуального наблюдения и описания наблюдаемых изменений, а также проводили исследования полученных композиций методами ПЭМ и РФА.

Установлено, что первоначальный размер частиц кремнезёма зависит от состава кристаллогидрата силиката натрия, из менее гидратированной формы Na₂SiO₃·5H₂O образуются НЧ меньшего размера (5—10 нм, система 7), чем из прекурсора Na₂SiO₃·9H₂O (системы 6 табл. 1 и 8 табл. 2). Полученные из более гидратированного прекурсора частицы в результате последующей агломерации образует агрегаты цепочечной структуры (20—50 нм).

Метод прямого дозирования (система 1), по видимому, создаёт условия для торможения процессов образования НЧ SiO₂, при этом увеличива-

ется индукционный период образования НЧ, а затем происходит их быстрая агломерация. Большой избыток силиката (системы 4 и 5), а также его недостаток (система 3) приводит к образованию НЧ большего размера или к отсутствию их образования. Уменьшение концентрации раствора силиката при сохранении мольного соотношения (SiO₃²⁻):(H⁺) в случае использования серной кислоты (система 9 табл. 2) приводит к значительной агломерации уже на третьи сутки. Можно предположить, что соотношение (SiO₃²⁻):(H⁺) = 1.0 соответствует гидролизу силикат-иона до гидросиликат-иона: SiO₃²⁻ + H₂O ⇌ HSiO₃⁻ + OH⁻. Образовавшийся ион OH⁻ нейтрализуется эквивалентным количеством ионов H⁺.

Итак, для синтеза утойчивых в течение 7 суток наночастиц требуемого размера в 5—10 нм следует соблюдать следующие параметры синтеза: использовать прекурсор Na₂SiO₃·5H₂O, синтез проводить методом обратного дозирования со скоростью около 1 мл/мин с постоянным перемешиванием раствора при мольном соотношении (SiO₃²⁻):(H⁺)=1.0, что соответствует системам 7 и 10 (табл. 2).

Из вышеуказанных публикаций, посвящённых практике наномодифицирования цементных систем [9—12], в работе [10] «наномодифицирующая добавка в бетон получена путём титрования слабо-разбавленного раствора силиката натрия уксусной

Таблица 2. Параметры золь-гель процессов синтеза нанодисперсных модификаторов

Номер системы	Прекурсоры		Параметры синтеза				Начало агломерации, сутки
	состав водных растворов	концентрация, моль/л	рН системы по окончании дозирования	рН системы через 7 суток	метод дозирования прекурсоров	средний размер частиц через сутки, нм	
7	Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂ O	1.0	9	10	обратный	2—5	7
	HCl	0.1					
8	Na ₂ SiO ₃ ·9H ₂ O	1.0	10	12	обратный	15—20	5
	HCl	0.1					
9	Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂ O	0.1	12	13	обратный	~ 100	3
	H ₂ SO ₄	0.1					
10	Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂ O	1.0	8	9	обратный	~ 5	7

кислотой до pH 4.3. Средний размер частиц наноразмерного кремнезёма в возрасте 3 суток составляет 58.6 нм, в возрасте 7 сут — 182.2 нм с дальнейшим увеличением, т. е. дисперсность полученных нами золей значительно выше. Первоначальные размеры НЧ SiO₂, полученных [11], равны 2—8 нм, частицы, полученные [12], в возрасте 1—5 суток имели размер 17.1—17.9 нм, через 19 суток — 131.2—143 нм. НЧ в работах [11, 12] получены значительно менее экономичным ионообменным методом. Авторы [13] синтез нанодисперсного диоксида кремния проводили при взаимодействии тетраэтоксисилана с водным раствором гидроксида натрия. Процесс включал несколько стадий: смешивания растворов с последующим упариванием, фильтрованием, сушки в инертном газе и растворении в абсолютном спирте. Размер полученных наночастиц 10—100 нм.

Таким образом, методика синтеза, предлагаемая нами, отличается экономичностью, простотой аппаратного оформления, обеспечивает получение НЧ размером 5—10 нм, устойчивых в течение 7 суток, а также рациональным способом введения и равномерным распределением НЧ в цементной системе.

ЭВОЛЮЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ ЧАСТИЦ В СИСТЕМЕ SiO₂-H₂O

Формирование наночастиц с контролируемыми свойствами осложняется недостаточной изученностью процессов зарождения и роста частиц различной химической природы, их структурирования на отдельных стадиях образования. Анализ изменения структуры наночастиц и их агрегатов важен для понимания эффективного, целенаправленного управления изменением состава, размера и морфологии наночастиц, пор и их распределения при получении многофункциональных композиционных материалов с требуемыми характеристиками.

В наиболее известных работах по системам SiO₂-H₂O [7, 14—19], в публикациях экспериментального характера, посвящённых созданию новых материалов на основе наноструктурных композиций [13], и, в частности, наномодифицированию цементных композитов [9—12], нет примеров создания эволюционной модели образования частиц гидратированных оксидов на наномасштабном уровне. Чтобы предложить такую модель, синтезированные нами наиболее представительные системы были исследованы методами физико-химического анализа.

По данным рентгенофазового анализа все исследованные нами системы являются рентгеноаморфными. При этом на рентгенограммах фиксируются области ближнего порядка размером ~1 нм, которые в дальнейшем могут играть роль зародышей в ходе последующей кристаллизации.

Количественная оценка содержания SiO₂ и H₂O в образцах показала, что состав систем отвечает формуле SiO₂×4H₂O (по данным рентгенофлуоресцентного анализа) и SiO₂×3.8H₂O (по данным дифференциально-термического анализа) [20].

Методом лазерной дифракции определена шарообразная форма частиц во всех исследуемых системах (рис. 1а), что явилось подтверждением более ранних указаний [21] о наличии в кремниевой кислоте четырёх равноправных функциональных силанольных групп. Результаты исследований по определению размера частиц, выполненные методами лазерной дифракции (рис. 1б), ПЭМ и методом динамического светорассеяния хорошо коррелируют между собой.

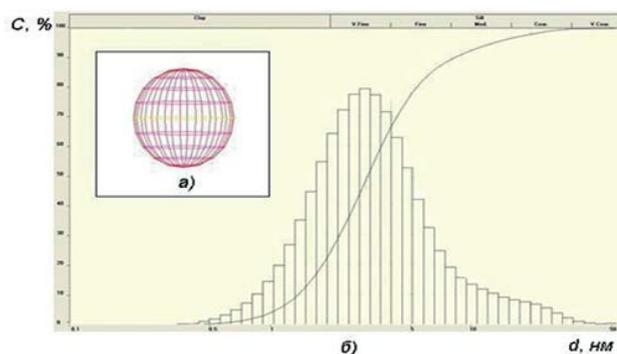


Рис. 1. Данные исследования системы 7 методом лазерной дифракции через сутки после синтеза: а) модель формы частиц гидрозоля кремния; б) график распределения размера частиц гидрозоля кремния в объеме системы

Процессы агломерации НЧ системы SiO₂-H₂O в зависимости от состава прекурсоров и параметров синтеза изучены электронно-микроскопическим методом (рис. 2, 3). По данным ПЭМ (рис. 2; 3а) наименьший размер частиц через сутки после синтеза имеют системы 7 и 10, примерно, 5 нм, причем процесс агломерации в данных системах начинается через 7 дней после синтеза (при температуре 25 °С). Через 14 дней визуально система становится непрозрачной, результаты ПЭМ показывают образование крупных агломератов размером 20—50 нм (рис. 3б). Через 20 дней после начала процесса фиксируется гелеобразование

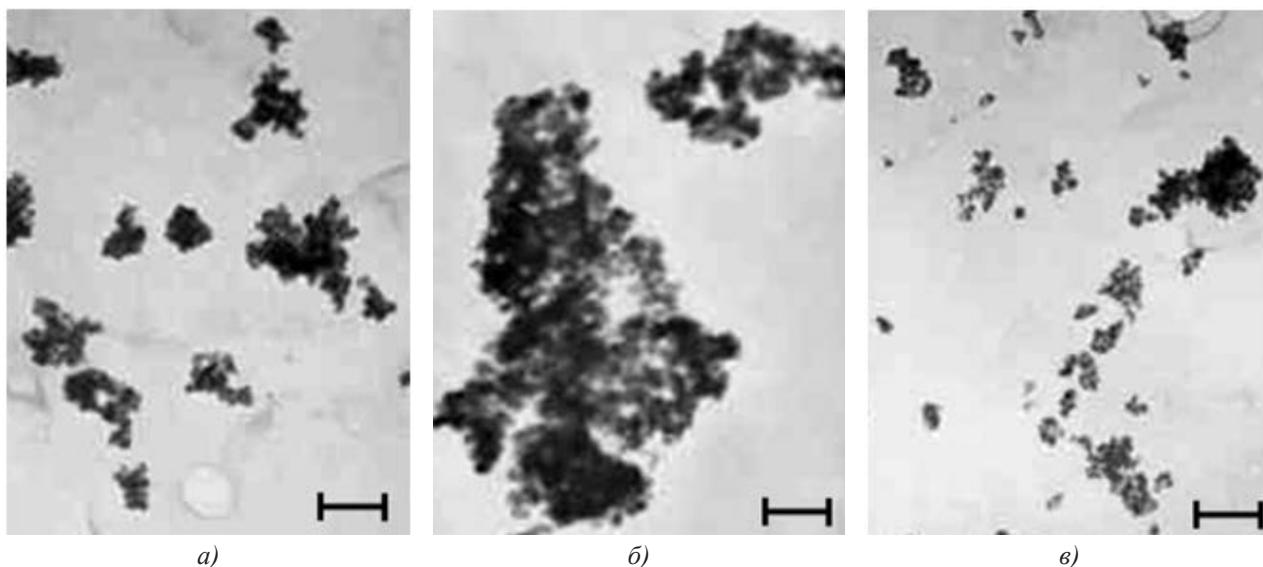


Рис. 2. ПЭМ-изображения композиций образцов: а) система 8; б) система 9; в) система 10. Размер метки 50 нм

(рис. 3в). Наибольший размер частиц наблюдается у системы 9 — около 100 нм.

Проведенные исследования полученных НЧ методом динамического светорассеяния (Photocor Complex) показали, что в ходе индукционного периода (12 часов) происходит формирование зародышей с размером 1—2 нм в количестве 15—20% от общей массы исходного вещества. Ранее нами [22] установлено, что в разбавленных растворах кремниевой кислоты 0.5—1.5 г/л SiO₂ (при невысоких величинах пересыщений) на начальной стадии процесса наблюдается резкое уменьшение концентрации активных форм (порядка 15—20% от обще-

го содержания) и увеличение pH. Это может быть связано с гомогенной поликонденсацией, приводящей к образованию низкомолекулярных полимерных форм. Продолжительность индукционного периода образования частиц твердого вещества уменьшается с увеличением концентрации, pH и температуры.

В дальнейшем наблюдается рост частиц, который может протекать по механизму гетерогенной поликонденсации, за счет осаждения оставшихся в растворе активных форм — мономера и низкомолекулярных полимеров — на уже сформировавшихся зародышах. В целях поиска эксперименталь-

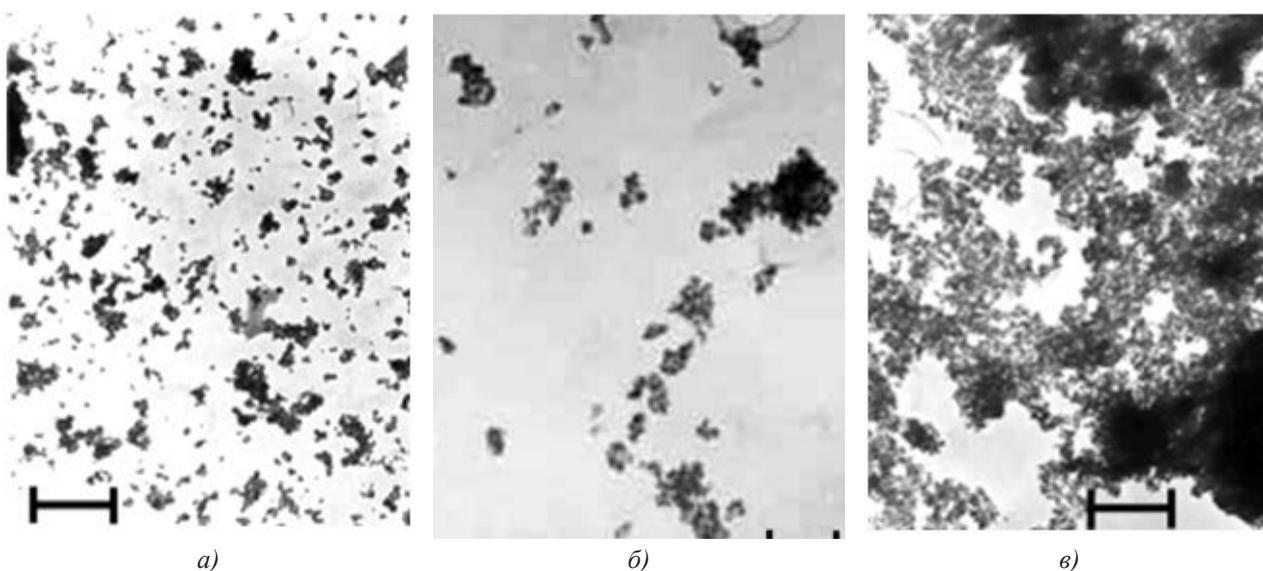


Рис. 3. ПЭМ-изображения образцов системы 7: а) через 7 дней; б) через 14 дней; в) через 21 день. Размер метки: для а) 50 нм, для б) 100 нм; для в) 200 нм

ных подтверждений данного предположения для системы 7 был получен ИК-спектр (рис. 4), в котором можно выделить для связи Si–O–Si полосы поглощения 1060, 810, 460 см^{-1} (сильные) и 560 см^{-1} (слабая), которые характеризуют валентные колебания. Автор [15] указывает на наличие в области колебаний Si–O сильных полос 1200, 1100, 810 и 465 см^{-1} и слабых полос 720, 630 и 560 см^{-1} . Шарообразная форма полученных нами НЧ (рис. 1а) позволяет отнести синтезированные системы к островным силикатам, для водородных форм которых характерно наличие катионной OH-группы (полоса 3640 см^{-1}) [15, 23].

В ИК-спектрах всех соединений на основе SiO_2 присутствует широкая полоса поглощения в области 3450–3350 см^{-1} и полоса поглощения 1630–1640 см^{-1} , которые соответствуют валентным ν - и деформационным δ -колебаниям адсорбированных молекул воды [24]. Полосы поглощения 3415 и 1611 см^{-1} идентифицируются в системе 7 (рис. 4). Автор [25] определяет полосу поглощения 1625 см^{-1} как соответствующую δ -колебаниям димерно или мономолекулярно адсорбированной H_2O .

Итак, идентифицируемые в синтезированной системе несколько смещённые полосы колебаний свидетельствуют о наличии валентных связей Si–O, катионных OH-групп и адсорбированной воды.

Кинетические кривые процессов роста и агломерации частиц представлены на рис. 5. Наиболее интенсивно агломерация наблюдается в системе 9, что связано с максимальным увеличением величины pH в растворе по сравнению с другими исследуемыми системами.

Таким образом, для создания модели зарождения и роста наночастиц в системе SiO_2 – H_2O имелись следующие предпосылки.

1. Представления авторов [7] о формировании золь кремниевой кислоты в результате поликонденсации с образованием силоксановых связей и о существовании различных стадий процесса поликонденсации в водных растворах кремниевых кислот.

2. Полученные нами физико-химические характеристики продуктов синтеза:

- близкая к наиболее устойчивой шарообразная форма наночастиц (рис. 1а);
- нанодисперсность продуктов синтеза (данные ПЭМ и динамического светорассеяния);

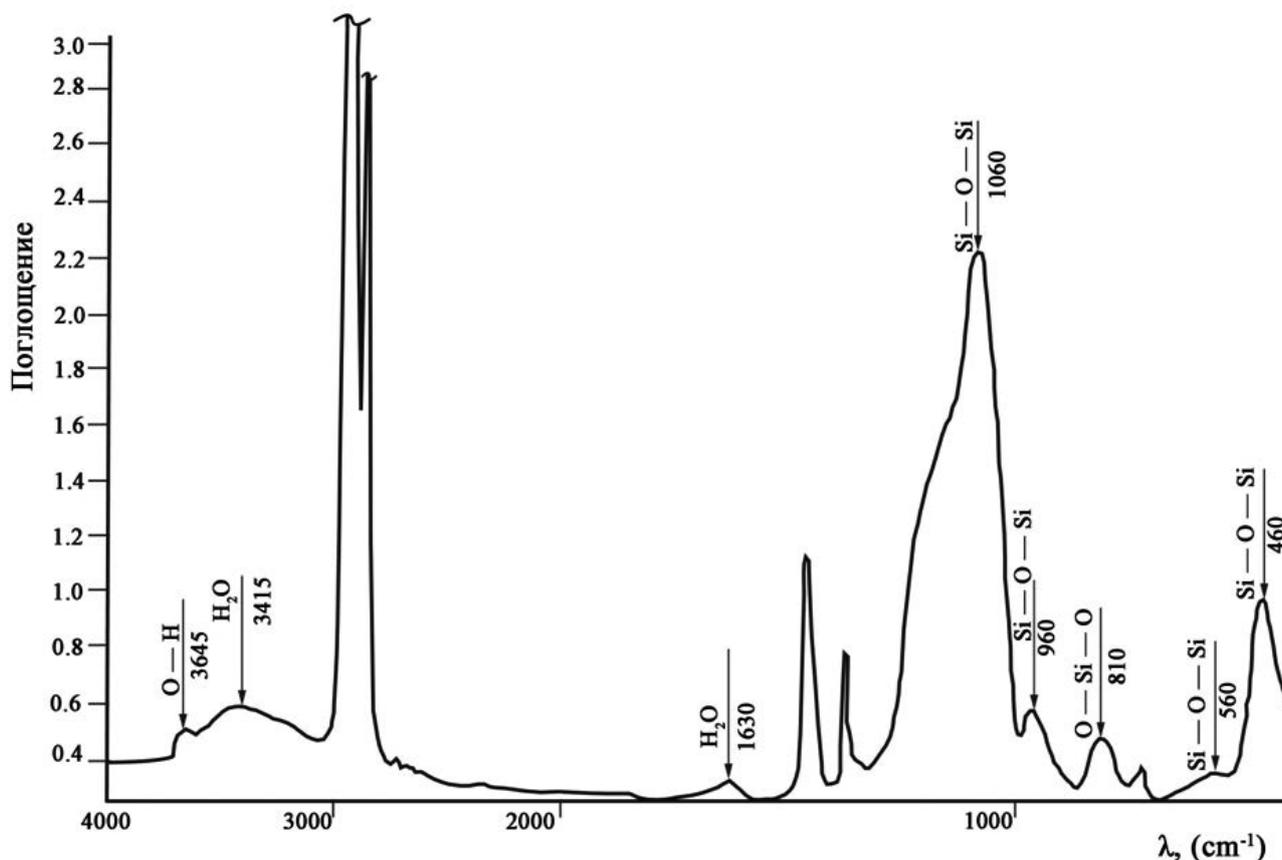
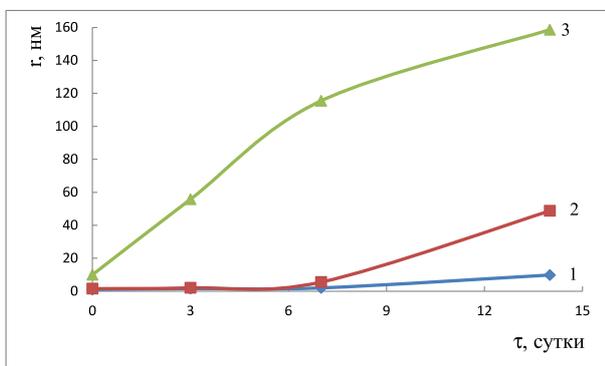
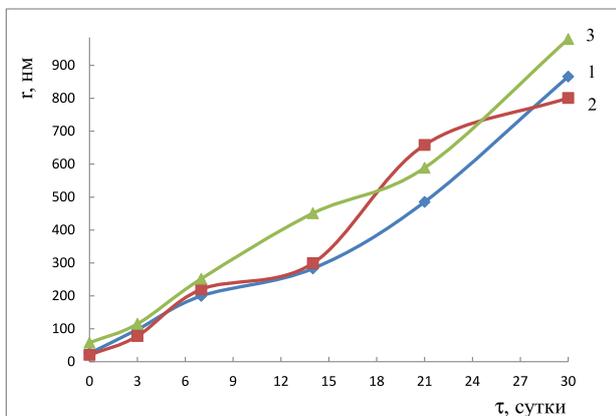


Рис. 4. ИК-спектр системы 7 через 7 суток от начала синтеза

— данные ИКС (рис. 4);
 — кинетические кривые процессов роста и агломерации наночастиц (рис. 5).



а



б

Рис. 5. Графики зависимости процессов роста частиц (а) и агломерации (б) от времени: 1 — система 7; 2 — система 10; 3 — система 8 (по данным динамического светорассеяния)

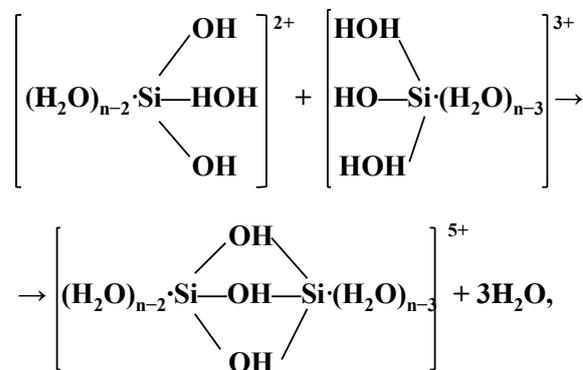
3. Эволюционная модель образования твёрдого вещества [27].

Обобщая уже известные работы различных авторов, а также результаты наших экспериментальных исследований, в [28] предложена модель зарождения и роста частиц на наномасштабном уровне, которая применительно к системе SiO₂–H₂O представлена на рис. 6.

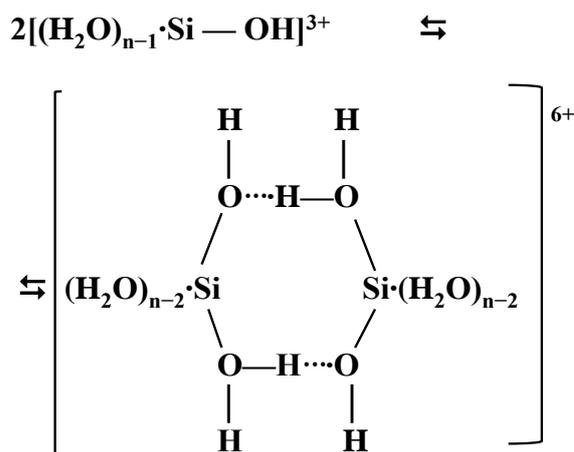
Исходный ион Si⁴⁺ в растворе подвергается гидратации с образованием мономерного акваиона Si⁴⁺·nH₂O. Далее протекает частичный или полный гидролиз с образованием растворимого мономерного гидроксокомплекса [(H₂O)_{n-1}·Si–OH]³⁺, причём гидроксокомплексы образуются из аквакомплексов в результате реакции кислотно-основного взаимодействия при удалении протона из внутренней сферы комплексного иона:



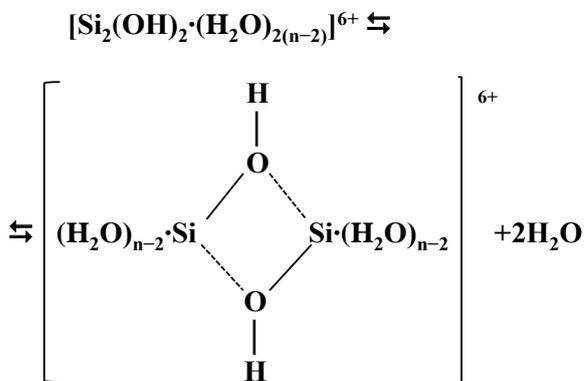
Следующие стадии: гомогенная гидролитическая поликонденсация с образованием полиядерных оксигидроксокомплексов (полимерная молекула):



и образование флуктуационного ассоциата, который представляет собой конгломерат полимерных молекул, образующийся за счет водородной связи:



Димер в результате дегидратации может также вызывать образование оловых соединений:



Поликонденсация идёт за счёт идентифицируемых на ИК-спектрах ОН-групп. Далее происходит

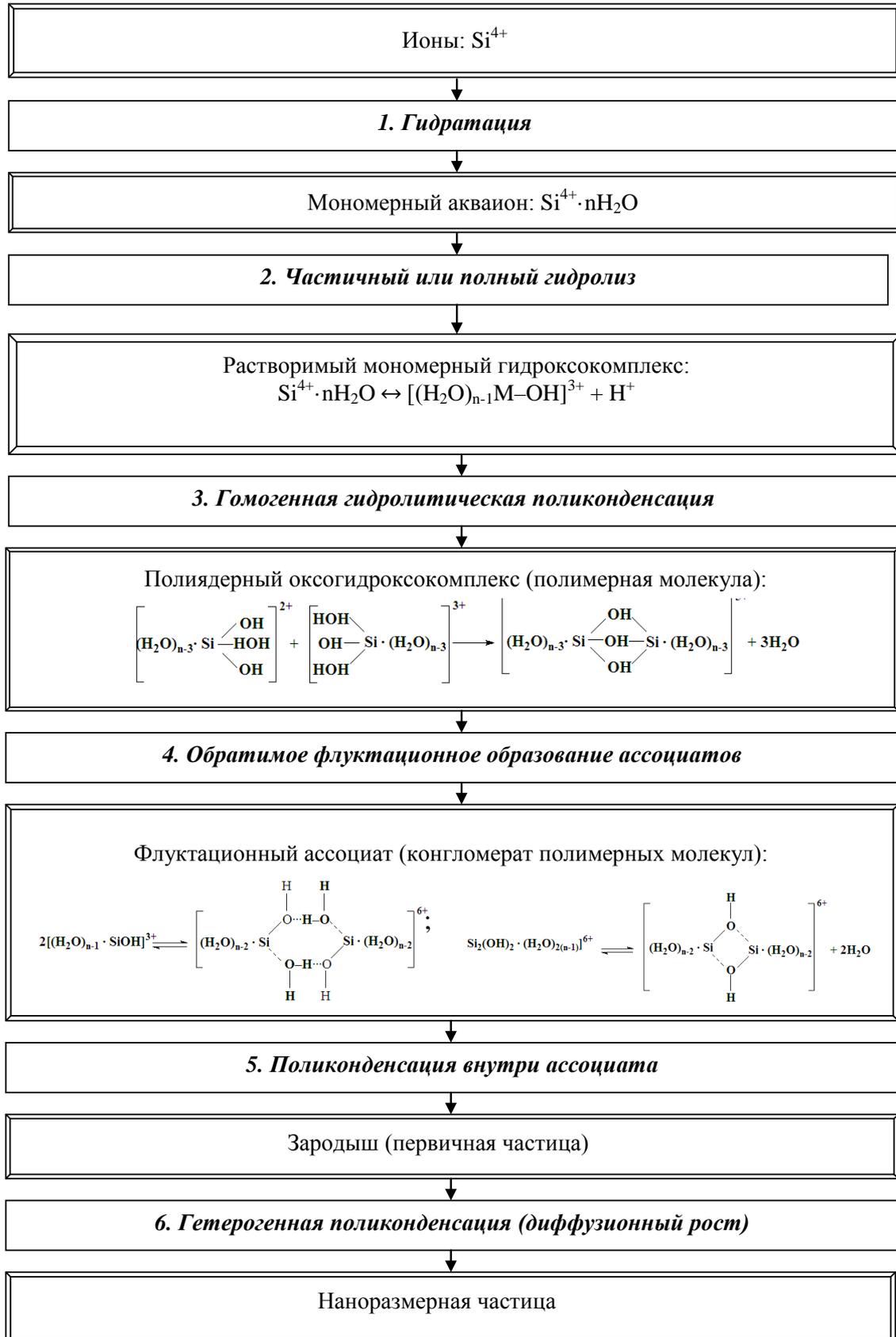


Рис. 6. Эволюционная модель образования частиц гидратированных оксидов на наномасштабном уровне в системе $\text{SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$

образование зародыша (первичной частицы) за счет поликонденсации внутри ассоциата. Согласно [14], минимальные зародыши сферической формы содержат 40—50 атомов кремния и имеют размер порядка 1.5 нм. Выше отмечено формирование зародышей размером 1—2 нм по данным динамического светорассеяния.

Таким образом, образование зародышей новой фазы происходит уже на ранних стадиях поликонденсации, что приводит к локализации химического процесса в поверхностном слое, при этом реакция начинает протекать на фоне различных физических явлений. В этих условиях структура и свойства поверхностных слоев растущих зародышей становятся лимитирующими факторами, определяющими кинетику физических и химических процессов при получении коллоидной системы SiO₂ — H₂O [28].

Затем наступает этап гетерогенной поликонденсации, по мнению [17] рост зародышей происходит за счёт диффузии мономера. Данная стадия заканчивается образованием НЧ, которые, в свою очередь, под действием процесса коагуляции могут образовывать далее различные системы: гель, рентгеноаморфный или кристаллический осадок.

ВЫВОДЫ

Разработана методика синтеза наномодификаторов структуры и свойств цементного камня на основе SiO₂ по золь-гель технологии. Определены оптимальные системы 7 и 10 (прекурсоры: 1.0 MNa₂SiO₃ · 5H₂O, 0.1M HCl, 0.1M CH₃COOH) и условия синтеза: метод обратного дозирования со скоростью 1 мл/мин, температура 25 °С, pH 8—9. Предложена эволюционная модель образования частиц гидратированных оксидов на наномасштабном уровне в данной системе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фаликман В. Р. Наноматериалы и нанотехнологии в современных бетонах // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 1. С. 31.
2. Пухаренко Ю. В., Аубакирова И. У., Никитин В. А. Структура и свойства наномодифицированных цементных систем // Сборник трудов международной конференции «Наука и инновации в строительстве. Современные проблемы строительного материаловедения и технологии». Воронеж, 2008. Т. 1. Кн. 2. С. 424.
3. Строительное материаловедение / [под общ. ред. В. А. Невского]. Ростов н/Д: Феникс, 2009. 589 с.
4. Жерновский И. В., Строкова В. В. Некоторые вопросы понятийного аппарата наносистемного строительного материаловедения // Строительные материалы. 2012. № 3. С. 8.
5. Тейлор Х. Химия цемента. Пер. с англ. М.: Мир, 1996. 500 с.
6. Артамонова О. В., Сергуткина О. Р., Чернышов Е. М., Коротких Д. Н. // Нанотехнологии в строительстве: научный Интернет-журн. М.: ЦНТ «НаноСтроительство». 2010. № 1. С. 97. // www.nanobuild.ru.
7. Шабанова Н. А., Попов В. В., Саркисов П. Д. Химия и технология нанодисперсных оксидов. М.: ИКЦ «Академкнига», 2006. 309 с.
8. Чернышов Е. М., Артамонова О. В., Коротких Д. Н. и др. // Строительные материалы. 2008. № 2. С. 32.
9. Урханова Л. А., Лхасаранов С. А., Номоев А. В., Лыгденов В. Ц. // Нанотехнологии в строительстве: научный Интернет-журн. М.: ЦНТ «НаноСтроительство». 2010. № 4. С. 42. // www.nanobuild.ru.
10. Лукутцова Н. П. // Строительные материалы. 2010. № 9. С. 101.
11. Джумагелдиева Ш. А. // Вестник ЕНУ им. Л. Н. Гумилёва. 2011. № 4. С. 159.
12. Логанина В. И., Прошина Н. А., Давыдова О. А. // Строительные материалы. 2009. № 7. С. 48.
13. Седунов С. Г. и др. // Молекулярные технологии. 2011. № 5. С. 263. www.niira.ru/journal.
14. Айлер Р. К. Химия кремнезёма / [пер. с англ.]. Т. 1, 2. М.: Мир, 1982. 712 с.
15. Чукин Г. Д. Химия поверхности и строение дисперсного кремнезёма. М.: Типография Паладин, ООО «Принта», 2008. 172 с.
16. Попов В. В. Образование дисперсных систем оксидов, оксигидроксидов и гидроксидов элементов. Обзор. инф. «Актуальные вопросы химической науки и технологии и охраны окружающей среды. Общественно-научные вопросы». М.: НИИТЭХИМ, 1991. Вып. 7 (309). 78 с.
17. Стрелко В. В. // Коллоид. журн. 1970. Т. 33. № 3. С. 430—436.
18. Handbook of nanoscience, engineering, and technology / [Ed. by W. A. Goddard, D.W/ Brenner, S. E. Lyshewski, G. J. Iafrate]. Boca Raton: CRC Press, 2003. 800 p.
19. Vigil G., Xi Zh., Steiberg S., Israelachvili J. // J. Interface Sci. 1994. V. 165. № 2. P. 367—385.
20. Артамонова О. В., Сергуткина О. Р., Останкова И. В. // Тезисы докладов VI Всероссийской конференции: Физико-химические процессы в конденсированных средах и на межфазных границах (ФАГРАН-2012). Воронеж, 2012. С. 148.
21. Шабанова Н. А., Попов В. В., Фролов Ю. Г. // Изв. вузов. Химия и хим. технол. 1985. Т. 28. Вып. 6. С. 58.
22. Артамонова О. В., Кузовкина А. С., Рогожникова М. С. и др. / Тезисы докладов первой Всероссийской конференции: Золь-гель синтез и исследование

неорганических соединений, гибридных функциональных материалов и дисперсных систем. Санкт-Петербург, 2010. С. 149.

23. *Накамото К.* Инфракрасные и спектры комбинационного рассеяния неорганических и координационных соединений / [пер с англ]. М.: Мир, 1991. 536 с.

24. *Платонов В. В., Третьяков Н. Е., Филимонов В. Е.* // Сб. «Успехи фотоники». Изд-во Лен. ун-та, 1971. 2. С. 92.

25. *Григорович С. Л.* Канд. дисс. ... М.: МГУ, 1974.

26. *Мелихов И. В.* Физико-химическая эволюция твердого вещества. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. 309 с.

27. *Артамонова О. В.* // Научный Вестник ВГАСУ. Серия: «Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения». Воронеж. 2013. № 7. С. 3.

28. *Артамонова О. В., Чернышов Е. М.* // Строительные материалы. 2013. № 9. С. 82—95.

Артамонова Ольга Владимировна — к. х. н., доцент кафедры химии, Воронежский государственный архитектурно-строительный университет; тел.: (473) 2369350, e-mail: ol_artam@rambler.ru

Сергуткина Октябрина Романовна, — к. х. н., доцент кафедры химии, Воронежский государственный архитектурно-строительный университет; тел.: (473) 2369350, e-mail: ok_sergut@rambler.ru.

Останкова Ирина Валерьевна — инженер кафедры высокомолекулярных соединений и коллоидов, Воронежский государственный университет; тел.: (473) 2208956, e-mail: vms159@mail.ru.

Шведова Мария Александровна — студентка 3-го курса строительного факультета, Воронежский государственный архитектурно-строительный университет; тел.: (473) 2369350, e-mail: marishwedowa@mail.ru.

Artamonov Olga V. — Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor, Department of Chemistry, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering; tel.: (473) 2369350, e-mail: ol_artam@rambler.ru

Sergutkina Oktjabrina R. — Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor, Department of Chemistry, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering; tel.: (473) 2369350, e-mail: ok_sergut@rambler.ru.

Ostankova Irina V. — Engineer of the Department of Macromolecular Compounds, and Colloids, Voronezh State University; tel.: (473) 2208956, e-mail: vms159@mail.ru.

Shvedova Maria A. — student of 3rd year of Construction and Technological Faculty, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering; tel.: (473) 2369350, e-mail: marishwedowa@mail.ru.