

## **ОЦЕНКА УПРУГО-ДЕФОРМАТИВНЫХ СВОЙСТВ ТЯЖЕЛОГО ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА, МОДИФИЦИРОВАННОГО УГЛЕРОДНЫМИ НАНОМАТЕРИАЛАМИ**

*РЯБЧИКОВ П.В., БАТЯНОВСКИЙ Э.И., ЯКИМОВИЧ В.Д.*

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь

### **Введение.**

В материале статьи приведены результаты экспериментальных исследований влияния углеродных наноматериалов (УНМ) на ряд упруго-деформативных характеристик тяжелого (высокопрочного) бетона. Исследовано влияние различных дозировок УНМ на изменение усадки твердеющего бетона во времени из смесей, характеризующихся диапазоном консистенций, соответствующим наиболее широко применяемым в строительном производстве (низкопластичные, высокопластичные и литые); проведены исследования по оценке влияния УНМ на модуль упругости бетона в возрасте 28 суток, на примере бетона номинальной прочностью 110...120 МПа разной подвижности - в диапазоне марок П1...П5 (литая смесь). Этот выбор был сделан с учетом ожидаемой востребованности строительной отрасли в ближайшей перспективе. Востребованность материала большей прочности проблематична и определение его свойств должно быть целенаправленным под конкретные условия использования.

### **Материалы для тяжелого высокопрочного бетона.**

В качестве вяжущего для бетона использовали портландцементы отечественных заводов марок: ПЦ 500 – Д0 по ГОСТ 10178 [1], соответствующие классу СЕМ I 42,5 RN по СТБ ЕН 197-1 [2].

В качестве заполнителей для бетона использовались материалы со следующими характеристиками:

*Песок* – природный (мытый по ГОСТ 8736-93[3]); с модулем крупности:  $M_k \sim 2,8 \dots 3,0$ ; насыпной плотностью:  $\rho_0 \sim 1560 \text{ кг/м}^3$ ; плотностью зерен:  $\rho_3 \sim 2650 \text{ кг/м}^3$ ;

*Щебень гранитный* (Микашевичи) по ГОСТ 8736-93 [4] фракций 5...10 и 5...20 мм; прочностью (по дробимости)  $\geq 110$  МПа, насыпной плотностью:  $\rho_0 \sim 1380$  кг/м<sup>3</sup> и 1410 кг/м<sup>3</sup>; плотностью зерен:  $\rho_3^0 \sim 2700$  кг/м<sup>3</sup>;

*Щебень гранитный кубовидный* по СТБ 1311-2002 [5] фракции 2...4; 4...6,2 и 6,2...12 мм; прочностью (по дробимости)  $\geq 110$  МПа, насыпной плотностью:  $\rho_0 \sim 1360...1420$  кг/м<sup>3</sup>; плотностью зерен:  $\rho_3^0 \sim 2700$  кг/м<sup>3</sup>.

Микронаполнители – микрокремнезем и каменная мука.

*Микрокремнезем* – в соответствии с требованиями СТБ EN 197-1-2007 [2] с содержанием аморфного диоксида кремния не менее 85 % по массе; потери при прокаливании не более 4,0 %; удельная поверхность (по методу БЭТ)  $\sim 15,0$  м<sup>2</sup>/г (при использовании приборов типа «ПСХ»  $S_{уд}^{МК} \sim 3,0$  м<sup>2</sup>/г или 30 000 см<sup>2</sup>/г);

*Каменная мука* – в качестве каменной муки использовали молотый гранитный отсев РУПП «Гранит». Степень его измельчения равна  $S_y \sim 0,3$  м<sup>2</sup>/г (по прибору типа «ПСХ») т.е. соответствует тонине стандартных цементов. Эта «каменная мука» характеризуется плотностью:  $\rho_{км} \sim 2740$  кг/м<sup>3</sup>, насыпной плотностью:  $\rho_{км}^0 \sim 1100$  кг/м<sup>3</sup>, водопотребностью - коэффициентом «нормальной» густоты:  $K_{км} \sim 0,22 - 0,24$ .

*Добавка-гиперпластификатор «Стахемент 2000»* - пластифицирующая добавка отечественного производства с использованием компонентов, поставляемых из Чехии. По эффективности пластифицирующего действия относится к пластифицирующим добавкам I группы согласно СТБ 1112-98 [6].

*Добавка-гиперпластификаатор «Sika ViscoCrete»* производства фирмы «Sika» (Швейцария) по СТБ 1112-98.

В исследованиях использовали углеродные наноматериалы (УНМ), полученные в институте «ИТМО» им. А.В. Лыкова НАН Беларуси по разным технологиям и из различающегося исходного сырья, которые предоставлялись в БНГУ под кодовыми наименованиями или в виде порядкового номера вещества.

### **Общая методика исследований.**

На начальных этапах работ были подобраны составы бетона, обеспечивающие разный уровень его прочности на сжатие в диапазоне значений от 60 до 150 МПа.

Оценивая изменения прочности образцов (размеры стандартные, ГОСТ 10180-90 [7]) бетона при введении различных УНМ (при прочих равных условиях) выявлены наиболее перспективные (обеспечивающие положительный эффект – рост прочности бетона) их виды. Используя выделенные эффективные разновидности УНМ дополнительно оценивали их воздействие в различных дозировках, определяя "внутривидовое" оптимальное содержание УНМ в бетоне.

На основании полученных данных по прочности бетона и наиболее эффективных видах углеродных наноматериалов исследовали упруго-деформативные характеристики бетона.

Основное внимание было уделено пластичным бетонным смесям, т.к. они преимущественно используются в монолитном строительстве и при производстве сборного бетона и железобетона. Для исследований был использован весь стандартизированный диапазон консистенций бетонных смесей, которые характеризуются марками по подвижности П1...П5.

По согласованию с организацией – заказчиком исследований, исследования упруго-деформативных характеристик высокопрочного бетона осуществлены на примере одного номинального состава бетона, прочностью на уровне  $110 \pm 10$  МПа, который характеризуется приемлемыми технико-экономическими показателями: достаточной прочностью при рациональном содержании цемента (500 кг на  $1 \text{ м}^3$  бетона), его разновидностью (портландцемент марки: ГОСТ 10178-85 – ПЦ 500-Д0, или класса: СТБ ЕН 197-1 – СЕМ I 42,5 R), а также умеренным (до 10...15 % от массы цемента) содержанием добавок микрокремнезема и каменной муки (молотый гранитный отсев).

### **Основные результаты исследований.**

**Усадка бетона** вызывается физико-химическими процессами, развивающимися в бетоне (цементном камне) при твердении, и изменениями его влажности. Суммарная величина деформаций усадки складывается из ряда составляющих, из которых наиболее существенное значение имеют влажностные, контракционные и карбонизационные деформации, названные так по виду определяющего фактора.

В высокопрочных бетонах, характеризующихся повышенной плотностью и сниженным количеством воды затворения, развивается не пластический вид усадки: «аутогенная» [8], причины которой кроются в продолжении реакций гидратации цемента и связанным с этим явлением перераспределением воды, количество которой исходно близко к теоретически необходимому для протекания реакций между ними.

Определение усадки бетона производили согласно ГОСТ 24544-81\* [8].

Испытания по определению деформаций усадки начались на 1 сутки после изготовления образцов. В течение времени испытаний образцы хранились в нормально-влажностных условиях (температура  $(20 \pm 3)^{\circ}\text{C}$ , относительная влажность  $-(90 \pm 5)\%$ ).

Обработанные результаты экспериментов представлены на рисунках 1...5.

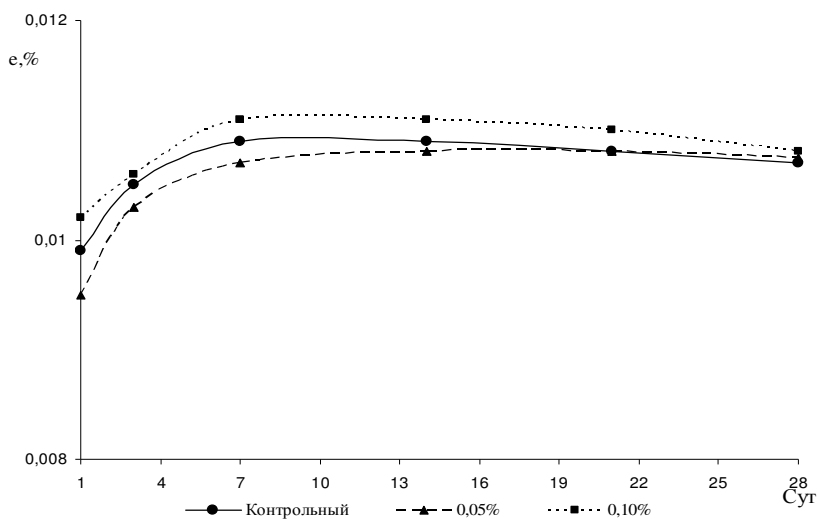


Рис. 1. Изменение усадки во времени на бетоне подвижностью П1

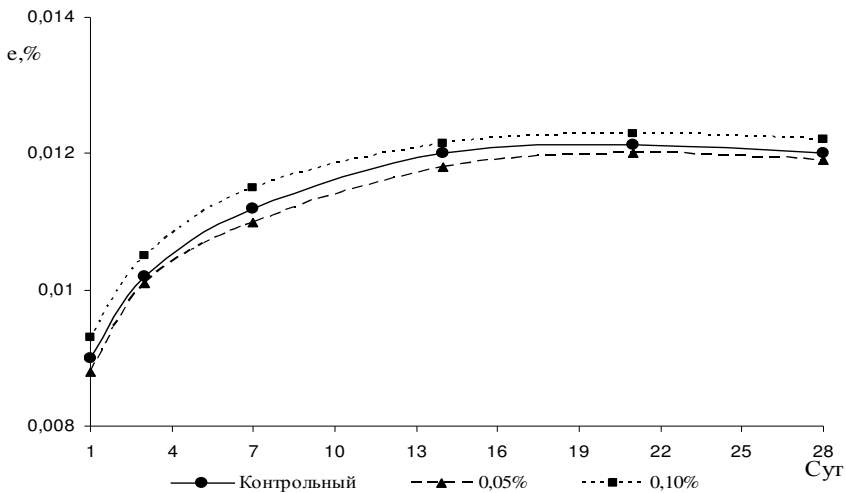


Рис. 2. Изменение усадки во времени на бетоне подвижностью П2

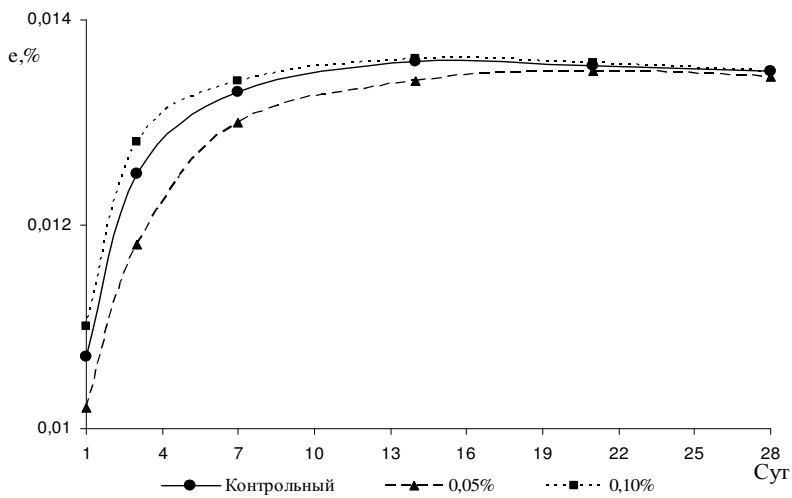


Рис. 3. Изменение усадки во времени на бетоне подвижностью П3

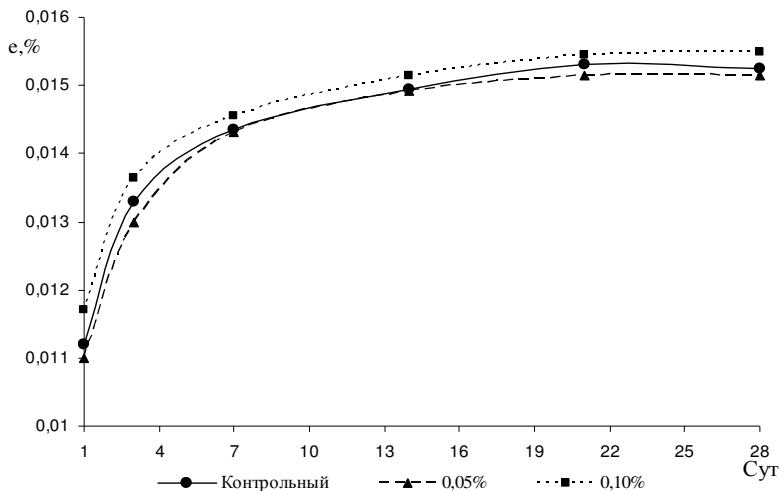


Рис. 4. Изменение усадки во времени на бетоне подвижностью П4

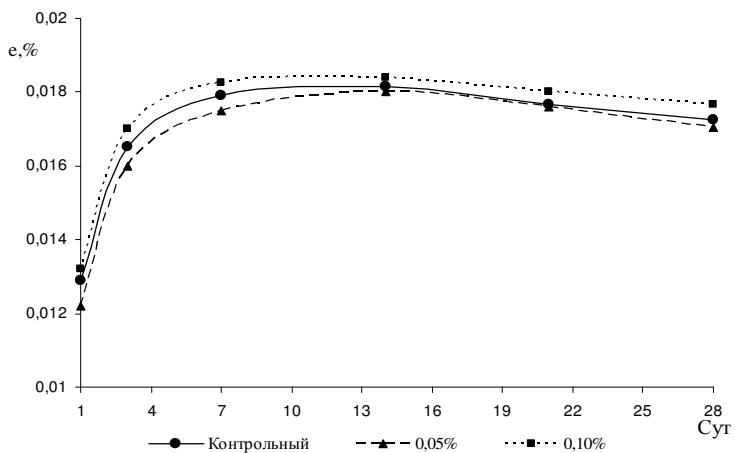


Рис. 5. Изменение усадки во времени на бетоне подвижностью П5

### Модуль упругости бетона.

Деформации бетона при приложении нагрузки зависят от его состава, свойств компонентов, условий твердения, скорости подачи нагрузки и другие факторов. Практически всегда проявляется взаимозависимость: с увеличением прочности бетона уменьшается его деформативность.

Определение модуля упругости проводили согласно требований ГОСТ 24452-80 [9].

Испытание производилось путем постепенного (ступенями) нагружения образцов-призм осевой сжимающей нагрузкой до разрушения при определении призмной прочности и до уровня 30% разрушающей нагрузки с измерением в процессе нагружения образцов их деформации.

Призмная прочность и модуль упругости вычислялись по определенным в процессе испытания нагрузкам ( $P_p$  и  $0,3P_p$ ) и продольным и поперечным относительным упругомгновенным деформациям ( $\varepsilon_{1y}$  и  $\varepsilon_{2y}$ ).

При проведении испытаний нагружение образцов до уровня нагрузки, равной  $(40 \pm 5\%) R_p$  производилось ступенями, равными 10 % ожидаемой разрушающей нагрузки, со скоростью нагружения на каждой ступени  $(0,6 \pm 0,2)$  МПа/с.

На каждой ступени производилась выдержка нагрузки от 4 до 5 мин. и снимались отсчеты по приборам в начале и в конце выдержки ступени нагрузки.

Данные результатов испытаний образцов бетона приведены в таблице 1.

Таблица 1.

#### Характеристики бетона

Вид бетона по подвижности	Дозировка УНМ, % от МЦ	Прочностные свойства		Упруго-деформативные свойства	
		кубиковая прочность на сжатие, МПа	призмная прочность на сжатие, МПа	модуль упругости, $\times 10^3$ , МПа	коэффициент Пуассона
П1	0	116	84,0	47,3	0,23
П1	0,05	121	86,9	48,5	0,21
П1	0,10	113	84,5	43,5	0,23
П5	0	104	80,3	45,0	0,24
П5	0,05	110	81,9	46,4	0,22
П5	0,10	108	80,0	44,8	0,23

#### Оценка результатов исследований.

Усадка бетона. На бетонных образцах с подвижностью П1 усадка постепенно увеличивается в начальный период твердения (до 14

суток), затем наблюдается стабилизация и постепенное уменьшение усадки к проектному возрасту (28 суток). Усадка образцов с добавкой УНМ при дозировке 0,05% была несколько ниже контрольных образцов, с постепенным их выравниванием к 28 суточному возрасту. У образцов с дозировкой УНМ 0,1 % усадка на протяжении всего времени твердения была выше контрольных, но с постепенным снижением к 28 суточному возрасту.

На бетонных образцах с подвижностью П2 усадка увеличивается равномерно с постепенным выравниванием и даже незначительным уменьшением к 28 суточному возрасту. Различия между контрольными образцами и с добавкой УНМ практически незаметны.

На образцах с подвижностью П3 наблюдается довольно значительный рост усадки в первую неделю твердения, с последующим замедлением ее роста и выравниванием к возрасту 28 суток. Образцы с дозировкой УНМ 0,05% в первые две недели твердения показывали несколько меньшую усадку, по сравнению с контрольными, но к 28 суткам эта разница практически с nivelировалась.

На образцах с подвижностью П4 наблюдается стабильный рост усадки образцов с постепенным выравниванием к проектному возрасту.

На бетонных образцах с подвижностью П5 наблюдается увеличение усадки в первые 7 суток с постепенным снижением последней до достижения проектного возраста в 28 суток. Образцы с УНМ при дозировке 0,10% показали большую усадку по сравнению с контрольными на протяжении всего времени твердения. Образцы с УНМ при дозировке 0,05% мало отличались от контрольных с небольшим снижением усадки в возрасте 7 и 28 суток.

На основании изложенного можно сделать обобщенный вывод о незначительном положительном влиянии УНМ в оптимальной (0,05% от МЦ) дозировке на развитие процесса усадки при твердении бетона. Очевидно, это связано с ранее выявленным влиянием УНМ на процесс гидратации цемента, что способствует росту плотности и прочности цементного камня и бетона в целом.

*Модуль упругости бетона.* Повышение модуля упругости высокопрочного бетона, в большой степени связано именно с повышением его прочности, а не с фактом введения вещества УНМ. Это следует из того, что с увеличением дозировки УНМ сверх оптимальной (до 0,1% от МЦ) изменение прочности бетона (кубиковой



и призмной) незначительно, а вот модуль упругости закономерно и достаточно заметно снизился. Например, по отношению к бетону (ОК ~ 3см; П1) контрольных составов (без УНМ), примерно, на 8%, а по отношению к бетону с 0,05% УНМ - на 13%. Для бетона из литой смеси (П5) это снижение менее значительно, но также очевидно наблюдается.

Можно предположить, что это проявление эффекта «передозировки» вещества УНМ, избыточное количество которого в виде мельчайших частиц попадает в места контактов гидрокристаллов новообразований твердеющего цемента, ослабляя тем самым силы сцепления между ними.

В бетоне из литых смесей проявление этого эффекта менее заметно, потому, что в нем аналогичные свойства проявляют молекулы органических составляющих добавки-пластификатора, дозировка которых в составах «П5» в три раза превышает таковую для составов «П1». На этом фоне действие избыточного вещества УНМ «нивелируется».

Отмеченное явление подтверждается величиной коэффициента Пуансона, отражающего отношение между «относительно-упругими» поперечными и продольными деформациями и который закономерно снижается для бетона с "орт УНМ" и растет при увеличении его дозировки.

На основании изложенного можно сделать вывод об отсутствии прямой зависимости модуля упругости высокопрочного бетона от введения в его состав вещества УНМ в количестве до 0,05% от массы цемента. Незначительный рост (на (2...3)%) связан с повышением прочности бетона на сжатие (на (5...7)%) испытанных образцов.

### **Выводы.**

Анализ данных о влиянии углеродных наноматериалов на исследованные характеристики тяжелых (высокопрочных) бетонов свидетельствуют об их положительном воздействии на всю совокупность свойств.

Результаты проведенных испытаний по определению упруго-деформативных характеристик высокопрочного бетона показали, что добавка нановещества в дозировке 0,05% от массы цемента способствует незначительному (на (2...3)%) росту модуля упругости

бетона, как отражение роста его прочности бетона на сжатие в сравнении с контрольными (без УНМ) образцами.

Положительное влияние в виде снижения усадки твердеющего бетона оказывают испытанные разновидности УНМ при дозировке в 0,05% от массы цемента; при увеличении дозировки вещества УНМ до 0,1% наблюдается увеличение значений усадки до уровня контрольных образцов, а в некоторых случаях и их превышение. Следует отметить, что эффект снижения усадки составляет (5..7)%, по сравнению с контрольными образцами, и связан с ранее выявленным влиянием УНМ на развитие реакций цемента с водой, в результате которых возникает большее количество гидрокристаллических новообразований и растет плотность формирующейся структуры цементного камня. Одним из следствий данного воздействия УНМ является снижение усадочных явлений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 10178-85 Портландцемент. Шлакопортландцемент. Технические условия.
2. СТБ EN 197-1-2007 Цемент Ч.1. Состав, спецификации и критерии соответствия общих цементов.
3. ГОСТ 8736-93 Песок для строительных работ. Технические условия.
4. ГОСТ 8267-93 Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия.
5. СТБ 1321-2002 Щебень кубовидный из плотных горных пород. Технические условия.
6. СТБ 1112-098 Добавки для бетонов. Общие технические условия.
7. ГОСТ 10180-90 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам.
8. ГОСТ 24544-81\* Бетоны. Методы определения деформации усадки и ползучести.
9. ГОСТ 24452-80 Бетоны. Методы определения призменной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуансона.