

УДК 69.001.5

## ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОЦЕССОВ ГИДРАТАЦИИ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ БЕТОНОВ МОДИФИЦИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ

*В. И. Большаков, д. т. н., проф., С. Ю. Петрунин\*, асп., В. Е. Ваганов, к. т. н., доц.  
ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича  
и Николая Григорьевича Столетовых»*

**Ключевые слова:** углеродные нанотрубки, цементное вяжущее, бетон, водные дисперсии, прочность, функционализация

**Введение.** Модифицирование матрицы бетона наноразмерными добавками, в том числе углеродными наноструктурами, является одним из современных и перспективных способов повышения физико-механических характеристик композитов на основе цементного вяжущего. Свойства результирующего материала зависят от морфологического типа и соответственно структуры используемых добавок их концентрации и способа введения в состав композита. Существенное влияние в формировании свойств композита оказывает химический состав поверхности углеродных наноструктур, определяющий характер и интенсивность взаимодействия модифицирующих и упрочняющих добавок с цементной матрицей.

**Применяемые материалы и методы исследований.** Для синтеза лабораторных образцов мелкозернистого бетона в качестве вяжущего использовали портландцемент марки ЦЕМ I 42,5 Б, произведенный ОАО «Мордовцемент» (Сертификат соответствия нормативным документам № РОСС RU СЛО2.Н00694). В качестве заполнителя для получения образцов мелкозернистого бетона использовали кварцевый песок по ГОСТ 8736-93. Средняя плотность песка составляла 1610 кг/м<sup>3</sup>, истинная плотность 2700 кг/м<sup>3</sup>, водопоглощение 7 %, модуль крупности 1,6.

С целью повышения подвижности бетонной смеси, а также повышения седиментационной устойчивости коллоидных растворов с УНТ использовали поликарбоксилатный гиперпластификатор П-11 научно-производственного предприятия «Макромер», г. Владимир. Для затворения сухой смеси вяжущего с мелким заполнителем использовали дистиллированную воду по ГОСТ 6709-72. В качестве наномодифицирующей добавки применяли многослойные углеродные нанотрубки, произведенные на установке каталитического пиролиза углеводородов, на базе ВлГУ. Синтезируемый наноматериал представляет собой черный порошок в виде микронных агломератов, состоящих преимущественно из многослойных углеродных нанотрубок. Основные свойства УНТ представлены в таблице 1.

*Т а б л и ц а*

*Свойства УНТ*

<b>Наименование характеристики</b>	<b>Значение</b>
Наружный диаметр, нм	20 – 80
Внутренний диаметр, нм	10 – 30
Длина, мкм	не более 2
Объем примесей, %	до 5 %
Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>	0,4 – 0,5
Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г	120
Количество слоев	до 30

Изучение фазового состава образцов мелкозернистого бетона проводили посредством рентгенодифракционного анализа на дифрактометре Bruker D8 Advance в диапазоне двойных углов 4 – 60°. Исследования осуществляли по методу порошка. Обработку и расшифровку дифрактограмм осуществляли по базам данных PDF-2. Определение количественного фазового состава бетона производили по методу Ритвельда.

Исследование структуры бетона методами инфракрасной (ИК) спектроскопии позволяют изучать молекулярную структуру вещества, идентифицировать разновидности химических

связей, определять качественный и количественный фазовый состав материала. В рамках настоящей работы, для записи ИК-спектров использовали инфракрасный Фурье – спектрометр Perkin Elmer Spectrum 100. Диапазон съемки при исследовании образцов бетона составил от  $500 \text{ см}^{-1}$  до  $4\,000 \text{ см}^{-1}$ , разрешение не ниже  $0,5 \text{ см}^{-1}$ .

Свойства коллоидных растворов на основе воды затворения, пластификатора и углеродных нанотрубок изучали посредством ультрафиолетовой спектроскопии на UV/VIS спектрофотометре Cary 50.

Определение  $\zeta$ -потенциала в водных дисперсиях с УНТ осуществляли на приборе Zetasizer Nano ZS. Измерения производились по механизму электрофоретического рассеяния света на основе использования быстрого и медленного переменного электрического поля в сочетании с фазовым и частотным рассеянием света. Диапазон размеров частиц при измерении  $\zeta$ -потенциала находился в интервале от 3,8 нм до 100 мкм включительно.

Анализ распределения размеров частиц производили на приборе Zetatrac NPA152 – 31A. Прибор управлялся программным обеспечением Microtrac FLEX. Диапазон измерений размеров частиц составлял от 0,8 нм до 6,5 мкм, при концентрации раствора не более 40 %.

Применение растровой электронной микроскопии позволяет получать данные о структуре материала от микро- до наноуровня, а также осуществлять анализ элементного состава веществ. Съемку микрофотографий структуры образцов бетона производили на растровом электронном микроскопе Quanta 200-3D и Nova 200 NanoSem, оснащенный колонной высокого разрешения с источником на полевой эмиссии.

Исследования коллоидных растворов с УНТ проводили на просвечивающем электронном микроскопе JEM 2100. Технические возможности микроскопа позволяют:

- исследовать морфологию неорганических материалов на наноуровне, вплоть до атомного разрешения;
- изучать фазовый состав неорганических материалов;
- определять элементный и химический состав локальных участков образцов с помощью энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии и спектроскопии характеристических потерь энергии электронов.

Определение прочности бетона заключается в измерении минимального усилия, обеспечивающего разрушения специально изготовленных образцов из указанного материала при статическом нагружении с постоянной скоростью роста нагрузки и последующем вычислении напряжения в случае упругой работы материала [ГОСТ 5]. Испытания мелкозернистого бетона проводили на образцах-балочках с размерами  $4 \times 4 \times 16 \text{ см}$  по ГОСТ 10180 – 201.

**Результаты исследований.** *Исследование параметров синтеза водных дисперсий на основе поликарбоксилатного гиперпластификатора и углеродных нанотрубок.* Известно [1; 2], что свойства бетона с добавкой УНТ во многом зависят от равномерности распределения отдельных наночастиц в объеме материала. Существуют различные способы введения нанотрубок в состав цементных композитов, при этом чаще всего они вводятся с водой затворения. Очевидно, что для равномерного распределения отдельных нанотрубок в объеме цементного композита необходимо предварительное получение однородных суспензий на основе УНТ, воды затворения и пластификатора. Тип сурфактанта, его концентрация и время ультразвуковой обработки оказывают существенное влияние на дисперсность и долговечность получаемых суспензий.

Качество таких дисперсий возможно оценить посредством спектрофотометрии в ультрафиолетовом диапазоне. На спектрах коллоидных растворов с УНТ наблюдается пик адсорбции ультрафиолетового излучения в диапазоне длин волн 260 нм [3; 4]. При этом с повышением содержания отдельных наночастиц в коллоидном растворе интенсивность данного пика возрастает.

В настоящей работе на основании методов математического планирования экспериментальных исследований была разработана математическая модель, отражающая зависимость однородности водных дисперсий поликарбоксилатного гиперпластификатора и УНТ в зависимости от концентрации сурфактанта и времени ультразвуковой обработки.

В качестве источника ультразвукового воздействия использовали рожковый ультразвуковой диспергатор ИЛ 10-6, с частотой ультразвуковых волн 22 000 Гц и мощностью 75 кВт.

Подбор режимов ультразвукового воздействия и содержание гиперпластификатора проводили в соответствии с априорными данными технической литературы и методикой планирования эксперимента.

На рисунке 1 представлен спектр ультрафиолетового поглощения коллоидных растворов с УНТ в зависимости от времени ультразвуковой обработки и концентрации пластификатора.

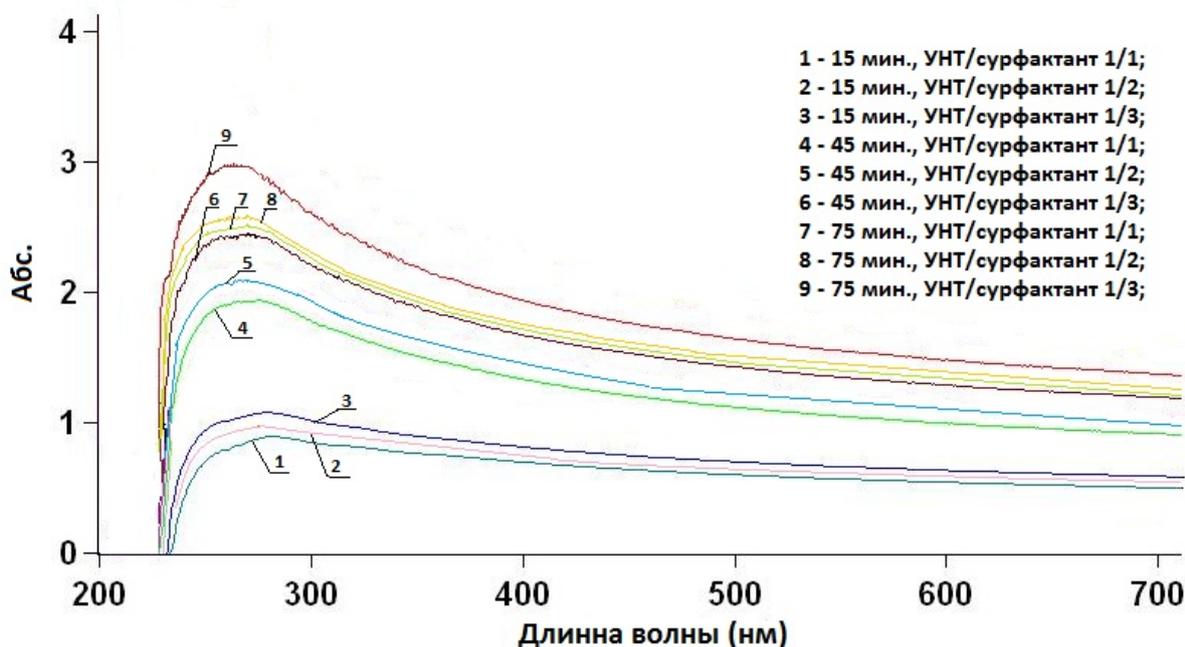


Рис. 1. Ультрафиолетовый спектр абсорбции водных дисперсий с УНТ в зависимости от концентрации сурфактанта и времени ультразвуковой обработки

Полученные результаты эксперимента использовали для разработки математической модели исследуемого процесса. Математическая модель представляет собой функцию, связывающую параметр оптимизации, в данном случае это величина абсорбции ультрафиолетовых волн, с факторами, влияющими на параметр оптимизации, а именно — временем ультразвукового воздействия и концентрацией сурфактанта. На основании выполненных расчетов был построен график зависимости абсорбции ультрафиолетового излучения от времени ультразвукового воздействия и концентрации сурфактанта, из которого следует, что максимальное значение параметра оптимизации наблюдается при максимальных значениях входных параметров.

Таким образом, для получения наиболее дисперсной водной суспензии на основе поликарбоксилатного гиперпластификатора П-11 и УНТ в дальнейшем использовали следующие режимы синтеза: концентрация количества сурфактанта к УНТ по массе 3 к 1, время ультразвуковой обработки 60 минут.

**Поверхностная функционализация углеродных нанотрубок.** С целью обеспечения взаимодействия между поверхностью трубки и матрицей материала, а также придания им гидрофильных свойств для получения стабильных и устойчивых во времени водных суспензий поверхность нанотрубок подвергают химической обработке (функционализации). В результате на поверхности целенаправленно формируются различные химические соединения [5; 6].

В нашем исследовании функционализацию УНТ проводили двумя способами:

- 1) обработкой раствором неорганических кислот (УНТ-фк);
- 2) механохимической обработкой в щелочи (УНТ-фм).

Модификации поверхности УНТ по первому способу осуществляли следующим образом: 50 г просеянных УНТ помещали в колбу и заливали смесью концентрированных неорганических кислот  $\text{HNO}_3$  и  $\text{H}_2\text{SO}_4$  из расчета 1 : 5. Объемное отношение азотной и серной кислот составило 1 : 3 соответственно. Смесь нагревали до температуры  $70^\circ\text{C}$  при постоянном перемешивании. Длительность процесса составила 3 часа. За это время частицы никелевого катализатора, оставшиеся от процесса синтеза, окислялись с выделением газа и появлением зеленого окрашивания раствора. После этого раствор охлаждали, разбавляли дистиллированной

водой и фильтровали. Отфильтрованные УНТ промывали дистиллированной водой до момента нейтральной реакции промывных вод.

Функционализацию УНТ по второму способу проводили посредством механохимического метода. Для этого равные навески УНТ и щелочи K(OH) загружали в шаровую мельницу и перемалывали в течение 60 минут при скорости 600 об. / мин. Затем полученный материал отмывали от щелочи дистиллированной водой и сушили под вакуумом.

Качественную оценку наличия функциональных групп на поверхности УНТ производили при помощи ИК-спектроскопии. Данный способ отлично подходит для анализа функционализированных УНТ. На рисунках 2 – 4 представлены ИК-спектры УНТ до и после процесса функционализации.

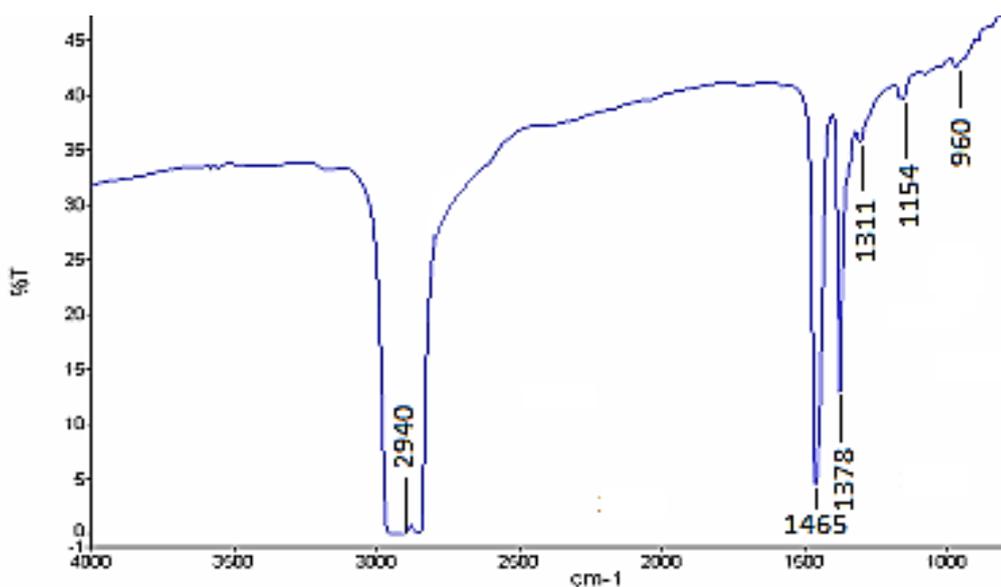


Рис. 2. ИК-спектр исходных УНТ

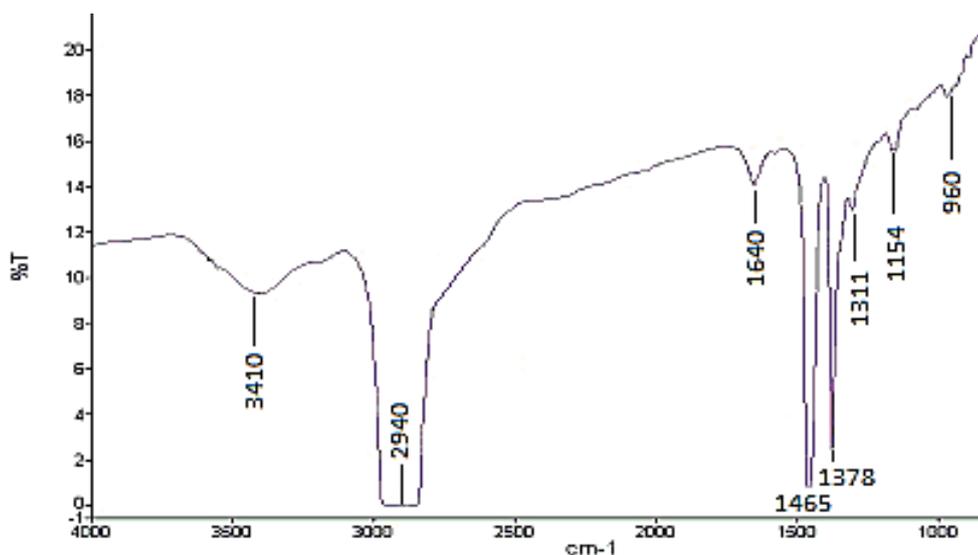


Рис. 3. ИК-спектр УНТ-фк после обработки раствором неорганических кислот

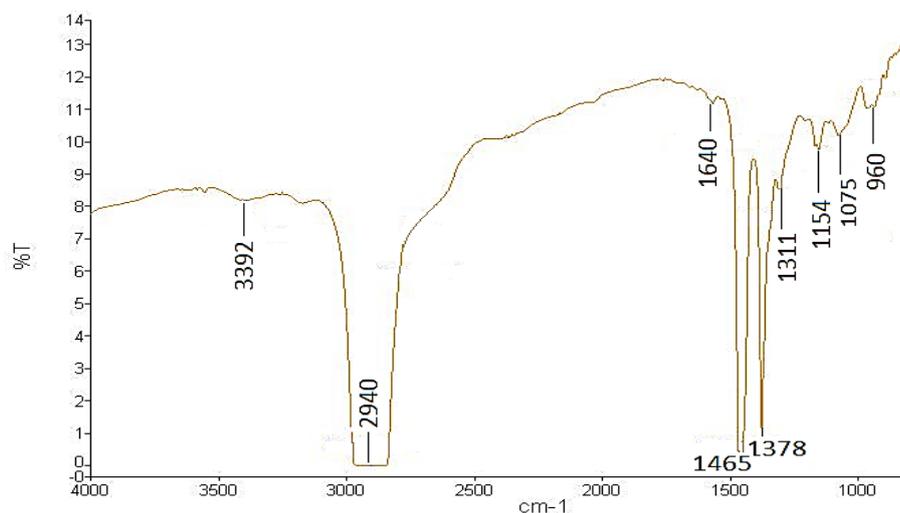


Рис. 4. ИК-спектр УНТ-фм после механохимической обработки в  $K(OH)$

На ИК-спектрах наблюдали ряд одинаковых полос поглощения, как для исходных, так и функционализированных нанотрубок. Полоса поглощения в диапазоне частот  $960\text{ см}^{-1}$  соответствует деформационным колебаниям С-Н шестичленного кольца УНТ. Антисимметричные валентные колебания С-О-С способствовали появлению пика на  $1\,154\text{ см}^{-1}$ , полоса на  $1\,311\text{ см}^{-1}$  соответствует С-С колебаниям каркаса УНТ. Поглощение при  $1\,378\text{ см}^{-1}$  и  $2\,940\text{ см}^{-1}$  обусловлено валентными колебаниями С-Н, характерными для метильной группы  $CH_3$ . Во всех спектрах присутствовали полосы поглощения на  $1\,465\text{ см}^{-1}$ , вызванные пульсирующими колебаниями углеродного скелета УНТ. Важно отметить наличие на спектре УНТ-фм пиков поглощения на  $3\,392\text{ см}^{-1}$  и  $1\,075\text{ см}^{-1}$ , соответствующих валентным колебаниям С-О, и отсутствие полосы поглощения на  $1\,711\text{ см}^{-1}$  для УНТ-фк, которая обусловлена наличием карбоксильных групп на поверхности УНТ в соответствии с [7; 8]. Присутствие полосы поглощения в диапазоне  $3\,300 - 3\,600\text{ см}^{-1}$  можно объяснить наличием гидроксильных функциональных групп.

Исследования структуры и морфологии исходных и функционализированных УНТ с применением РЭМ не выявили принципиальных различий. Во всех случаях наблюдается большое количество длинномерных слабо переплетенных УНТ, имеющих гладкую поверхность. При этом обработка в растворе кислот привела к незначительному уменьшению диаметра УНТ вследствие удаления с их поверхности аморфного углерода. Также наблюдалось уменьшение длины УНТ в результате обработки смесью кислот.

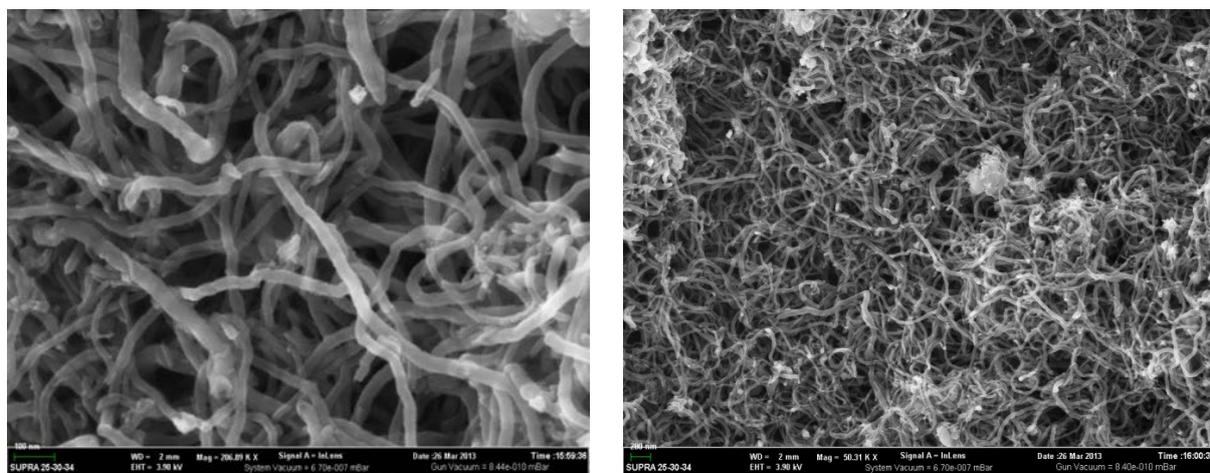


Рис. 5. СЭМ Изображение – УНТ-фк

Эти данные также подтвердились при исследовании УНТ на ПЭМ. Обработка в смеси кислот также способствовала уменьшению количества частиц остаточного катализатора.

**Определение  $\zeta$ -потенциала водных дисперсий на основе поликарбоксилатного гиперпластификатора и углеродных нанотрубок.** Стойкость к коагуляции водных дисперсий на основе УНТ и поликарбоксилатного гиперпластификатора зависит от особенностей распределения заряда вблизи поверхности коллоидных частиц, образующегося за счет абсорбции ионов из раствора или диссоциации поверхности самих коллоидных частицы. Кроме того, по аналогии с данными [9]  $\zeta$ -потенциал можно использовать для оценки сорбционных свойств катионов  $\text{Ca}^{2+}$  на поверхность нанотрубок при гидратации основных фаз цементного клинкера.

Данные измерений  $\zeta$ -потенциала дисперсий исходных и функционализированных УНТ представлены на рисунках 6 – 8.

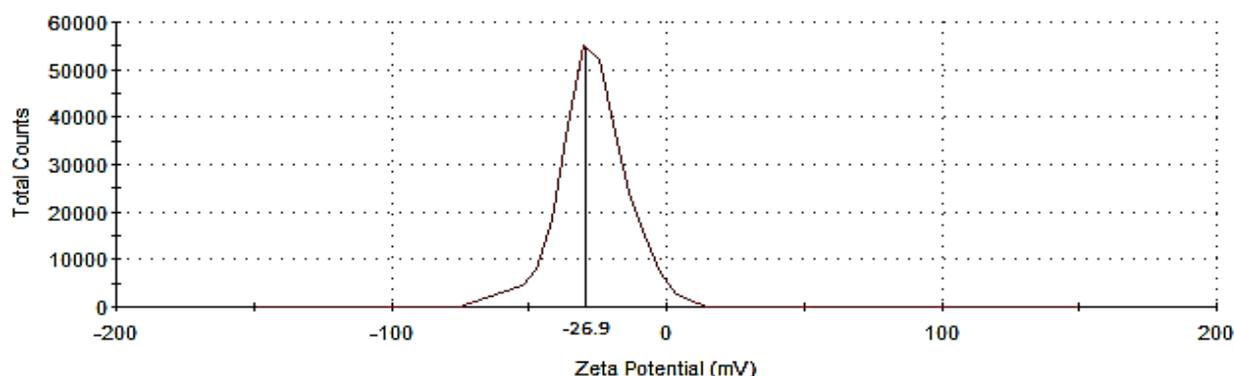


Рис. 6. График распределения  $\zeta$ -потенциала дисперсии исходных УНТ

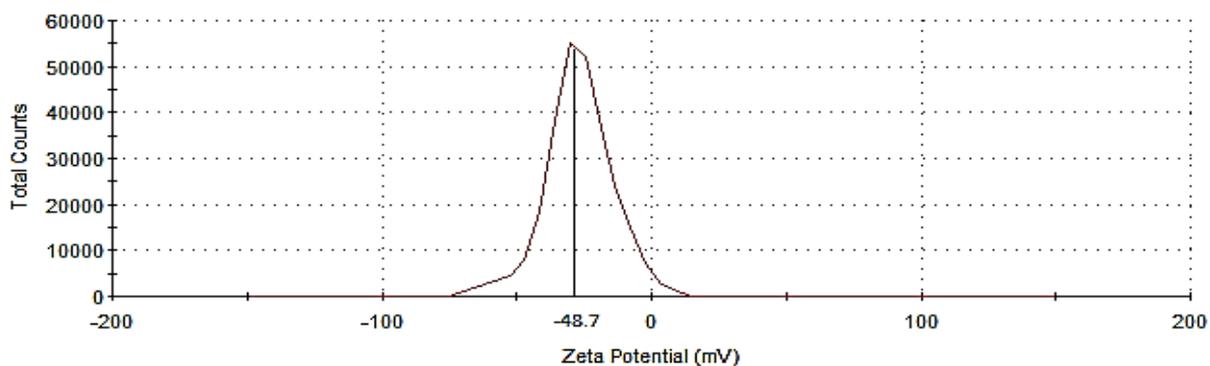


Рис. 7. График распределения  $\zeta$ -потенциала дисперсии УНТ-фк

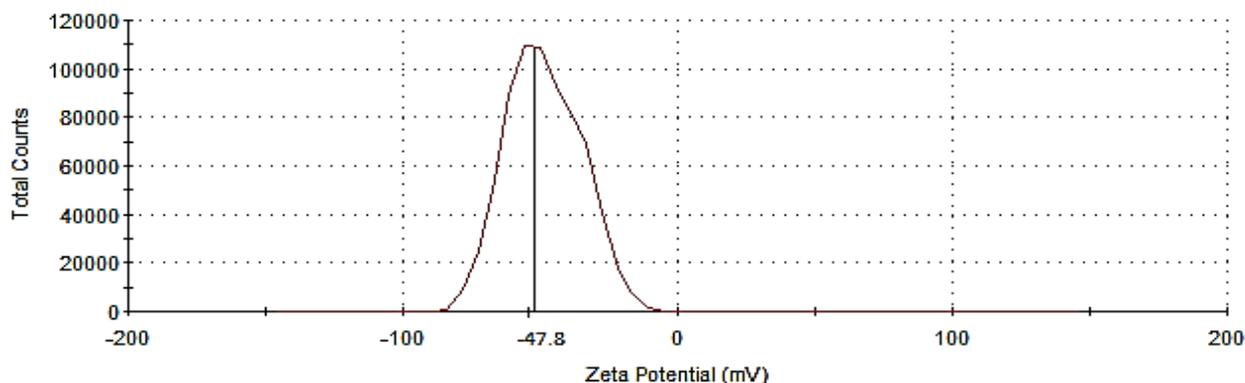


Рис. 8. График распределения  $\zeta$ -потенциала дисперсии УНТ-фм

Из приведенных графиков следует, что функционализация поверхности УНТ кислородсодержащими группами способствовала смещению  $\zeta$ -потенциала в более электроотрицательную область. Значения измеряемого параметра для коллоидных растворов с УНТ-фк и УНТ-фм равны: -48,7 мВ и -47,8 мВ соответственно, это практически вдвое меньше значения аналогичного параметра для исходных УНТ – 26,9 мВ. Очевидно, при образовании

кислородных групп на поверхности функционализированных УНТ происходило перераспределение поверхностного заряда, в результате чего  $\zeta$ -потенциал становился более электроотрицательным. Коллоидные растворы считаются устойчивыми при значениях  $\zeta$ -потенциала менее  $-15$  мВ и более  $15$  мВ [10].

**Исследование механических свойств мелкозернистого бетона модифицированного УНТ.** Результаты изменения предела прочности на сжатие и изгиб в зависимости от количества углеродного наномодификатора в объеме композита отражены на рисунках 9 и 10 соответственно.

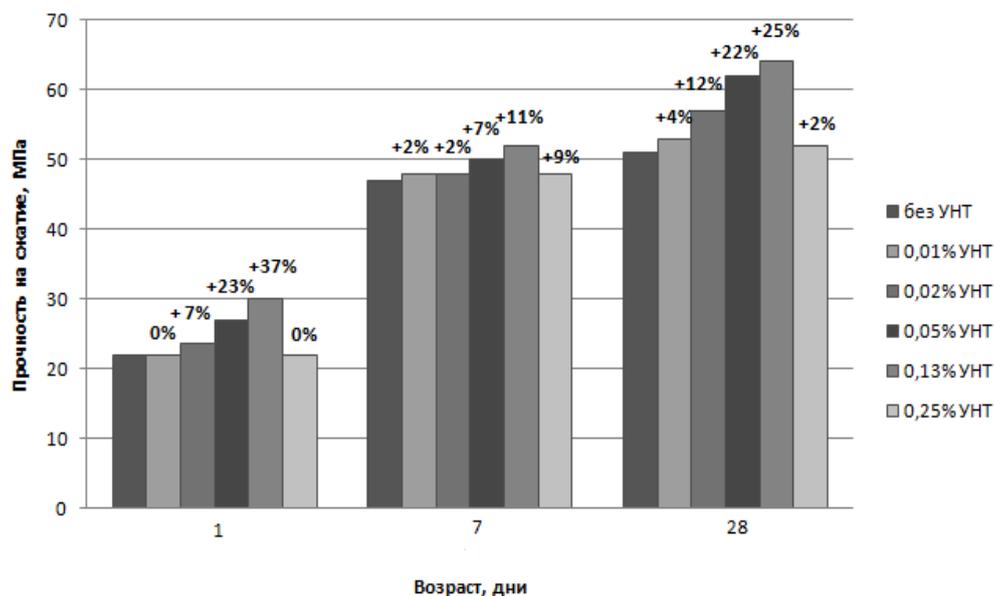


Рис. 9. Диаграмма изменения прочности на сжатие мелкозернистого бетона в зависимости от концентрации исходных УНТ

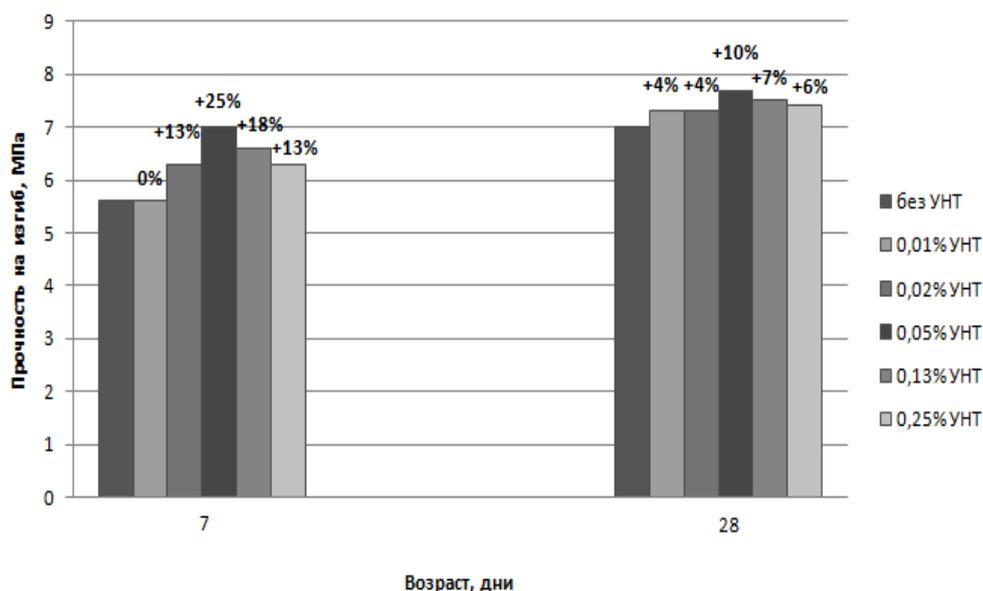


Рис. 10. Диаграмма прочности на изгиб мелкозернистого бетона в зависимости от концентрации исходных УНТ

По результатам определения предела прочности на сжатие цементных композитов с различной концентрацией углеродного наномодификатора установили, что образцы бетона, содержащие 0,13 % УНТ, обладают наибольшей прочностью по сравнению с другими. Монотонное возрастание прочностных показателей цементного камня наблюдается с увеличением содержания наночастиц с 0,01 % до 0,13 %. Улучшение изучаемых физико-механических свойств в результате введения более 0,13 % УНТ не отмечалось, а прочность

материала в данном случае соответствует эталонному образцу без УНТ. При испытаниях на изгиб максимальный прирост прочности был достигнут на образцах бетона с добавкой 0,05 % УНТ.

Анализ полученных данных по прочностным свойствам наномодифицированного цементного камня выявил, что УНТ способствуют интенсивному набору прочности в ранний период. При указанных содержаниях УНТ после первого дня выдержки набор прочности происходит в 1,23 и 1,37 раза быстрее соответственно по сравнению с материалом без наномодификатора.

Образцы цементного композита, модифицированные функционализированными УНТ, получали при аналогичном соотношении основных сырьевых компонентов, что и в случае исходных. Концентрация функционализированных УНТ составила 0,05 % от массы сухого вяжущего. Данные испытаний образцов с функционализированными УНТ представлены на рисунках 11 – 12.

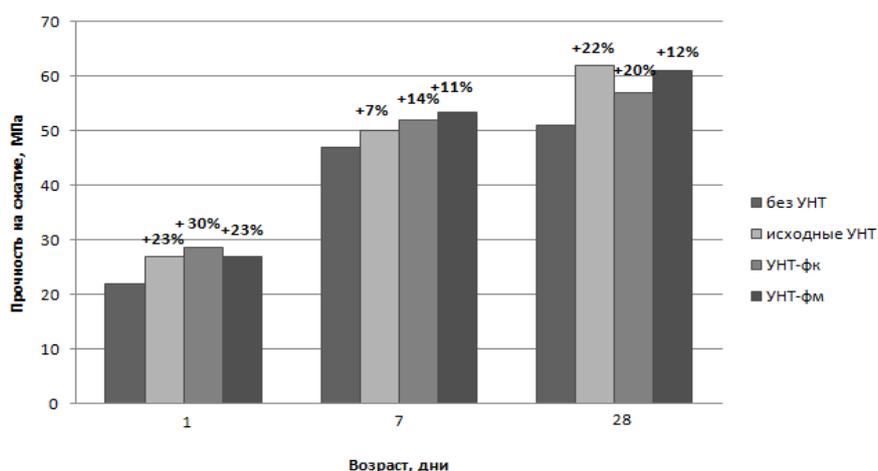


Рис. 11. Диаграмма изменения прочности на сжатие мелкозернистого бетона в зависимости от типа функционализации УНТ

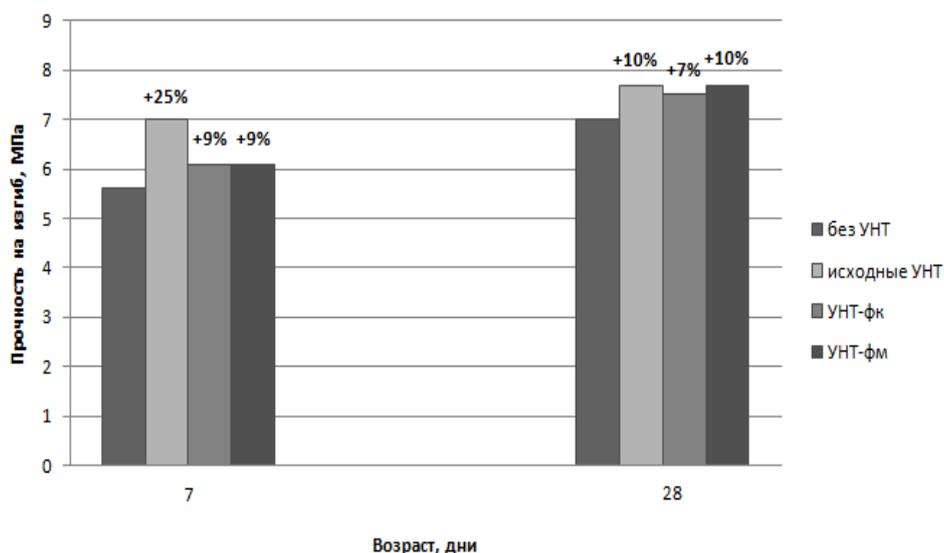


Рис. 12. Диаграмма прочности на изгиб мелкозернистого бетона в зависимости от типа функционализации УНТ

Результаты испытаний на сжатие демонстрируют, что образцы цементных композитов с добавкой функционализированных УНТ после первого и седьмого дня выдержки имели большую прочность по сравнению с бетоном, модифицированным исходными УНТ. При испытаниях на изгиб наилучшие результаты наблюдали у бетона с добавкой исходных УНТ независимо от времени выдержки.

Очевидно, наличие кислородсодержащих групп на поверхности УНТ способствует изменению характера кинетического набора прочности мелкозернистого бетона и прочностных свойств результирующего материала на его основе. Присутствие кислородсодержащих групп оказывает влияние на гидратацию цементного клинкера, ускоряя протекание самого процесса.

**Обсуждение результатов исследований.** Гидратация на ранней стадии происходит за счет растворения клинкерных фаз с поверхности зерна и переходом в раствор ионов:  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{CaOH}^+$  и анионов  $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ . Из раствора ионы  $\text{Ca}^{2+}$  и силикат ионы  $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$  концентрируются вблизи цементных зерен, образуя оболочку из первичных гидратов в виде проницаемой мембраны. Сразу после взаимодействия цемента с водой наступает насыщение раствора ионами  $\text{Ca}^{2+}$  по  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , что вызывает замедление процессов гидратации и установление индукционного периода, в течение которого растворение фаз цементного клинкера идет крайне медленно.

Длительность индукционного периода составляет приблизительно 2 часа, за это время раствор в несколько раз перенасыщается ионами  $\text{Ca}^{2+}$ , что приводит к образованию кристаллов портландита ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) и аморфного гидрат силиката кальция (C-S-H гель), наступает период ускорения. На этой стадии происходит увеличение скорости растворения исходных фаз и осаждение образующихся продуктов гидратации на поверхности цементных зерен. К моменту, когда толщина слоя достигает 0,5 – 1 мкм, оболочки соседних зерен начинают срастаться. При уменьшении проницаемости оболочки продукты гидратации формируются на ее внутренней поверхности. В возрасте 7 суток оболочки имеют толщину порядка 8 мкм, зазор между непрореагировавшим зерном и оболочкой практически отсутствует. Растворение идет по топохимическому механизму, фронт реакции смещается к центру зерна [11].

Как известно, ионы металлов, находясь в водном растворе, способны сорбироваться на поверхности УНТ [12]. В этом случае сорбционные свойства наночастиц зависят от их поверхностной функционализации, pH водной среды и концентрации самих наноструктур. В частности, в работах [1; 13] представлены результаты сорбции катионов  $\text{Ca}^{2+}$  из водного раствора на поверхность УНТ. Следовательно, на основании изложенного, при гидратации цементного клинкера в присутствии УНТ часть ионов  $\text{Ca}^{2+}$ , образующихся в ходе реакции гидратации, осаждаются на поверхности нанотрубок, взаимодействуя с гидроксид и силикат ионами и формируя при этом центры кристаллизации портландита и аморфного геля гидрат силиката кальция. Образующиеся таким образом продукты гидратации на поверхности УНТ служат «стоком» для катионов  $\text{Ca}^{2+}$ , в результате чего растворение клинкерных фаз цементных зерен происходит более интенсивно. Тем самым УНТ играют роль катализаторов, ускоряющих процессы образования и структурообразования фаз, в момент прохождения индукционного и ускоренного периодов гидратации.

Важно отметить, что оболочка вокруг цементных зерен, формирующаяся в течение индукционного и ускоренного периодов, является более проницаемой в связи с тем, что часть гидратных соединений сконцентрирована на поверхности УНТ, что не препятствует свободному ионному обмену между твердой и жидкой фазами. Происходит более полное растворение цементных зерен, в результате чего повышается степень гидратации цементного камня.

Введение углеродного наномодификатора способствует появлению областей повышенной концентрации катионов  $\text{Ca}^{2+}$  на поверхности УНТ. В этом случае процесс образования продуктов гидратации протекает более интенсивно, т. к. для роста кристаллов портландита аморфного геля гидрат силиката кальция необходимо, чтобы содержание  $\text{Ca}^{2+}$  в местах их формирования превышало концентрацию насыщенного раствора в 1,5 – 2 раза. Очевидно, в первую очередь перенасыщение  $\text{Ca}^{2+}$  наступает именно на поверхности УНТ. В связи с этим, частичное осаждение гидрат ионов на поверхности нанотрубок способствует увеличению ионной проницаемости оболочек вокруг самих зерен цементного клинкера и, как следствие, происходит их более полное и быстрое растворение.

Таким образом, при детальном рассмотрении процессов структурообразования наномодифицированного цементного камня, происходящих в первые 7 дней твердения, установлено следующее:

- УНТ ускоряют процессы растворения клинкерных фаз цементных зерен;
- УНТ являются центрами образования продуктов гидратации;
- УНТ способствуют уменьшению объема капиллярных пор.

Изменение характера набора прочности бетона в период с 7-го по 28-й день выдержки обусловлено различиями в геометрических размерах УНТ. Авторы работ [1; 14; 15], изучавшие влияние аспектного отношения УНТ на физико-механические свойства цементных композитов, выявили, что с увеличением длины вводимых нанотрубок наблюдается повышение прочностных характеристик результирующего материала. По данным СЭМ изображений структуры бетона с добавкой УНТ разных размеров определили, что УНТ связывают отдельные кристаллиты гидрат силиката кальция, приводя к упрочнению цементного камня. Отмечается, что более длинные УНТ способны связывать кристаллиты, находящиеся на больших расстояниях друг от друга, в отличие от коротких УНТ. В данном случае, длины исходных УНТ после ультразвуковой обработки превышали функционализированные УНТ. Это следует из результатов исследований измерения распределения УНТ по размерам и данным ПЭМ. Установлено, что образец цементного теста с добавкой исходных УНТ содержит практически вдвое больше отдельных нанотрубок большей длины по сравнению с образцами цементного теста с функционализированными УНТ.

**Выводы.** 1. На основе разработанной математической модели зависимости степени дисперсности исследуемых коллоидных систем от времени ультразвукового воздействия и содержания сурфактанта определены оптимальные режимы их приготовления: время ультразвуковой обработки 60 минут и соотношение сурфактанта к УНТ 3 : 1.

2. Установлено, что функционализированные УНТ в процессе ультразвуковой обработки претерпевают разрушение, что приводит к их укорачиванию и последующему агломерированию. При этом наличие на их поверхности функциональных групп повышает устойчивость коллоидных растворов, что отражается в смещении  $\zeta$ -потенциала в более электроотрицательную область по сравнению с исходными.

3. Ускорение набора прочности на ранней стадии твердения исходных и функционализированных УНТ обусловлено: ускорением процесса растворения клинкерных фаз цементных зерен; увеличением количества центров образования продуктов гидратации и уменьшением общего объема капиллярных пор.

4. Прочность модифицированного бетона на более поздних стадиях твердения определяется в первую очередь аспектным отношением сформированного вокруг УНТ и их скоплений каркаса, связывающего отдельные кристаллиты гидрат силиката кальция.

## ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. **Sobolkina, V. Mechtcherine, V. Khavrus, D. Maier, M. Mende, M. Ritschel, A. Leonhardt**, Dispersion of carbon nanotubes and its influence on the mechanical properties of the cement matrix. *J. Cement & Concrete Composites*, 34, 1104, (2012).
2. **Junrong Yu, Nadia Grossiord, Cor E. Koning, Joachim Loos**, Controlling the dispersion of multi-wall carbon nanotubes in aqueous surfactant solution. *Carbon* 45 (2007) 618 – 623
3. **Rausch J., Zhuang RC., Mader E.** Surfactant assisted dispersion of functionalized multi-walled carbon nanotubes in aqueous media. *Composites* 2010:1038-46.
4. **Grossiord N., Regev O., Loos J., Meuldijk J., Koning C.** Time-dependent study of the exfoliation process of carbon nanotubes in aqueous dispersion by using UV-vis spectroscopy. *Anal Chem* 2005;77:5135–9.
5. **Sang Wjn Kim, Taehoon Kim, Yem Seung Kim, Hong Soo Choi, Hyeong Jun Lim.** Surface modifications for the effective dispersion of carbon nanotubes in solvents and polymers. *Carbon* 50 (2012) 3 – 33.
6. **Datsyuk V., Kalyva M., Papagelis K., Parthenios J., Tasis D.** et.al. Chemical oxidation of multiwalled carbon nanotubes. *Carbon* 46 (2008), 833 – 840.
7. **S. Goyanes, G. R. Rubiolo, A. Salazar, A. Jimeno, M. A. Corcuera, and I. Mondragon**, «Carboxylation treatment of multiwalled carbon nanotubes monitored by infrared and ultraviolet spectroscopies and scanning probe microscopy», *Diamond and Related Materials*, vol. 16, no. 2, pp. 412 – 417, 2007.
8. **K. Balasubramanian and M. Burghard**, «Chemically functionalized carbon nanotubes», *Small*, vol. 1, no. 2, pp. 180 – 192, 2005
9. **Brian White, Sarbajit Banerjee, Stephen O'Brien, Nicholas J. Turro, Irving P. Herman**, Zeta-Potential Measurements of Surfactant-Wrapped Individual Single-Walled Carbon Nanotubes. *J. Phys. Chem. C* 2007, 111, 13684 – 13690.

10. **Шукин Е. Д.** Коллоидная химия: учеб. для ун-тов и химико-технолог. Вузов / Е. Д. Шукин, А. В. Перцов, Е. А. Амелина. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 2004. – 445 с.
11. **Брыков А. С.** Гидратация цемента: учеб. пособ. – 2008. – г. С. Петербург.
12. Modification of cement concrete multi-layer carbon nanotubes / G. I. Yakovlev, G. N. Pervushin, A. Korzhenko, A. F. Buryanov, I. A. Pudov, A. A. Lushnikova // Construction materials. – М. : 2011. – № 2. – P. 47 – 51.
13. **Llina Kondofesky-Mintova.** Fundamental Interactions between Multi-Walled Carbon Nanotubes (MWCNT), Ca<sup>2+</sup> and Polycarboxilate Superplasticizers in Cementitious System. Llina Kondofesky-Mintova, Johann Plank. // Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete. Proceedings Tenth International Conference Prague, Czech Republic, October 2012. – P. 423 – 434.
14. **Maria S. Konsta-Gdoutors, Zoi S. Metaxa, Surendra P. Shah.** Multi-scale mechanical and fracture characteristics and early-age strain capacity of high performance carbon nanotube/cement nanocomposites. Cement & Concrete Composites 32(2010) 110 – 115
15. **Maria S. Konsta-Gdoutors, Zoi S. Metaxa, Surendra P. Shah.** Highly dispersed carbon nanotube reinforced cement based materials. Cement & Concrete Composites 40(2010) 1052 – 1059.

## УДК 69.05

### ОРГАНИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕРАБОТКОЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ

*П. П. Олейник, д. т. н., проф., В. И. Бродский, к. т. н., доц.*

*Московский государственный строительный университет (ГОУ ВПО МГСУ), г. Москва*

**Ключевые слова:** организация управления, система, строительные отходы, структура, подготовка, систематизация

Система управления переработкой строительных отходов представляет комплекс взаимосвязанных мероприятий, работ и задач организационного, технического, технологического и экономического характера, обеспечивающих планомерный и непрерывный сбор, сортировку, транспортирование, переработку строительных отходов и получение вторичного сырья (материала) с заданными технико-экономическими показателями.

Такая система предназначена для обеспечения целенаправленной деятельности служб заказчика, строительных, проектных, транспортных, снабженческих организаций и перерабатывающих предприятий за счет согласованности действий, сбалансированности трудовых и материально-технических ресурсов.

Федеральный классификационный каталог отходов включает более двадцати наименований строительных отходов, включающих отходы бетона, железобетона, линолеума, сколы асфальтобетона, лом черных и цветных металлов, стекломой и др. Основным источником их образования является строительное производство в результате выполнения разнообразных работ по ремонту и реконструкции зданий и сооружений, новому строительству, сносу (разборке) ветхого жилья. Например, для Московского региона объем строительных отходов при ремонте зданий и сооружений составляет 58,2 %, снос (демонтаж) – 29,3 %. В то же время в стройиндустрии отходы образуются в результате некондиции и брака железобетонных конструкций и составляют около 3,5 %.

Проведенный анализ производственной деятельности строительных организаций при новом строительстве, реконструкции и ремонте объектов позволил установить и построить графическую интерпретацию особенностей среднегодовых и среднеквартальных распределений объемов строительных отходов, а анализ предприятий стройиндустрии позволил построить графическую интерпретацию количественного изменения объемов некондиции и брака изделий во временном интервале, взятом в годовых и квартальных периодах (рис. 1).

Все это указывает на необходимость создания полноценной системы управления переработкой строительных отходов, содержание и целевая направленность которой выдвигают следующие основные принципы:

- межведомственный характер управления строительными отходами;
- упорядочение и унификация всех форм документооборота;
- создание единых технических, организационно-технологических и планово-