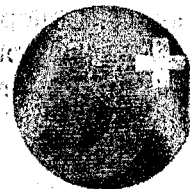




# АС'05



## АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО – 2005

### ARCHITEKTUR UND BAUWESEN – 2005

#### I Международный научно-практический семинар I Internationales wissenschaftlich-praktisches Seminar

### НОВЫЕ ВИДЫ КОНСТРУКЦИОННЫХ БЕТОНОВ В БЕЛАРУСИ

*Блещик Н. П.*

#### ВЕДЕНИЕ

К конструкционным бетонам в Беларуси относят бетоны, используемые в несущих и ограждающих конструкциях зданий и сооружений и обеспечивающие, главным образом, прочность, жесткость, трещиностойкость несущих конструкций, за исключением специальных бетонов, предназначенных для конструкций, эксплуатируемых в особых условиях или для конструкций специального назначения, к которым относятся теплоизоляционные, жаростойкие, химически стойкие, гидротехнические, радиационно-защитные, декоративные, дисперсно-армированные, полимербетоны, бетонополимеры, полимерцементные, шлакощелочные и другие бетоны. Минимальный класс по прочности на сжатие конструкционных бетонов составляет С 8/10.

В качестве новых видов конструкционных бетонов в статье рассматриваются высокопрочные бетоны и бетоны с повышенной консистенцией бетонной смеси.

Появление новых видов бетонов связано, в основном, с развитием каркасных систем зданий с несущими конструкциями из монолитного и сборно-монолитного железобетона. Одним из примеров таких систем может являться Универсальная открытая архитектурно-строительная система многоэтажных жилых и гражданских зданий нового поколения, удостоенная государственной премии Республики Беларусь 2000 года [1,2]. Конструкции этой системы состоят из несущего пространственного монолитного или сборно-монолитного каркаса с плоскими дисками перекрытий и поэтажно опертых наружных и внутренних стен, возводимых, как правило, из ячеистых бетонов.

В процессе реализации этой системы в Республике Беларусь и в различных регионах Российской Федерации возникла необходимость решения ряда технических проблем, относящихся не только к вопросам организации и технологии возведения монолитных железобетонных конструкций, но и к основам бетоноведения. Успешное их решение должно обеспечить конкурентоспособность новых систем зданий по сравнению с типовыми панельными зданиями массовой застройки. При этом, прежде всего, необходимо обеспечить интенсивное, высококачественное, высокопроизводительное и малоэнергоёмкое строительство сборно-монолитных и монолитных каркасов зданий в любой период года.

С целью решения указанных технологических задач и дальнейшего развития основ бетоноведения в УП "Институт БелНИИС" под руководством автора ведутся комплексные исследования и научно-практические разработки по заданиям Минстройархитектуры РБ и хо-

<sup>1</sup> Блещик Николай Павлович, д. т. н., проф. (БНТУ, БелНИИС)

заявленным договорам с организациями Беларуси и Российской Федерации. В предлагаемой статье рассматриваются некоторые итоги этой работы и формулируются направления дальнейших исследований.

## 1. ВЫСОКОПРОЧНЫЙ БЕТОН\*

### 1.1. Эффективность применения высокопрочного бетона

В бывшем СССР высокопрочный бетон применялся при производстве сборных железобетонных изделий-колонн, различных типов балок и ферм [3–6].

В последние годы в Российской Федерации наблюдается увеличение объемов применения высокопрочного монолитного бетона – торговый комплекс на манежной площади, реконструкция кремля, теплотрассы МКАД и др.

В Беларуси производство железобетонных изделий из ВБ освоили Барановичский КЖБК и Минский ОАО "Завод сборного железобетона №1" [7–9]. Начало освоения высокопрочного монолитного бетона в Беларуси относится к 2003 году, когда была завершена под руководством автора по заданию Минстройархитектуры РБ в УП "Институт БелНИИС" научно-исследовательская работа: "Исследовать, разработать и внедрить энергосберегающую интенсивную технологию возведения монолитных каркасных зданий и сооружений из высокопрочного бетона" [10].

По данным [6, 9, 10, 11] применение бетона прочностью 60 МПа в колоннах гражданских зданий обеспечивает снижение расхода арматурной стали на 7,5 %, бетона – на 15 % и в колоннах бескрановых промзданий – соответственно на 39 и 40 %. При использовании сверхпрочного бетона класса С 80/100 взамен бетона класса С 30/37 расход арматуры может быть снижен на 15..25 % и бетона – на 30..70 % [12].

### 1.2. Особенности композиций высокопрочного бетона

Исследованиями [13–15] показано, что технологические и физико-технические свойства высокопрочных бетонов не могут аппроксимироваться простейшими эмпирическими зависимостями, отражающими влияние лишь активности цемента, цементно-водного отношения и, в отдельных случаях, объемного содержания цементного теста. Для них наиболее приемлемым является структурный подход, при котором учитывается структура цементного камня и бетона и физико-химические свойства исходных материалов.

На основании результатов исследований, выполненных в институте БелНИИС за последние годы в рамках структурного подхода, предложено описывать прочность бетона в случае разрушения по цементному камню в виде произведения функций:

$$R_{b(ЦК)} = k_{УВ} \cdot \phi(R_{\text{ввяж}}) \cdot \phi(m_{ЦК}) \cdot \phi([\text{Ц}/\text{В}]_{\text{пр}}) \cdot \phi(R_{\text{кр.з}}), \text{ [МПа]} \quad (1)$$

Функции уравнения (1) – соответственно, активности вяжущего, относительного содержания цементного камня, приведенного цементно-водного отношения и прочности крупного заполнителя, рассчитываются по формулам:

$$\phi([\text{Ц}/\text{В}]_{\text{пр}}) = 2,5 [\text{Ц}/\text{В}]_{\text{пр}}^{-0,7} \quad (2)$$

где  $[\text{Ц}/\text{В}]_{\text{пр}}$  – приведенное цементно-водное отношение:

$$[\text{Ц}/\text{В}]_{\text{пр}} = \frac{\text{Ц}/\rho_{\text{ц}} + \text{Дн}/\rho_{\text{д.н}}}{(\text{В} - \text{В}_{\text{п}})/\rho_{\text{в}} + m_{\text{воз}}} \quad (3)$$

где Ц, Дн – расходы цемента и дисперсного наполнителя в кг на 1 м<sup>3</sup> бетона;

$\rho_{\text{ц}}$ ,  $\rho_{\text{д.н}}$ ,  $\rho_{\text{в}}$  – плотности цемента, дисперсного наполнителя и воды, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\rho_{\text{в}} = 1000 \text{ кг/м}^3$ ;

$$\phi(R_{\text{ввяж}}) = k_{\text{д.н}} (0,45 R_{\text{ц}} + 20), \text{ [МПа]}, \quad (4)$$

\* В исследованиях приняли участие М.Н. Рыскин, И.В. Коваль, А.Н. Рак

где  $R_{ц}$  – активность цемента по ГОСТ 310.4-81;

$k_{д.н.}$  – коэффициент, учитывающий влияние дисперсного наполнителя;

$$\varphi(m_{цк}) = 1,4 - m_{цк}, \quad (5)$$

где  $m_{цк}$  – относительное содержание цементного камня в бетоне:

$$\begin{aligned} m_{цк} &= Ц/\rho_{ц} + Дн/\rho_{д.н} + (В - В_{п})/\rho_{в} + m_{воз} = \\ &= m_{Т} + m_{воз} = m_{Т.1} + m_{п.3}, \end{aligned} \quad (6)$$

область определения функции (5):  $m_{цк} \geq 1,25 \cdot m_{п.3}$ ;

$$\varphi(R_{кр.з}) = 1 + 2,0 \cdot 10^{-5} (R_{кр.з} - 140) (k_{ув} \cdot \varphi(R_{вяж}) \cdot \varphi([Ц/В]_{ир}) - 35), \quad (7)$$

или

$$\varphi(R_{кр.з}) = 1 + 5 \cdot 10^{-3} (1 - 0,125(Dp - 5)) (k_{ув} \cdot \varphi(R_{вяж}) \cdot \varphi([Ц/В]_{ир}) - 35), \quad (8)$$

где  $R_{кр.з}$  – прочность горной породы щебня на сжатие по ГОСТ 8269.0-97;

$Dp$  – дробимость щебня (%) по ГОСТ 8269.0-97.

Уравнение прочности бетона при разрушении по заполнителю имеет вид:

$$R_{б(з)} = \frac{k_{разд} - 3,5 \cdot 10^{-2} \varphi(R_{кр.з})}{1 + 0,115 \cdot \varphi(R_{кр.з})} R_{кр.з}, \quad [\text{МПа}], \quad (9)$$

где  $k_{разд}$  – коэффициент, учитывающий степень раздвижки зерен заполнителя цементным тестом (камнем):

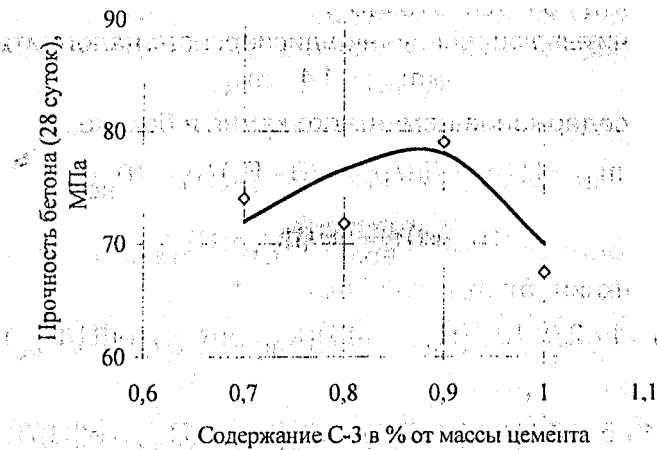
$$k_{разд} = 0,05 \cdot \ln \left( \sqrt[3]{\frac{1 - m_{п.3}}{1 - m_{цк}}} - 1,01 \right) + 1,1. \quad (10)$$

Влияние содержания цементного камня в бетоне на его прочность и подвижность бетонной смеси следует учитывать дифференцированно в зависимости от объемной концентрации цементного теста, обуславливающего раздвижку зерен заполнителя, и объема цементного теста, находящегося в межзерновом пространстве заполнителя. В этом случае учитывается влияние как межзерновой пустотности смеси крупного и мелкого заполнителей, так и степени раздвижки зерен заполнителей и соответственно концентрации напряжений в контактной зоне.

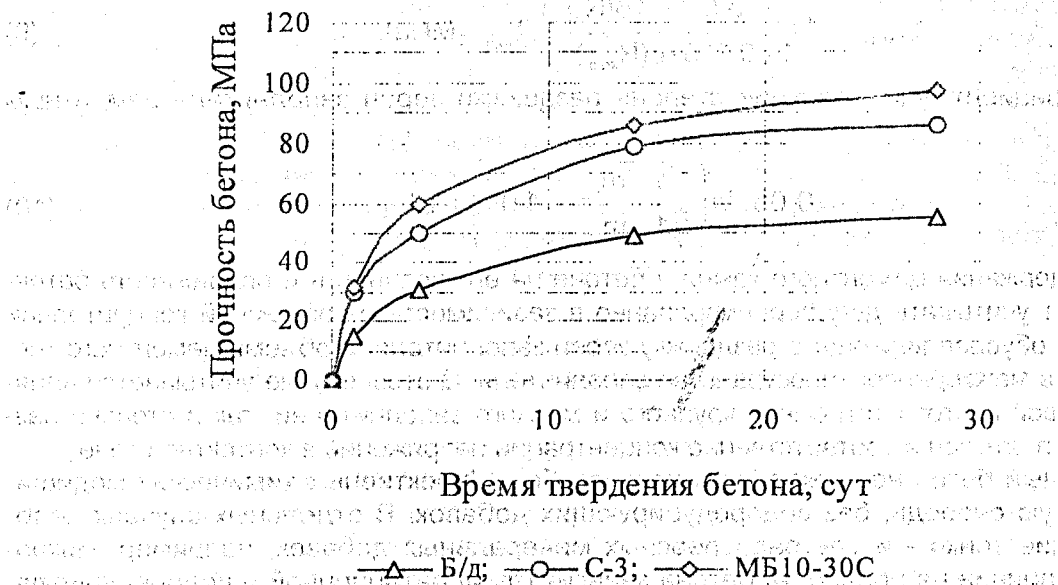
Высокопрочный бетон не может быть получен без эффективных химических модификаторов и, в первую очередь, без водоредуцирующих добавок. В отдельных случаях необходимо применение тонко- и ультрадисперсных минеральных добавок, например, микрокремнезема. Их влияние на прочность бетона зависит от гидратационной и водоредуцирующей способности, относительного к массе цемента содержания, температурных условий твердения и возраста бетона. В зависимости от требуемой прочности бетона могут применяться суперпластификатор С-3, гиперпластификаторы Stachement-2000, Sica Visco Crete S-600 и др. В настоящее время разрабатываются композиции и технология производства отечественного гиперпластификатора.

Рациональное содержание водоредуцирующих добавок должно определяться исходя из достижения максимального эффекта пластификации, т.е. достижения минимального значения коэффициента нормальной густоты цементного теста с учетом количества добавки, адсорбируемой поверхностью зерен заполнителя, и ее влияния на прочность бетона. Результаты исследований, в т.ч. представленные на рис. 1, позволили установить, что рациональное содержание С-3 для высокопрочных бетонов и цементов ОАО "Красносельскцемент" составляет 0,9% от массы цемента.

Применение эффективных пластификаторов обеспечивает кроме того увеличение темпа набора прочности бетона. Представленные на рис. 2 графики, отражающие кинетику твердения бетонов с одинаковой подвижностью смесей (9...10 см осадки конуса) свидетельствует о том, что прочность бетона, модифицированного добавками С-3 и МБ10-30С (смесь С-3 и микрокремнезема), в суточном возрасте почти в два раза выше прочности бездобавочного бетона (Б/Д). Соответственно относительная прочность составляет 35 и 27%.



**Рисунок 1** – Прочность бетона, модифицированного добавкой С-3



**Рисунок 2** – Интенсивность набора прочности модифицированного бетона

Результаты исследований, связанных с поиском рациональных значений соотношения масс мелкого и крупного заполнителей ( $n$ ) в высокопрочных бетонах позволили установить следующую эмпирическую зависимость "n" для бетонов классов С 35/45... С 65/80:

$$n = 0,65 + 0,2M_{кр} = \frac{C + D_{II}}{1000}, \quad (11)$$

где  $M_{кр}$  – модуль крупности песка;

$C, D_{II}$  – соответственно, содержание цемента и тонкодисперсного наполнителя,  $кг/м^3$ .

Зависимость действительна для пластифицированных бетонных смесей с марками по удобоукладываемости П1... П4 и содержанием вяжущего от 500 до 650  $кг/м^3$ .

Рациональные композиции ВБ предложено определять путем совместного решения полученных уровней прочности бетона и подвижности или жесткости бетонной смеси, учитывающие влияние всех указанных факторов, и последующей корректировки по результатам испытаний экспериментальных образцов бетона. Методика определения представлена в Рекомендациях [17].

Разработанные рекомендации и результаты исследований получают широкое внедрение при строительстве современных жилых и гражданских зданий.

Освоение высокопрочных бетонов в монолитном строительстве в г. Минске впервые приступил ОАО "Стройтрест №4", при возведении 16-ти этажного каркасного жилого дома по ул. Захарова, сданного в эксплуатацию в 2003 году. Бетон класса С 35/45 с маркой удобоукладываемости бетонной смеси П4 поставлял завод ОАО "Минскжелезобетон". Из высокопрочного бетона возводились колонны, диафрагмы жесткости и плиты перекрытий.

Строительство аналогичных жилых домов осуществляет ОАО "Стройтрест №1" по проспекту Независимости и в микрорайоне Серебрянка.

Конструктивные системы каркасных зданий, разработанные УП "Институт БелНИИС" с применением высокопрочных бетонов и интенсивной энергосберегающей технологии, широко внедряются в России в городах: Москве, Белгороде, Ростове-на-Дону, Нижнем Новгороде, Ноябрьске и др.

### **1.3. Направления дальнейших исследований**

Полученные результаты исследований являются лишь первым этапом на пути развития высококачественных, долговечных, ресурсо- и энергоэкономных железобетонных конструкций из высокопрочного бетона. Для обеспечения широкого внедрения таких конструкций в строительную практику с высоким уровнем технологии необходимо продолжить исследования и научно-технические разработки с целью повышения уровня прочности бетона и снижения удельных материальных, трудовых и энергетических затрат. Научный и технический потенциал Беларуси вполне способен обеспечить достижение этих целей в течение 4-5 лет. При этом должны быть решены следующие научно-практические задачи.

1. Выполнить исследования, разработать композиции и технологию промышленного производства отечественных модификаторов бетона нового поколения, в том числе: гиперпластификаторов, пеногасителей, замедлителей схватывания цемента, ускорителей твердения бетона, противоморозных добавок, ингибиторов коррозии арматуры.

2. Продолжить разработку структурной теории прочности модифицированного бетона и методов прогнозирования его физико-технических свойств, формирующихся в различных температурно-влажностных условиях.

3. Разработать структурные модели технологических свойств бетонных смесей, обеспечивающие возможность надежного проектирования композиций модифицированного бетона по заданным его техническим характеристикам и показателям удобоукладываемости.

4. Разработать эффективные технологические режимы укладки и уплотнения бетонных смесей в заводских и построечных условиях.

5. Разработать малотрудоемкие и энергосберегающие методы ухода за бетоном в построечных условиях, обеспечивающие достижение контролируемых показателей бетона в заданные сроки при любых температурно-влажностных условиях.

## **2. БЕТОНЫ С ПОВЫШЕННОЙ КОНСИСТЕНЦИЕЙ БЕТОННОЙ СМЕСИ**

### **2.1. Общая характеристика**

Необходимость интенсификации процессов производства бетонных работ, снижения их трудоемкости и энергоемкости обусловили целесообразность применения бетонов с повышенной удобоукладываемостью бетонных смесей, характеризующейся осадкой конуса 18-22 см и расплывом конуса 50-75 см. Такие бетоны требуют особого подхода к определению составов, оценке технических свойств и назначению технологических режимов. Нельзя также упускать из вида возможность расслоения бетонных смесей и проявления сверхнормативной усадки бетона. Эти особенности требуют тщательного подбора гранулометриче-

*В исследованиях приняли участие М.Н. Рыскин, И.В. Коваль, А.Н. Рак*

ского состава заполнителей, увеличенного содержания теста с уменьшенным водовяжущим отношением, обязательного применения супер- или гиперпластификаторов и, в большинстве случаев, тонкодисперсных минеральных наполнителей.

В зарубежной практике наблюдается интенсивное распространение бетонов повышенной удобоукладываемости, вплоть до применения самоуплотняющихся (Self-compacting concrete) [18-22]. Выполненные экспериментально-теоретические исследования позволили сформулировать определенные требования к композициям таких бетонов. Основные из них следующие:

- объемное водовяжущее отношение должно находиться в пределах 0,8...1,1;
- общее объемное содержание вяжущего (цемент+дисперсный наполнитель) должно составлять 160...240 л.;
- объемная концентрация теста должна быть не менее 0,4, крупного заполнителя – не более 0,5, песка в смеси заполнителей – не мене 0,5;
- содержание воды в бетонной смеси не должно превышать 200 л.

Установленные пределы содержания компонентов бетона служат лишь ориентирами при подборе составов высокоподвижных бетонных смесей. Для назначения конкретных значений параметров состава приходится использовать трудоемкий и длительный метод проб и попыток. В связи с этим становится очевидной необходимость разработки структурных и математических моделей, отражающих влияние элементов структуры на основные технические и технологические свойства бетонов и позволяющих путем совместного решения полученных уровней рассчитывать содержание компонентов бетона и прогнозировать его эксплуатационные качества. Эти задачи в какой-то мере были решены нами при выполнении задания Минстройархитектуры РБ [16].

## 2.2. Технологические свойства бетонных смесей

Первые результаты исследований структуры и реологических свойств бетонной смеси в обобщенном виде автором представлены в [23], где впервые предложены новые элементы структуры бетонной смеси, с использованием которых разработаны аналитические зависимости важнейших механических и реологических свойств бетонной смеси, свежего и затвердевшего бетона. Полученные зависимости относятся к умеренно подвижным бетонным смесям. Однако общие подходы и отдельные предпосылки могут быть использованы при разработке структурных и математических моделей высокоподвижных смесей.

Результаты многолетних исследований свойств бетонной смеси и бетона позволили определить комплекс структурно-технологических характеристик, оказывающих существенное влияние на технологические, физико-механические и эксплуатационные свойства бетона. Основные из них следующие: содержание вяжущего в бетоне; минералогический состав клинкера и содержание гипса в цементе; его удельная поверхность; отношение масс мелкого и крупного заполнителей; их межзерновая пустотность в уплотненном состоянии; плотность и удельная поверхность заполнителей; вид и содержание химических модификаторов и минеральных добавок; относительное снижение коэффициента нормальной густоты теста из вяжущего; общая объемная концентрация теста, идущего на раздвижку зерен заполнителя и находящегося в межзерновом пространстве; эффективное водовяжущее отношение; относительное содержание объема воздуха в бетонной смеси; объемная концентрация геля и капиллярных пор; относительное количество связанной воды в геле.

Теоретические и экспериментальные исследования позволили выявить влияние каждой характеристик в отдельности и в их определенной совокупности на: подвижность бетонной смеси, определяемой осадкой или распылом конуса; условия заполнения опалубочных полостей с различным содержанием арматуры; прочность бетона в проектном возрасте и интенсивность набора прочности при температуре от 5 до 30°C; химическую, контракционную и влажностную усадки бетона. Влияние указанных характеристик отражено в полученных экспериментально-теоретических зависимостях, представляющих возможность проектировать номинальные составы бетона и по ним прогнозировать технические свойства и эксплуатационные качества бетона и железобетонных конструкций.



В рамках доклада, естественно, не имеется возможности представить полученные зависимости с обоснованием принятых допущений и физико-химических предпосылок. Многие из них подлежат дополнительной проверке и возможной корректировке по результатам накопления массива статистических данных. Между тем, уже в настоящее время с достаточно полным обоснованием можно приступить к широкому опытно-промышленному освоению разработанной технологии при научном сопровождении института БелНИИС. Для этой цели разработан необходимый комплект научно-технической и технологической документации, в том числе:

- Рекомендации по проектированию составов высокоподвижных модифицированных бетонных смесей;
- Рекомендации по производству бетонных работ с применением высокоподвижных модифицированных бетонных смесей;
- Типовая технологическая карта на производство бетонных работ при возведении монолитных зданий и сооружений с применением высокоподвижных модифицированных бетонных смесей в летних условиях;
- Типовая технологическая карта на производство бетонных работ при возведении монолитных зданий и сооружений с применением высокоподвижных модифицированных бетонных смесей в зимних условиях.

Ранее отмечалось, что обязательным условием при назначении композиций бетона повышенной консистенции является применение эффективных водоредуцирующих добавок. На рынке Беларуси имеются отечественный суперпластификатор С-3, импортные гиперпластификаторы Stachement-2000 и Sika Visco Crete S-600. Их влияние на технологические и физико-механические свойства исследованы в полном объеме [16]. На рис. 3 показано влияние различных модификаторов на характеристику РК (расплав конуса). В представленных опытах использовался цемент ОАО "Белорусский цементный завод" ПЦ 500 Д0 с  $K_{нг}=0,26$  и доломитовый минеральный порошок с удельной поверхностью  $390 \text{ м}^2/\text{кг}$ . Содержание цемента и доломитового порошка соответственно составляло  $415$  и  $155 \text{ кг/м}^3$ . Как следует из рисунка, наибольшую консистенцию бетонной смеси обеспечивают гиперпластификаторы. По сравнению с бетонными смесями, модифицированными суперпластификатором С-3, они обеспечивают увеличение расплава конуса на  $7 \text{ см}$ .

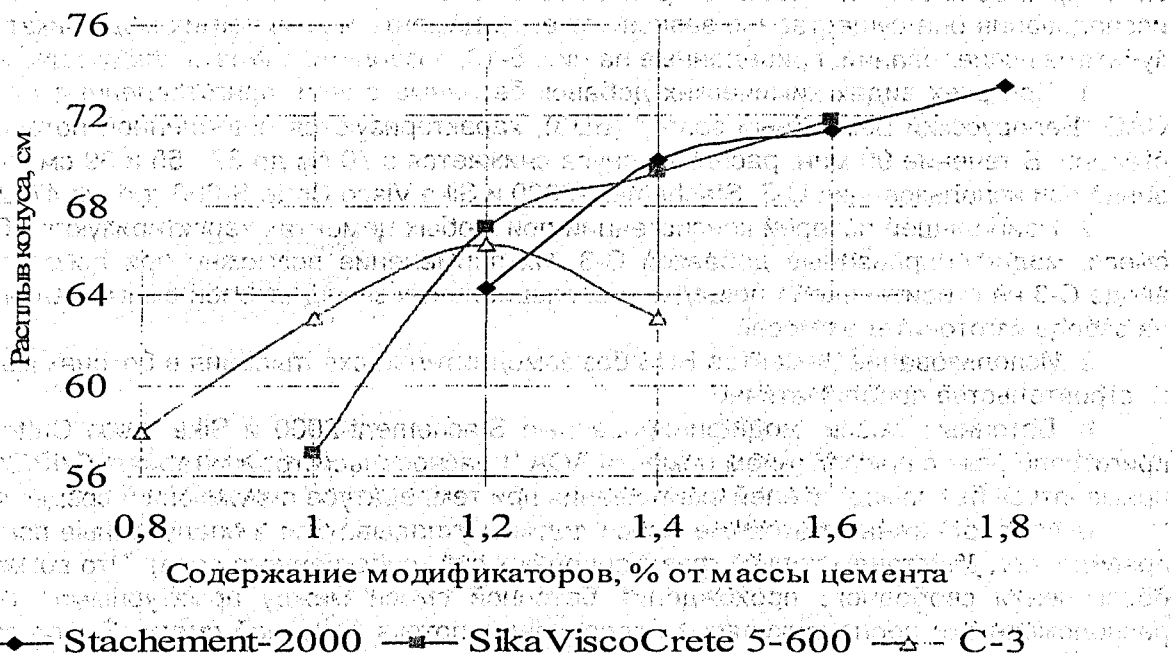
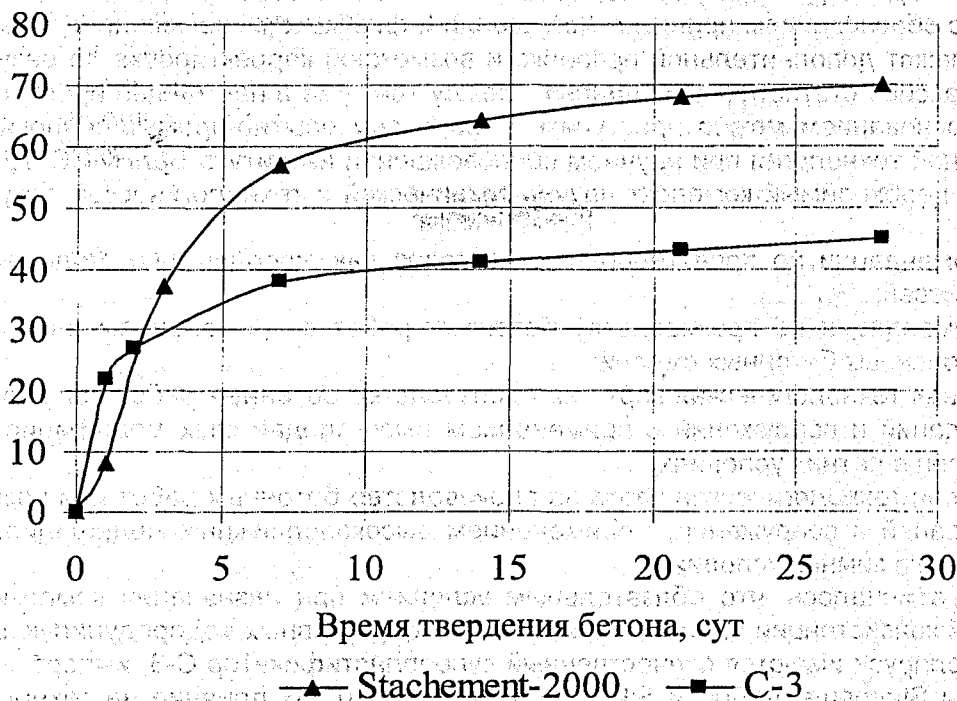


Рисунок 3. – Влияние вида и содержания модификаторов на расплав конуса



**Рисунок 4 – Интенсивность набора прочности модифицированного бетона**

Влияние модификаторов Stachement-2000 и C-3 на интенсивность набора прочности бетона в нормально-влажностных условиях показано на рис. 4, из которого следует, что Stachement-2000 обеспечивает увеличение прочности в 28-суточном возрасте по сравнению с прочностью бетона, модифицированного добавкой C-3, на 55%. В то же время в суточном возрасте прочность бетонов с добавкой Stachement-2000 на 60% меньше.

Для бетонов, используемых в монолитном строительстве, весьма важной технологической характеристикой является сохраняемость консистенции бетонной смеси. Как показали исследования она существенно зависит от вида цемента и химических модификаторов. Результаты исследований, приведенные на рис. 8-10, позволили сделать следующие выводы:

1. При всех видах химических добавок бетонные смеси, приготовленные на цементе ОАО "Белорусский цементный завод" (БЦЗ), характеризуются повышенной потерей консистенции. В течение 90 мин. расплыв конуса снижается с 70 см до 37, 55 и 39 см. соответственно при использовании C-3, Stachement-2000 и Sika Visco Crete S-600, т.е. на 47, 21 и 44%.

2. Наибольшей потерей консистенции при любых цементах характеризуются бетонные смеси, модифицированные добавкой C-3. Их применение возможно при дополнительном вводе C-3 на строительной площадке или специальных замедлителей схватывания цемента на заводе изготовителе смесей.

3. Использование цементов БЦЗ без замедлителей схватывания в бетонах монолитного строительства проблематично.

4. Бетонные смеси, модифицированные Stachement-2000 и Sika Visco Crete S-600 и приготовленные с применением цемента АОА "Красносельскстройматериалы" (КрСМ), могут применяться без замедлителей схватывания при температуре окружающей среды до 20°C.

Высокоподвижные бетонные смеси должны укладываться в опалубочные полости, как правило, под действием только гравитационных сил (собственного веса). Это возможно при обеспечении свободного прохождения бетонной смеси между арматурными стержнями, расположенными перпендикулярно направлению потока бетонной смеси. Вывод зависимостей, обеспечивающих эти условия, сделан исходя из следующих предпосылок:



- требуемая сжимаемость бетонной смеси обуславливается величиной, равной двум приведенным диаметрам зерен заполнителя с минимальным значением толщины теста  $\delta_{т.мин}$ ,

- фактическая сжимаемость бетонной смеси в процессе заполнения полости должна определяться из возможности уменьшения расстояния между поверхностями зерен заполнителя до минимального значения, равного  $2 \delta_{т.мин}$ ,

Исходя из первой предпосылки требуемая относительная сжимаемость бетонной смеси должна определяться следующей зависимостью:

$$\epsilon_{тр} = K_{н} \cdot \frac{4(r_3 + \delta_{т.мин})}{a_{арм} - d_r} \quad (12)$$

где  $r_3$  – приведенный радиус заполнителя;

$d_r$  – наибольший диаметр горизонтально расположенного (перпендикулярно потоку смеси) арматурного стержня;

$a_{арм}$  – наименьшее расстояние между стержнями арматуры, расположенными перпендикулярно потоку смеси;

$K_{н}$  – коэффициент надежности заполнения полости, принимаемый равным 1,2.

Сжимаемость бетонной смеси, исходя из второй предпосылки, должна определяться по формуле:

$$\epsilon_{см} = \frac{\delta_t - \delta_{т.мин}}{\delta_t} \quad (13)$$

где  $\delta_t$  – толщина теста вокруг зерен заполнителя, определяемая с учетом капиллярной воды заполнителя по формуле:

$$\delta_t = \left( \sqrt[3]{\frac{(1 - m_{п.з}) \rho_3}{G_{з.1}} - 1} \right) \cdot r_3 \quad (14)$$

где  $m_{п.з}$  – пустотность смеси заполнителей в уплотненном состоянии;

$\rho_3$  – средняя плотность заполнителей;

$G_{з.1}$  – содержание заполнителей в бетоне, кг/м<sup>3</sup>.

Приведенный радиус заполнителя определяется по формуле:

$$r_3 = \frac{3}{S_{у.з} \rho_3} \quad (15)$$

где  $S_{у.з}$  – удельная поверхность смеси заполнителей, определяемая по формуле:

$$S_{у.з} = \frac{\frac{S_{у.м} G_{м.1}}{\rho_m} + \frac{S_{у.кр} G_{кр.1}}{\rho_{кр}}}{\frac{G_{м.1}}{\rho_m} + \frac{G_{кр.1}}{\rho_{кр}}} \quad (16)$$

где  $S_{у.м}$ ,  $S_{у.кр}$  – удельная поверхность мелкого и крупного заполнителей;

$G_{м.1}$ ,  $G_{кр.1}$  – содержание мелкого и крупного заполнителей, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_m$ ,  $\rho_{кр}$  – плотность зерен мелкого и крупного заполнителей.

Минимальную толщину теста из вяжущего  $\delta_{т.мин}$ , обусловленную адгезионным сцеплением с поверхностью зерен заполнителя, рекомендуется принимать равной 10 мкм ( $10^{-5}$  м) [24].

Проверка разработанной методики определения свободного прохождения бетонной смеси в армированной полости проводилась в лабораторных условиях при варьировании расстояния между горизонтальными стержнями диаметром  $d_r = 18$  мм равного 30, 48 и 60 мм.

Во всех экспериментах при соблюдении условия  $\epsilon_{см} \geq \epsilon_{тр}$  ( $a_{арм} = 48 \dots 60$  мм) наблюдалось свободное заполнение полостей бетонной смесью с ОК=22 см, модифицированной Stachement – 2000. При расстоянии между стержнями  $a_{арм} = 30$  мм и  $\epsilon_{тр} = 0,116 > \epsilon_{см} = 0,098$ , наблюдалась блокировка. Разработанная методика неоднократно подтверждалась при назначении композиций бетона и бетонировании различных железобетонных конструкций Национальной библиотеки Республики Беларусь.

Физико-технические свойства бетонов, изготовленных из высокоподвижных бетонных смесей, обуславливаются теми же структурно-механическими характеристиками, что и

обычные бетоны с умеренной подвижностью бетонных смесей. В результате выполненных исследований [25] установлено, что бетоны, изготовленные из высокоподвижных смесей марок ПЗ..П5 и РК1..РК5, имеют при равной прочности на сжатие пониженные модули упругости на 17..29 % по сравнению с модулем упругости бетонов, изготовленных из бетонных смесей жесткостью Ж1..Ж2.

В соответствии с [26,27-29] морозостойкость бетона обуславливается температурой замораживания, капиллярно-пористой структурой, объемными концентрациями компонентов бетона, их физико-механическими свойствами и линейными температурными коэффициентами расширения, в том числе воды при замерзании и льда при нагревании. Проведенные исследования свойств бетонов по методике предстандарта [29], показали, что морозостойкость бетонов, изготовленных из бетонных смесей подвижностью 20..22 см, расходом цемента 350..450 кг/м<sup>3</sup> и содержанием С-3 в количестве 1 % от массы цемента составляет F200..F600. Водонепроницаемость бетонов тех же составов составляет W10..W12.

### 2.3. Направления дальнейших исследований

Рассмотренные научно-практические результаты относятся к технологии литых бетонных смесей, распределение и уплотнение которых должно сопровождаться вибрацией. Переход на полностью безвибрационные технологии потребует проведения дополнительного комплекса исследований как в области разработки новых самоуплотняющихся композиций бетонных смесей, так и в области новых «высоких» технологий производства бетонных работ. Эти исследования должны коснуться основ бетоноведения с целью уточнения их отдельных положений с позиций физико-химической и технологической механики бетона.

Основной характеристикой самоуплотняющихся бетонных смесей или, точнее, уплотняющихся под действием гравитационных сил, является способность деформироваться и течь без нарушения непрерывности и однородности композита. При этом могут проявляться как пластическое течение при напряжениях, превышающих предел пластичности (предельное напряжение сдвига), так и вязкое течение под действием любых сил с проявлением внутреннего трения (вязкости) за счет относительного и непрерывного перемещения слоев бетонной смеси. Следовательно, надежное проектирование технологических процессов, связанных с укладкой самоуплотняющихся бетонных смесей в опалубочные и формовочные полости с различной степенью насыщения арматурными элементами, должно основываться на закономерностях микро- и макрореологии структурированных дисперсных систем. Применительно к умеренно подвижным не модифицированным бетонным смесям автором [23] разработана методика аналитического определения их важнейших механических и реологических свойств и рекомендации по решению ряда технологических задач, связанных с механизированным безвибрационным формованием железобетонных изделий.

Для высокоподвижных и самоуплотняющихся бетонных смесей, модифицированных химическими добавками и тонкодисперсными наполнителями, следует получить новые зависимости их реологических свойств и разработать методики определения технологических режимов производства бетонных работ наливным, напорным и комбинированным методами. При этом за основу должны быть приняты разработанные ранее структурно-механические модели бетонных смесей и основные принципы решения технологических задач.

Для самоуплотняющихся бетонов следует также уточнить закономерности, отражающие влияние на прочность и модуль упругости бетона прочности и объемной концентрации цементного камня; содержания и вида химических модификаторов и тонкодисперсных наполнителей; пустотности, дисперсности и соотношения масс крупного и мелкого заполнителей; температурно-влажностных условий твердения.

Самоуплотняющиеся бетоны характеризуются повышенной усадкой. В этой связи дальнейшее исследования следует направить на разработку физических методов прогнозирования усадки по заданному составу бетона и физико-химических характеристик исходных материалов. Не менее важным является разработка технологических приемов снижения деформаций усадки за счет введения расширяющихся добавок, в том числе разработанной ранее РСАМ [30].

В заключение имеется достаточно оснований утверждать, что выполнение планируемого комплекса научно-технических работ по развитию в республике и за ее пределами обоих видов бетона будет способствовать широкому внедрению высоких технологий, повышению технического потенциала и конкурентной способности строительных организаций Беларуси.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мордич А.И., Вигдорчик Р.И., Белевич В.Н. Многоэтажные здания по серии Б1.020:1-7 со сборно-монолитными каркасами и плоскими перекрытиями из многупустотных плит // В сб. «Современные архитектурно-конструктивные системы зданий и сооружений, новые строительные материалы и технологии», – Мн.: 2000. – С. 3-32.
2. Блещик Н.П. Особенности интенсивной технологии сборно-монолитных каркасных зданий в летних и зимних условиях // В сб. «Проблемы совершенствования технологии, организации, экономики и управления в строительстве». – Мн.: БНТУ. – 2000. – С. 8-11.
3. Высокопрочные бетоны и конструкции из них. // Материалы VII сессии Союзной комиссии ФИП (Киев, 30 июня – 2 июля 1969). – НИИСП Госстроя УССР, Киев, 1969. – 80 с.
4. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. – М., 1998, 748 с.
5. Беликов В.А., Гуца Ю.П., Русанова Л.П. и др. Сборные железобетонные конструкции из высокопрочного бетона. – М., Стройиздат. 1996. – 184 с.
6. Берг О.Я., Щербаков Е.Н., Писанко Г.Н. Высокопрочный бетон. – М., Стройиздат. 1971. – 209 с.
7. Зубик А.Г., Блещик Н.П., Барташевич А.Я. и др. Опыт производства вибрированных конструкций из высокопрочного бетона на Барановичском КЖБК // Технология и области эффективного применения высокопрочных бетонов в строительстве. Тезисы докладов научно-технической конференции (г. Минск, 12-13 декабря 1978 г.). Технология и повышение долговечности железобетонных конструкций / Под ред. Б.А. Крылова. – БелНИИТИ. – Минск, 1978. – С. 23-25.
8. Блещик Н.П., Рыскин М.Н. Особенности технологии производства сборных железобетонных конструкций из высокопрочного бетона. Материалы V научно-методического межвузовского семинара. – Мн.: С. 28-34.
9. Разработать эффективные железобетонные конструкции из высокопрочного бетона и технологию их производства. Отчет о НИР. Рег. № 1997238 науч. руков. Н.П. Блещик, БелНИИС, Мн., 1998. – С. 355.
10. Исследовать, разработать и внедрить энергосберегающую интенсивную технологию возведения монолитных каркасных зданий и сооружений из высокопрочного бетона. Отчет о НИР. Рег. № 20011378 науч. руков. Н.П. Блещик, БелНИИС, 2003.
11. Мельник Р.А., Федорчук В.И., Лубенец И.И. Механические свойства высокопрочных бетонов // Бетон и железобетон, №8, 1975. – С. 7-10.
12. Свиридов Н.В., Коваленко М.Г. Бетон прочностью 150 МПа на рядовых портландцементях. // Бетон и железобетон, 1990, №2. – С. 20-22.
13. Рекомендации по определению составов обычного и пластифицированного бетонов с учетом условий тепловой обработки и данных статического контроля прочности. – Мн.: ИСиА Госстроя БССР. – 1984. – 70 с.
14. Блещик Н.П., Рыскин М.Н. Структурное моделирование механических свойств высокопрочного бетона // В ст. «Эффективные строительные материалы, конструкции и технологии». – Мн.: 2000. – С.51-63.
15. Рыскин М.Н. Структурно-механические свойства и технология высокопрочного бетона // Дисс. канд. техн. наук: 05.23.05. – Мн.: 2002. – 305 с.
16. Разработать и внедрить интенсивную энергоэкономную технологию возведения монолитных бескаркасных зданий с применением конкурентоспособной опалубочной системы МОДОСТР и высокоподвижных модифицированных бетонных смесей. Отчет о НИР. Рег. № 2003978. науч. руков. М.Ф. Марковский, Н.П. Блещик, Часть 2, БелНИИС, 2005. – 277 с.
17. Рекомендации по проектированию составов высокопрочных бетонов классов В45...В80 для монолитных железобетонных каркасов зданий и сооружений. БелНИИС, 2003.
18. Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete, EFNARC, 2002.
19. Heirman G., De Geyter N. De invloed van vulstoffen op de eigenschappen van zelfverdichtend beton in vloeibare en verharde toestand. Katholieke universiteit leuven., 2002. – 137 p.
20. Leemann A., Hoffmann C., Olbrecht H. Self compacting concrete (SCC) / Selbstverdichtender Beton – Zusammensetzung und Eigenschaften Holcim Betontagung 2002.
21. Yurugi M.; Sakata N.; Iwai M.; Sakaj G. "Mix Proportion for Highly Workable Concrete", Proceedings of the International Conference on Concrete 2000, Dundee, UK, 1993.
22. Ambroise J.; Rols S.; Pera J. "Self-Leveling Concrete-Design and Properties", Concrete Science and Engineering, V. 1, 1999, pp. 140 – 147.
23. Блещик Н.П. Структурно-механические свойства и реология бетонной смеси и бетона. – Мн.: 1977. – 230 с.
24. Mizuguchi H., Ohyama R/ Relation between Rheological Constants of fresh Mortar and Grading of Fine Aggregate // Rev/35<sup>th</sup> Gen. Meet. Cem. Assoc. Jap. Techn. Sess., Tokyo, 1981, Synops. — Tokyo. — 1981. –pp.80–82.
25. Блещик Н.П. Прогнозирование модуля деформации бетона на основе структурно-механической модели с учетом технологических свойств бетонной смеси // Вестник БГТУ. Строительство и архитектура, №1 (13), 2002-с.3-5.

26. Блещик Н.П., Лазаренко О.В. Структура, температурные деформации и методика ускоренного определения морозостойкости бетона // Инженерные проблемы строительства и эксплуатации сооружений: Сб. трудов под редакцией Д.Н. Лазовского. - Мн.: Технопринт, 2001.-30-35 с.
27. Блещик Н.П., Лазаренко О.В. О критериях оценки морозостойкости бетона/Проблемы технологии производства строительных материалов, изделий и конструкций, строительства зданий и сооружений. Сб. статей 1 научн. Метод. межвузовского семинара. Под редакцией Н.П. Блещика и Э.И. Ботяновского. – Брест, 1998 – с. 31-32.
28. Блещик Н.П., Лазаренко О.В. Методика ускоренного определения морозостойкости бетона структурно-механическим методом совершенствования железобетонных конструкций, оценка их состояния и усиления. Сб. материалов республиканской научно-технической конференции. Под общей редакцией Т.М. Пецольда. - Новополоцк, 2000.- с.17-20.
29. СТБ. Бетоны. Ускоренный структурно-механический метод определения морозостойкости при однократном замораживании и оттаивании. – Мн., 2005. – 25 с.
30. Провести исследования, разработать и внедрить новые композиции бетона, химические и минеральные модификаторы к ним, технологию приготовления и транспортирования бетонных и растворных смесей, обеспечивающие изготовление эффективных материалов и железобетонных конструкций, в том числе скомпенсированной усадкой или самоупрочением. Отчет о НИР. Рег. № 20023797. – Мн., 2004. – 277 с.