

**БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

УДК 691.327:666.972.4:620.17

КОТОВ
Дмитрий Святославович

**ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЯЖЕЛОГО
САМОУПЛОТНЯЮЩЕГОСЯ БЕТОНА**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности
05.23.05 – Строительные материалы и изделия

Минск - 2013

Работа выполнена в отделе технологии бетонов и раствора Научно-исследовательского Республиканского унитарного предприятия по строительству «Институт БелНИИС»

Научный руководитель: **Блещик Николай Павлович**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник РУП «Институт БелНИИС»

Официальные оппоненты: **Веренько Владимир Адольфович** доктор технических наук, профессор кафедры «Проектирование дорог» БНТУ;

Леонович Ирина Анатольевна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры сопротивления материалов ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет»

Оппонирующая организация: Государственное предприятие «Институт жилища – НИПТИС имени С.С. Атаева», г. Минск

Защита состоится 24 мая 2013 г. в 14⁰⁰ на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.05 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65, главный корпус, ауд. 202. Телефон ученого секретаря 8(017) 265-95-87. E-mail: sawa1950@mail.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью учреждения, следует отправлять на имя ученого секретаря по адресу: 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65, Белорусский национальный технический университет.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан 24 апреля 2013 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций,
кандидат химических наук, доцент



П.И. Юхневский

© Котов Д.С., 2013
© Белорусский национальный
технический университет, 2013

ВВЕДЕНИЕ

Самоуплотняющийся тяжелый бетон (далее - самоуплотняющийся бетон, СУБ) является одним из наиболее перспективных новых видов бетона, который, как правило не требует применения вибрации для укладки и уплотнения бетонной смеси и, соответственно, обеспечивает значительное сокращение затрат труда и электрической энергии при изготовлении изделий и возведении монолитных конструкций.

Отличительными особенностями самоуплотняющегося бетона являются:

- высокая консистенция бетонной смеси, определяемая различными методами, в т.ч. растеканием стандартного конуса;
- низкое водоцементное отношение;
- применение композиционных вяжущих, в состав которых могут входить тонкодисперсные минеральные наполнители;
- использование высокоэффективных химических модификаторов нового поколения (гиперпластификаторов) в сочетании с пеногасителями, ускорителями твердения, замедлителями схватывания цемента, понизителями температуры замерзания воды в бетонной смеси, модификаторами вязкости и высокой объемной концентрацией композиционного вяжущего.

Эти особенности самоуплотняющегося бетона оказывают существенное влияние на его физико-механические свойства - прочность на сжатие и растяжение, модуль упругости, продольные и поперечные деформации, деформации усадки и т.д.

Несмотря на широкое применение самоуплотняющегося бетона в строительной практике зарубежных стран, его особенности физико-механических свойств недостаточно учитываются при проектировании железобетонных конструкций зданий и сооружений. Для учета этих особенностей необходима корректировка соответствующих нормативных документов.

Из комплекса физико-механических свойств самоуплотняющегося бетона в данной работе исследованы его прочность на сжатие и растяжение, модуль упругости, коэффициент поперечных деформаций, продольные деформации соответствующие прочности на сжатие и деформации усадки, необходимые для проектирования железобетонных конструкций.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами

Основные результаты и положения диссертационной работы получены при выполнении темы Минскстройархитектуры Республики Беларусь № 20053268 «Исследовать реологические, структурные, физико-механические и технологические свойства самоуплотняющихся бетонов, обеспечивающие увеличение производительности труда при укладке бетонной смеси, снижение удельных затрат энергии и стоимости отделочных работ. Разработать и внедрить комплект нормативно-технической документации», входящей в государственную научно-техническую программу «Строительные материалы и технологии».

Цель и задачи исследования

Объект исследования - самоуплотняющийся бетон, модифицированный различными химическими модификаторами и тонкодисперсными минеральными наполнителями.

Предмет исследования - физико-механические свойства модифицированного самоуплотняющегося бетона.

Выбор объекта и предмета исследования продиктован необходимостью учета особенностей физико-механических свойств самоуплотняющегося бетона при проектировании железобетонных конструкций зданий и сооружений, а также расширения области его применения, что позволит в значительной степени сэкономить энергетические и трудовые ресурсы.

Цель исследования – на основе результатов комплекса теоретических и экспериментальных исследований свойств самоуплотняющегося бетона разработать физические и математические модели его основных характеристик, необходимых для проектирования железобетонных конструкций и технологических режимов их возведения.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- выполнен аналитический обзор результатов исследований физико-механических свойств бетонов, модифицированных химическими и минеральными добавками;
- исследовано влияние структурных характеристик и свойств компонентов СУБ на его прочность и разработаны математические модели прочности на сжатие и растяжение;
- исследовано влияние структурных характеристик и свойств компонентов СУБ на его деформационные характеристики и разработаны структурные математические модели модуля упругости, продольных, поперечных и осадочных деформаций;
- разработаны предложения по изменению СНБ 5.03.01-2002;
- разработаны технологические решения и осуществлено научно-техническое сопровождение возведения монолитных железобетонных конструкций с применением СУБ.

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты экспериментально-теоретических исследований влияния минералогического состава клинкера, удельной поверхности цемента, содержания и свойств минеральных добавок и химических модификаторов, водовязущего отношения на прочностные и деформационные характеристики цементного камня;

2. Результаты экспериментально-теоретических исследований влияния объемного содержания и свойств цементного камня, содержания и свойства крупного и мелкого заполнителей, водовязущего отношения на физико-механические свойства бетона;

3. Математические модели прочности на сжатие и растяжение, модуля упругости, деформаций усадки цементного камня и бетона.

4. Изменение №5 СНБ 5.03.01-2002 по учету влияния свойств самоуплотняющегося бетона на деформационные характеристики железобетонных конструкций.

Личный вклад соискателя

Результаты исследований, выносимые на защиту, получены лично автором при консультативном участии научного руководителя Н.П. Блещика. В проведении и анализе экспериментальных исследований приняли участие Калиновская Н.Н., Парфенов А.И., Корицын Д.В. и др.

В разработке Изменения №5 СНБ 5.03.01-2002 «Бетонные и железобетонные конструкции» существенную помощь оказала главный специалист отдела РУП «Стройтехнорм» Кучко Л.Н.

В публикациях [5, 6] автором представлены разделы, касающиеся физико-механических свойств самоуплотняющегося бетона.

Апробация результатов диссертации

Результаты исследований докладывались:

– на XV Международном научно-методическом семинаре «Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь», г. Новополоцк, 2008 г.;

– на Международном симпозиуме «Проблемы современного бетона и железобетона», г. Минск, 2009 г.;

– на Международном симпозиуме «Проблемы современного бетона и железобетона», г. Минск, 2011 г.

Опубликованность результатов диссертации

По теме диссертации опубликовано 6 печатных работ, в том числе 3 статьи в научных журналах, включенных в перечень ВАК, общим объемом 2,25 авторского листа и 3 статьи в научных сборниках.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения и списка использованных источников. Общий объем диссертации - 135 страниц, в том числе 47 иллюстрации на 31 страницах, 23 таблицы на 25 страницах, 2 приложения на 7 страницах. Использованных источников – 85 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена аналитическому обзору результатов исследований физико-механических свойств бетона и предложенных отечественными и зарубежными авторами соответствующих математических моделей. Из комплекса физико-механических свойств рассмотрены: прочность на сжатие и растяжение; модуль упругости; поперечные, продольные и усадочные деформации. Отмечено, что наибольший вклад в развитие теории прочности и деформативности бетона внесли труды И.Н. Ахвердова, О.Я. Берга, Ш.Т. Бабаева, В.Г. Батракова, А.Е. Десова, Г.В. Несветаева, Х. Тейлора, А.Е. Шейкина и др.

В процессе анализа рассмотрена 51 математическая модель, предложенная для оценки и расчета характеристик бетона. Полученные математические модели прочности и деформационных характеристик бетона удовлетворительно описывают значения в различных ограниченных областях. В результате анализа предложенных моделей показана невозможность их применение для бетонов, модифицированных современными химическими и минеральными добавками, к которым относится и самоуплотняющийся бетон (СУБ). Установлено также, что для получения наиболее достоверных математических моделей физико-механических свойств СУБ целесообразно использовать структурные методы и комплекс структурных характеристик предложенных Н.П. Блещиком с сотрудниками. Показано также, что для получения структурных математических моделей прочности и деформативности СУБ следует принимать двухфазную модель, состоящую из цементного камня и заполнителя.

На основании аналитического обзора литературных источников и принятых предпосылок определены направления и частные задачи экспериментально-теоретических исследований.

Во второй главе представлены результаты экспериментально-теоретических исследований прочности самоуплотняющегося бетона на сжатие и растяжение.

Исследованию прочности цементного камня и разработке математических моделей для ее описания посвящены многие работы, в том числе И.Н. Ахвердова, В.В. Бобкова, В.В. Тимашева, Х. Тейлора, Т.С. Паурса и др. Многие полученные зависимости прочности цементного камня основаны на структурном подходе. Они учитывают влияние содержания и свойства геля, негидратированных включений, а также капиллярных пор. Вместе с тем они не учитывают влияние содержания и свойств химических и минеральных добавок. Не в полной мере учитываются также и свойства цемента. В этой связи степень

корреляции значений прочности цементного камня, рассчитанных по полученным математическим моделям, существенно расходятся с экспериментальными данными разных авторов.

С целью получения уточненных структурных моделей прочности цементного камня на сжатие выполнен комплекс экспериментально-теоретических исследований с применением различных современных материалов.

В исследованиях свойств цементного камня использовался цемент - ПЦ 500-Д0 производства ОАО «Красносельскстройматериалы», пластификаторы – суперпластификатор СМ-1, гиперпластификаторы – ГП-1 и Stachement-2000-М Ж30, в качестве минеральной добавки – тонкодисперсный доломит.

В качестве варьируемых факторов при проведении экспериментальных исследований принимались: водовяжущее отношение, содержание минеральной добавки, вид и содержание химических добавок. Водовяжущее отношение, варьировалось в пределах связности цементного теста: 0,164–0,43. Содержание минеральной добавки, принималось в количестве 20, 30 и 40 % от массы вяжущего (цемента и наполнителя). Относительное содержание и вид пластификаторов принимались следующими: 0,2, 0,3 и 0,4 % для ГП-1; 0,4, 0,6 и 1 % - для СМ-1 и 0,3 % – для St-2000-М Ж30, от массы вяжущего в расчете на сухое вещество.

Экспериментальные исследования прочности цементного камня выполнялись на образцах 42 серий в возрасте 1, 2, 3, 7 и 28-ми суток. Результаты исследований позволили получить 162 средних значений прочности цементного камня, каждое из которых содержало не менее шести частных значений.

В результате обработки экспериментальных данных по прочности цементного камня $f_{ц.к.т}$ установлено, что ее зависимость может быть представлена в следующем общем виде:

$$f_{ц.к.т} = \varphi(m_{к.п}) \cdot \varphi(m_r), \text{ МПа}, \quad (1)$$

где $\varphi(m_{к.п})$ – функция, отражающая влияние объемной концентрации капиллярной пористости $m_{к.п}$ цементного камня;

$\varphi(m_r)$ – функция, отражающая влияние объемной концентрации геля (m_r) в цементном камне.

В результате статистической обработки экспериментальных данных функция $\varphi(m_{к.п})$ записана в виде:

$$\varphi(m_{к.п.}) = (1 - \varphi_w \cdot m_{к.п.})^n \quad (2)$$

где $n = 0,46(3,5 - \varphi_w)^{1,87}$,

φ_w - функция водовяжущего отношения:

$$\varphi_w = 1 + \frac{G_{вяж} \cdot \rho_B}{B \cdot \rho_{вяж}}$$

где индекс “w” – эффективное водовяжущее отношение (без учета воды, поглощаемой заполнителем).

Функция $\varphi(m_r)$ представлена следующими зависимостями:

$$\varphi_1(m_r) = 626 \cdot m_r^{1,41}, \text{ МПа}; \quad m_r \leq 0,3; \quad (3)$$

$$\varphi_2(m_r) = 115 \text{ МПа}, \quad 0,8 > m_r > 0,3. \quad (4)$$

$$\varphi_{1,ГП-1+Дн}(m_r) = 1,81 \cdot 10^3 m_r^{2,32}, \text{ МПа}; \quad m_r \leq 0,28; \quad (5)$$

$$\varphi_{2,ГП-1+Дн}(m_r) = 95 \text{ МПа}, \quad m_r > 0,28; \quad (6)$$

$$\varphi_{1,СМ-1+Дн}(m_r) = 31 \cdot 10^3 m_r^{3,13}, \text{ МПа}; \quad m_r \leq 0,16; \quad (7)$$

$$\varphi_{2,СМ-1+Дн}(m_r) = 100 \text{ МПа}, \quad m_r > 0,16; \quad (8)$$

$$\varphi_{1,St+Дн}(m_r) = 16,3 \cdot 10^3 m_r^{3,1}, \text{ МПа}; \quad m_r \leq 0,2; \quad (9)$$

$$\varphi_{2,St+Дн}(m_r) = 110 \text{ МПа}, \quad m_r > 0,2. \quad (10)$$

На рисунке 1 представлена степень корреляции прочности цементного камня на сжатие, рассчитанной по представленным выше зависимостям, с опытными данными в возрасте от 1 до 28 суток.

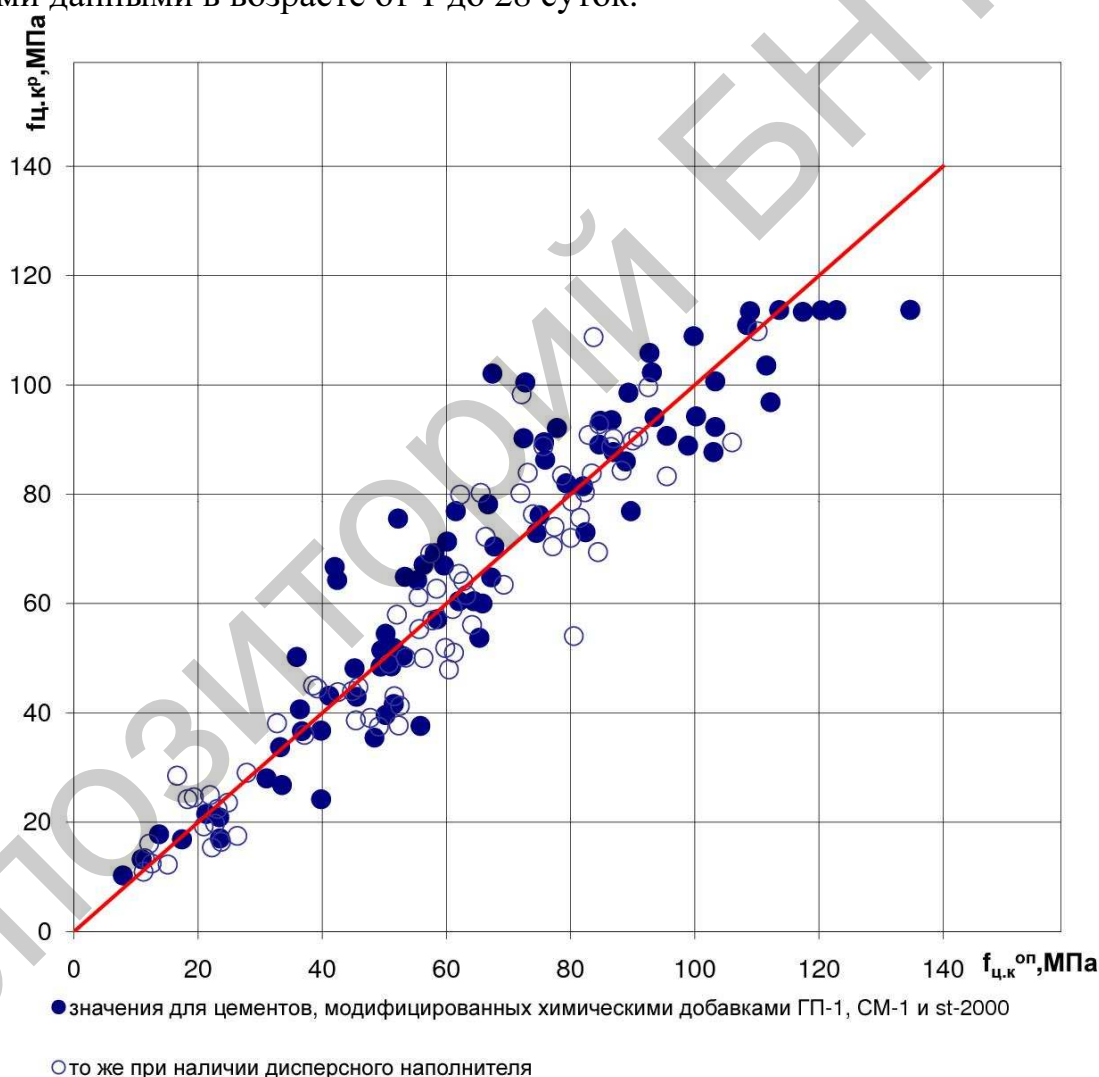


Рисунок 1 – Степень корреляции расчетных и опытных данных прочности цементного камня на сжатие в возрасте от 1 до 28 суток

Для уточнения структурной модели прочности самоуплотняющегося бетона на сжатие с учетом зависимости (1) выполнен комплекс экспериментально-теоретических исследований с применением ранее описанных материалов.

В качестве варьируемых факторов при проведении экспериментальных исследований принимались: водовяжущее отношение, содержание минераль-

ных добавок, вид и содержание химических добавок. Водовяжущее отношение, варьировалось в пределах 0,238–0,325, содержание минеральной добавки, принималось в количестве 10–45 % от массы вяжущего; относительное содержание и вид пластификаторов, принимались следующими: 0,4 и 0,5 % для Sica; 0,8–1,4 % - для С-3 и 0,4–0,6 % - для Stachement-2000-М Ж30 от массы вяжущего в расчете на сухое вещество, отношение масс мелкого заполнителя к крупному принималось в пределах 0,68–1.

Экспериментальные исследования прочности самоуплотняющегося бетона производились на образцах 29 серии в возрасте 1, 3, 7 и 28 суток. Результаты исследований позволили получить 116 средних значений прочности бетона, каждое из которых содержало от 4 до 6 частных значений.

Основываясь на двухфазной модели бетона и полученных экспериментальных данных, математическая модель прочности СУБ $f_{c,t}$ представлена в следующем общем виде

$$f_{c,t} = f_{ц.к.т} \cdot \varphi(m_T), \text{ МПа}, \quad (11)$$

где $f_{ц.к.т}$ - функция прочности цементного камня в возрасте от 1 до 28 суток, МПа;

$\varphi(m_T)$ – функция объемной концентрации теста в бетонной смеси.

В результате обработки полученных значений средней прочности бетона в возрасте 1, 3, 7 и 28 суток функция $\varphi(m_T)$ записана в виде

$$\varphi(m_T) = 1,5 - 19,7 \cdot (0,375 - m_T)^{1,35} \quad (12)$$

Степень корреляции расчетной модели прочности СУБ на сжатие представлена на рисунке 2.

В результате экспериментальных исследований установлено также, что развитие прочности самоуплотняющегося бетона на сжатие во времени при $t > 28$ суток может быть отражено коэффициентом $\beta_{cc}(t)$, представленным в СНБ 5.03.01-2002.

Исследованиями прочности самоуплотняющегося бетона на растяжение f_{ct} установлено, что она может быть определена по таблице 6.1 СНБ 5.03.01-2002 с умножением на коэффициент $K_r=1,05$, также допускается применять зависимость предложенную Г.В. Несветаевым, в виде

$$f_{ct} = 0,30 \cdot (f_{c,cube} \cdot 0,8)^{0,6}, \text{ МПа}, \quad (13)$$

где $f_{c,cube}$ – прочность бетона, определенная по образцам кубам, МПа.

Третья глава посвящена результатам экспериментально-теоретических исследований деформационных характеристик самоуплотняющегося бетона.

При выполнении экспериментальных исследований использовались материалы, характеристика которых приведена в главе 2.

Водовяжущее отношение варьировалось в пределах 0,177–0,43.

В качестве рабочей модели модуля упругости бетона была принята двухфазная модель, по аналогии с моделью прочности бетона на сжатие. В соответствии с этим на первом этапе исследований определялся модуль упругости цементного камня, содержащего химические и минеральные добавки.

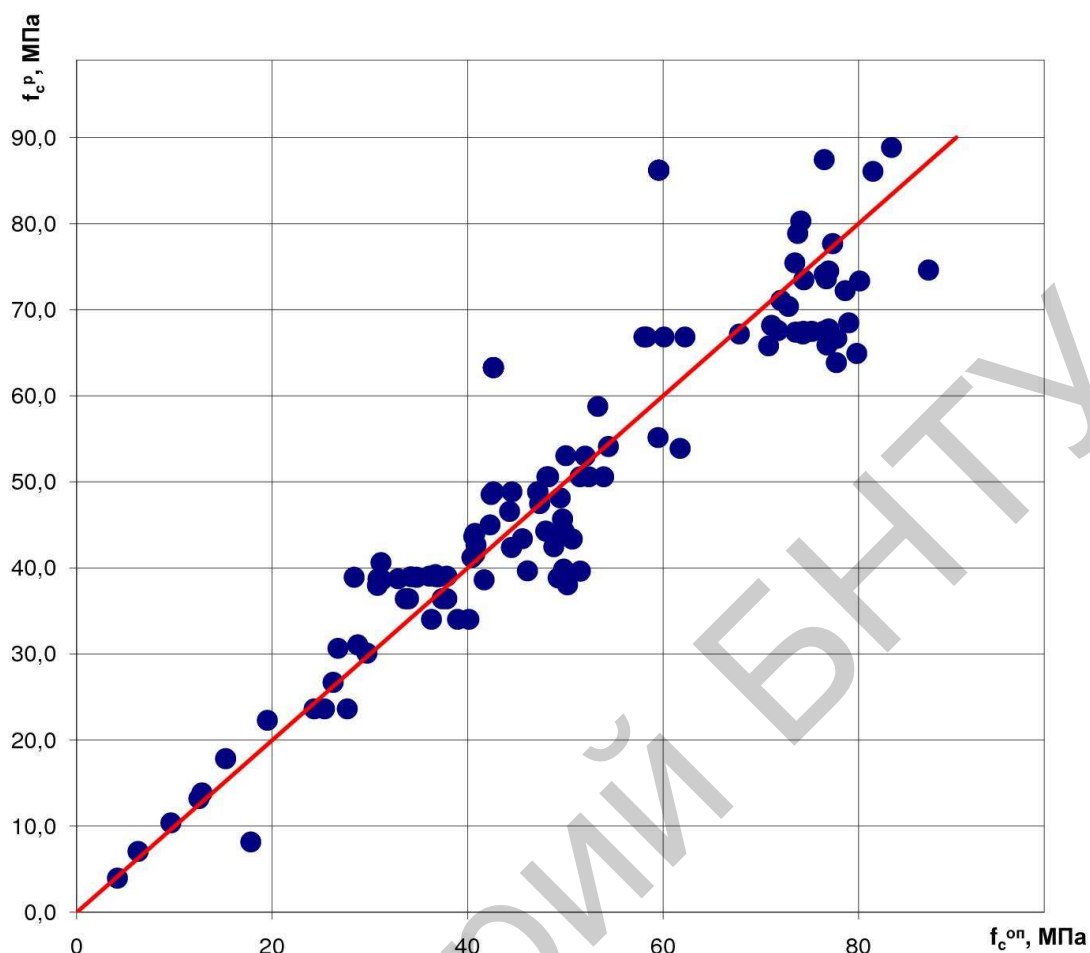


Рисунок 2 – Степень корреляции расчетных и опытных данных прочности самоуплотняющегося бетона на сжатие в возрасте от 1 до 28 суток

В результате экспериментальных исследований было получено 36 средних значений модуля упругости цементного камня в возрасте 28 суток, на основе результатов обработки которых, с использованием серийной модели Реусса и математико-статистических методов, математическая модель модуля упругости цементного камня представлена в виде

$$E_{ц.к} = \frac{1,25 \cdot (1 - m_{к.п})^{6,4} \cdot K_{м.е}}{\frac{m_{г}}{E_{г}} + \frac{m_{н.вк.ц}}{E_{н.вк.ц}} + \frac{m_{н.вк.дн}}{E_{н.вк.дн}}}, \text{ ГПа}, \quad (14)$$

где $E_{г}$ – модуль упругости геля, $E_{г}=20$ ГПа;

$E_{н.вк.ц}$ – модуль упругости негидратированных включений цемента, $E_{н.вк.ц}=53$ ГПа;

$E_{н.вк.дн}$ – модуль упругости негидратированных включений дисперсного наполнителя, $E_{н.вк.доломит}=25$ ГПа; $E_{н.вк.шлак}=40$ ГПа.

$K_{м.е}$ – коэффициент учитывающий влияние различного сочетания химических и минеральных добавок имеет следующие значения: $K_{м.е.сМ-1}=1,25$; $K_{м.е.st}=1,15$; $K_{м.е.гП-1}=0,86$.

Степень корреляции расчетной модели модуля упругости цементного камня представлена на рисунке 3.

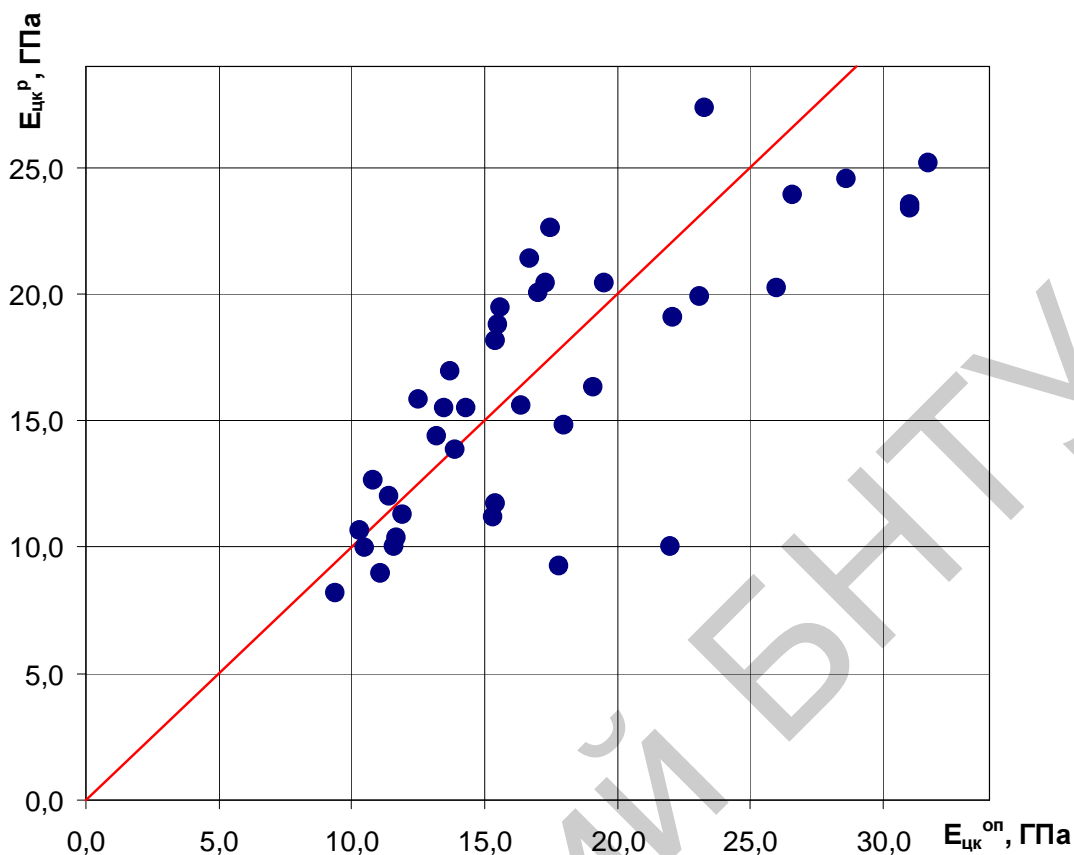


Рисунок 3 – Степень корреляции расчетных и опытных значений модуля упругости модифицированного цементного камня в возрасте 28 суток

Принимая за основу двухфазную модель бетона, и учитывая особенности напряженного состояния цементного камня, обеспечивающего раздвижку зерен заполнителя $m_{ц.к.1}$ и находящегося в межзерновом пространстве заполнителя $m_{ц.к.2}$, зависимость модуля упругости для серийной модели бетона $E_{см}$ записана в виде:

$$E_{см} = \frac{1}{\frac{m_{ц.к.1}}{E_{ц.к.1}} + \frac{m_{ц.к.2}}{E_{ц.к.2}} + \frac{m_3}{E_3}}, \text{ ГПа}, \quad (15)$$

где $E_{ц.к.1}$ – модуль упругости цементного камня, обеспечивающего раздвижку зерен заполнителя, ГПа

$E_{ц.к.2}$ – модуль упругости цементного камня, находящегося в межзерновом пространстве, ГПа;

m_3, E_3 – соответственно объемная концентрация и средний модуль упругости заполнителя, определяемые по формулам:

$$m_3 = \frac{G_M}{\rho_M} + \frac{G_{кр}}{\rho_{кр}}, \quad (16)$$

$$E_3 = \frac{E_M \cdot G_M / \rho_M + E_{кр} \cdot G_{кр} / \rho_{кр}}{G_M / \rho_M + G_{кр} / \rho_{кр}}, \quad (17)$$

где $G_M, G_{кр}$ – масса мелкого и крупного заполнителя в единице объема бетона, кг;

$\rho_m, \rho_{кр}$ – плотность мелкого и крупного заполнителя, кг/м³;

$E_m, E_{кр}$ – модуль упругости мелкого и крупного заполнителей, ГПа.

По литературным данным модуль упругости кварцевого песка может быть принят равным 59 ГПа, а щебня из гранита – 73 ГПа.

При воздействии внешних нагрузок цементный камень находящийся в межзерновом пространстве заполнителя, работает в одноосном напряженном состоянии. Вследствие этого, значение $E_{ц.к.2}$ может быть приближенно принято равным модулю упругости цементного камня $E_{ц.к.}$, определяемому по (14).

Цементный камень, обеспечивающий раздвижку зерен заполнителя, находится в сложном напряженном состоянии, обусловленном контактным взаимодействием зерен заполнителя с цементным камнем. При условии $E_3 > E_{ц.к.}$ модуль упругости цементного камня $E_{ц.к.1}$ будет больше модуля упругости цементного камня $E_{ц.к.}$, определяемого в условиях одноосного напряженного состояния. Его зависимость представлена в виде

$$E_{ц.к.1} = \varphi_{ц.к.1} \cdot E_{ц.к.} \quad (18)$$

Функция $\varphi_{ц.к.1}$ в общем случае определяется соотношением модулей упругости цементного камня и заполнителя, средним расстоянием между зернами заполнителя и их геометрическими размерами. Однако, для инженерных расчетов модуля упругости бетона на гранитном щебне и кварцевых песках функция $\varphi_{ц.к.1}$ получена на основе учета влияния только одного параметра — $m_{ц.к.1}$.

Результаты анализа экспериментальных данных и их обработки с использованием математико-статистических методов позволили записать функцию $\varphi_{ц.к.1}$ в виде:

$$\varphi_{ц.к.1} = 1,1 + 366 \cdot (0,4 - m_{ц.к.1})^{4,1} \quad (19)$$

и, соответственно, экспериментально-теоретическую зависимость модуля упругости самоуплотняющегося бетона в виде:

$$E_{см} = \frac{1}{\frac{m_{ц.к.1}}{(1,1 + 366 \cdot (0,4 - m_{ц.к.1})^{4,1}) E_{ц.к.}} + \frac{m_{ц.к.2}}{1,4 \cdot E_{ц.к.}} + \frac{m_3}{E_3}}, \text{ ГПа} \quad (20)$$

В приведенных выше зависимостях значения $m_{ц.к.1}$ и $m_{ц.к.2}$ без учета усачных деформаций определяются по следующим формулам:

$$m_{ц.к.2} = m_3 \cdot \frac{m_{п.3}}{1 - m_{п.3}}, \quad (21)$$

$$m_{ц.к.1} = 1 - m_3 - m_{ц.к.2}, \quad (22)$$

где $m_{п.3}$ – пустотность смеси заполнителей, определяемая в виброуплотненном состоянии.

Для определения относительных деформаций самоуплотняющегося бетона, соответствующих его напряженному состоянию ε_{c1} и поперечных деформа-

ций исследованы бетоны различных составов с применением материалов, описанных в главе 2. Определение деформаций проводилось в соответствии с действующими ТНПА, однако для определения ε_{c1} образец доводился до разрушения. В связи с тем, что нагружение производилось в координатах «сила-время», деформации соответствующие ε'_{c1} принимались равными деформациям, полученным на ступени, предшествующей разрушению образца.

В результате математической обработки и анализа экспериментальных данных относительных деформаций СУБ ε_{c1} установлено, что их значения могут приниматься равными значениям относительных деформаций традиционного тяжелого бетона по СНБ 5.03.01-2002.

Установлено также, что значение коэффициента поперечных деформаций ν_c самоуплотняющегося бетона варьируется в пределах от 0,177 до 0,222 и может быть принято $\nu_c = 0,2$, как указано в СНБ 5.03.01-0202.

Результаты многочисленных экспериментальных исследований усадки СУБ, выполненные с использованием материалов указанных в главе 2, показали, что математические модели могут быть получены путем уточнения зависимостей коэффициентов $\alpha_{ds.1}$ и $\alpha_{ds.2}$ Приложения Б СНБ 5.03.01-02, определяющих предельные значения части усадки бетона $\varepsilon_{cs.d.\infty}$. При этом зависимости, определяющие незначительную величину части усадки бетона $\varepsilon_{cs.a}$, могут быть оставлены в прежнем виде.

В результате математико-статистической обработки экспериментальных данных (113 средних значений) предложено принять следующие виды зависимостей $\varepsilon_{cs.d}$ и $\varepsilon_{cs.d.\infty}$:

$$\varepsilon_{cs.d} = k \cdot \beta_{ds} \cdot \varepsilon_{cs.d.\infty}; \quad (23)$$

$$\varepsilon_{cs.d.\infty} = \left[(220 + 110\alpha_{ds.1.M}) \cdot \exp\left(-\alpha_{ds.2} \frac{f_{cm}}{f_{cm.o}}\right) \right] \cdot 10^6 \cdot \beta_{RH}, \quad (24)$$

где k – коэффициент, учитывающий влияние марок по удобоукладываемости бетонной смеси, представленный в таблице 1;

β_{ds} – функция развития усадки бетона во времени, определяемая по формуле:

$$\beta_{ds} = \left[\frac{(t - t_s)}{0,04 \cdot \sqrt{h_0^3 + (t - t_s)}} \right]^{1.8}, \quad (25)$$

$\alpha_{ds.1.M}$ – коэффициент для бетонов модифицированных химическими добавками, определяемый путем умножения коэффициента $\alpha_{ds.1}$ на коэффициент k_M , которые следует соответственно принимать по таблицам 2 и 3;

все остальные параметры приняты согласно СНБ 5.03.01-2002.

В случае применения минеральных добавок в количестве от 10 до 30% от массы вяжущего значение функции β_{ds} следует определять путем умножения значения β_{ds} , полученного по зависимости (25), на коэффициент $K_{ДН}=1,1$.

Степень корреляции расчетных и экспериментальных данных представлена на рисунке 4.

Таблица 1 – Значения коэффициента k

Марки по удобоукладываемости бетонной смеси	Коэффициент k
СЖ1, СЖ2, СЖ3, Ж2, Ж3, Ж4	0,7
Ж1, П1, П2	0,8
П3	1
П4, П5, Р-1	1,2
Р-2, Р-3, Р-4	1,3

Таблица 2 – Значения коэффициента $\alpha_{ds,1}$

Вид цемента	Коэффициент $\alpha_{ds,1}$
Быстротвердеющий портландцемент и ПЦ 550 – Д0 (по ГОСТ 10178)	5,0
Нормальнотвердеющий портландцемент: ПЦ 500 – Д0 (по ГОСТ 10178); ЦЕМ –I класса по прочности на сжатие 42,5 (по ГОСТ 31108)	4,0
Нормальнотвердеющий портландцемент: ПЦ 500 – Д20 (по ГОСТ 10178); ЦЕМ –II класса по прочности на сжатие 42,5 (по ГОСТ 31108)	3,5
Нормальнотвердеющий портландцемент: ПЦ 400 – Д20, шлакопортландцемент, (по ГОСТ 10178); ЦЕМ –II класса по прочности на сжатие 32,5, ЦЕМ –III (по ГОСТ 31108)	3,0

Таблица 3 – Значения коэффициента k_M

Вид химических модификаторов	Коэффициент k_M
Пластифицирующие добавки второй и третьей групп по СТБ 1112	0,90
Пластифицирующие добавки первой группы по СТБ 1112	0,85
Гиперпластификаторы (ГП – 1, St – 2000 и др.)	0,75
Ускорители твердения	1,1

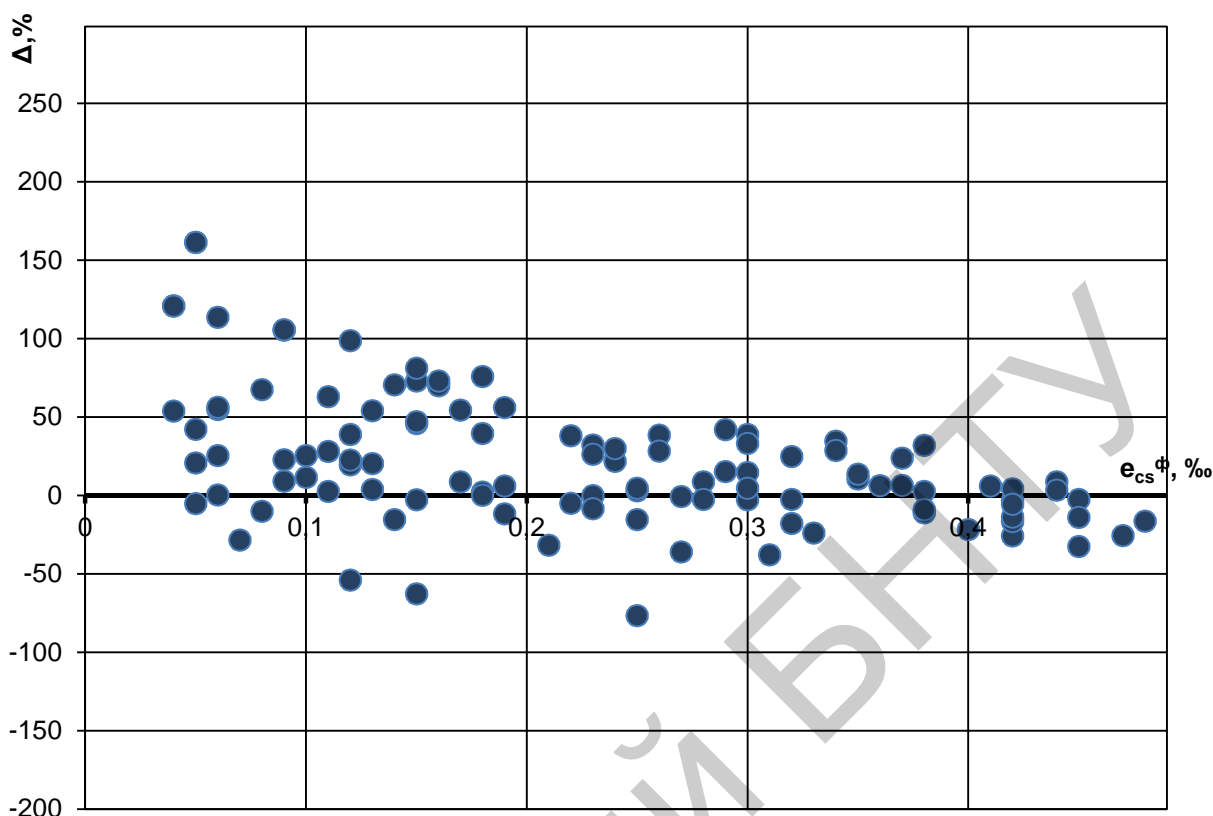


Рисунок 4 – Степень корреляции расчетных и опытных данных деформаций усадки

Четвертая глава диссертационной работы посвящена практическому использованию полученных результатов.

Учитывая отсутствие нормируемых физико-механических свойств самоуплотняющегося бетона одним из важных направлений внедрения результатов исследований была разработка Изменения №5 СНБ 5.03.01-02 «Бетонные и железобетонные конструкции», отражающего особенности физико-механических свойств самоуплотняющегося бетона.

По результатам исследований представленных в главах 2 и 3 внесены дополнения в раздел 6 «Материалы» СНБ 5.03.01-02. В частности, он дополнен таблицей 6.2а «Модуль упругости модифицированных самоуплотняющихся бетонов», содержащей значения модуля упругости самоуплотняющегося бетона E_{cm} в зависимости от класса бетона по прочности на сжатие и марки бетонной смеси по растеканию конуса. Представленные значения модуля упругости бетона варьируются от 18 ГПа — для класса бетона С20/25 и марки по удобоукладываемости Р-4 (РК=76–85см), до 46 ГПа — для класса бетона С60/75 и марки по удобоукладываемости Р-1. Данный диапазон обуславливается увеличением расхода цемента при увеличении подвижности бетонной смеси и изменением физико-механических свойств цементного камня в бетонах разных классов по прочности на сжатие. Это в полной мере соответствует физическому смыслу и аналитической зависимости (20), представленной в разделе 3.

Значительному изменению подвергся раздел, посвященный усадке бетона (Приложение Б СНБ 5.03.01-2002). Так функция развития усадки бетона во времени β_{ds} принята согласно зависимости (25).

Предельные значения части усадки бетона, обусловленной испарением из него влаги, необходимо определять согласно скорректированной методики СНБ 5.03.01-2002, но с учетом коэффициентов, учитывающих влияние марок по удобоукладываемости бетонной смеси (таблица 1) и вида химических модификаторов (таблица 3). Согласно принятым изменениям увеличение подвижности бетонной смеси приводит к увеличению предельного значения части усадки бетона, обусловленной испарением из него влаги, а применение химических модификаторов, кроме ускорителей твердения, наоборот, приводит к ее снижению.

Уточнены значения коэффициентов α_{ds1} и α_{ds2} учитывающих вид применяемого цемента (таблица 2).

Широкую промышленную апробацию результатов исследований представляет опыт строительства первой в Республике Беларусь гидроэлектростанции на реке Неман г. Гродно из железобетонных конструкций с применением самоуплотняющегося бетона с участием автора в научно-техническом сопровождении производства бетонных работ. Этот опыт не имеет аналога в мировой практике строительства ГЭС.

Основываясь на результатах исследований и полученных экспериментально-теоретических зависимостях были разработаны состав бетона и технологические режимы производства бетонных работ.

В процессе научно-технического сопровождения регулярно производился отбор проб бетона для контроля необходимых физико-механических характеристик бетона: плотности, прочности на сжатие, растяжение, морозостойкости, водонепроницаемости, деформаций усадки.

Кроме этого с применением терморезисторов выполнялся контроль распределения температурных полей по сечению блоков различных размеров. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют, что основные факторы, обеспечивающие термическую трещиностойкость конструкций, оказались в пределах значений, предусмотренных технологией производства бетонных работ, т.е. разность температур в теле блока не превышала 18 °С. При этом максимальная температура ядра бетона была не выше 60 °С, а средняя температура остывания конструкции — не более 5 °С в час.

Результаты экспериментальных исследований усадки самоуплотняющегося бетона, примененного для бетонирования рисбермы ГЭС, в возрасте 4, 5, 6, 11, 18 и 24 суток показали, что усадка имеет значения на 30-50 % ниже в ранние сроки твердения, что соответствует возрасту бетона конструкций до 10 суток и на 25-35 % ниже в возрасте 10–24 суток, в сравнении с усадкой, рассчитанной по методике принятой в СНБ 5.03.01-2002.

Для производства бетонных работ в холодный период года, который определяется среднесуточной температурой ниже плюс 5 °С и минимальной в течении суток 0 °С, были предусмотрены дополнительные условия для обеспечения проектных требований предъявляемых к конструкции:

1) на расстоянии 5–15 см от поверхности вертикальных стен укладывались греющие провода согласно разработанным схемам;

2) горизонтальные поверхности бетона укрывали пленкой после укладки бетона. При достижении разницы температур бетона в центре массива и у горизонтальной поверхности бетона 16 °С поверхность бетона укрывалась эффективным утеплителем типа Этафом или минераловатными плитами;

3) при достижении разницы температур в центре массива и у вертикальной поверхности 16 °С включалась система прогрева, при помощи которой поддерживалась разность температур менее 16 °С;

4) указанный уход за бетоном осуществлялся до набора проектной прочности бетона и снижения температуры в центре массива до 30 °С.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Установлена взаимосвязь основных физико-механических характеристик самоуплотняющегося бетона с объемной концентрацией и свойствами цементного камня, минералогическими характеристиками цемента, содержанием и свойствами минеральных и химических добавок, истинным водовязущим отношением [1–4, 6].

2. Разработана и подтверждена экспериментальными данными математическая модель прочности цементного камня и его составляющих в бетоне, учитывающая влияние продуктов гидратации цемента и капиллярной пористости [1].

3. На основе результатов комплекса экспериментально-теоретических исследований получена математическая модель прочности на сжатие самоуплотняющегося бетона в различном возрасте, учитывающая влияние его структурных характеристик. Прочность на растяжение самоуплотняющегося бетона допускается принимать по СНБ 5.03.01-2002 с коэффициентом 1,05 [6].

4. Установлено, что модуль упругости самоуплотняющегося бетона обуславливается минералогическим составом цемента, его плотностью и удельной поверхностью, водовязущим отношением, объемным содержанием и свойствами минеральных и химических добавок. На основе учета указанных факторов разработаны экспериментально-теоретические модели модуля упругости цементного камня и бетона в виде обобщенной модели Реуса. Также в результате исследований установлено, что значения относительных продольных деформаций могут приниматься по зависимостям нормативных документов, принятых для традиционного тяжелого бетона, коэффициент поперечных деформаций может быть принят равным 0,2 [2].

5. Получены экспериментально-теоретические модели усадки самоуплотняющегося бетона в виде уточненных моделей СНБ 5.03.01-2002 и DIN EN 1992-1-1 в части учета усадочных деформаций от испарения влаги при твердении бетона [3, 4].

6. Полученные результаты исследований и разработанные математические модели рассматриваемых физико-механических свойств самоуплотняющегося бетона представлены в Изменении № 5 СНБ 5.03.01-2002.

7. Научные результаты исследований использованы при внедрении самоуплотняющегося бетона в Республике Беларусь и, в частности, при возведении железобетонных конструкций ГЭС на реке Неман г. Гродно [5].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Результаты диссертационной работы рекомендуется использовать при проектировании и научно-техническом сопровождении изготовления железобетонных изделий и монолитных конструкций из самоуплотняющегося бетона и, в частности, монолитных конструкций ГЭС. Результаты исследований рекомендуется также использовать при разработке методик проектирования составов модифицированных бетонов с учетом заданных прочностных и деформационных характеристик.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Научные издания, включенные в перечень ВАК

1. Блещик, Н.П. Прочность на сжатие цементного камня модифицированного различными химическими модификаторами и тонкодисперсными наполнителями / Н.П. Блещик, Д.С. Котов // Вестник БрГТУ. Строительство и архитектура. – 2008.–№ 1.– С.172–179.

2. Блещик, Н.П. Модуль упругости бетона, модифицированного химическими и тонкодисперсными минеральными наполнителями / Н.П. Блещик, Д.С. Котов // Строительная наука и техника. – 2008. – № 2 (17). – С. 10–19.

3. Котов, Д.С. Деформации усадки бетона, модифицированного химическими и тонкодисперсными минеральными наполнителями / Д.С. Котов // Строительная наука и техника. – 2008. – № 6 (21). – С. 68–75.

Материалы и сборники трудов конференций и семинаров

4. Блещик, Н.П. К вопросу расчета усадочных деформаций бетона, модифицированного химическими добавками и тонкодисперсными наполнителями / Н.П. Блещик, Д.С. Котов // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республике Беларусь: сборник статей XV Междунар. науч.-практ. семинара., г. Новополоцк, 27 – 27 ноября 2008 г.: в 2 т. / ПГУ; редкол.: Т.М. Пецольд [и др.]. – Новополоцк, 2008. – Т.2. – С. 13–21.

5. Блещик, Н.П. Эффективность применения самоуплотняющегося бетона при строительстве Гродненской ГЭС / Н.П. Блещик, В.И. Дзядук, Н.Н. Калиновская, Д.С. Котов // Проблемы современного бетона и железобетона: сборник трудов: в 2 ч. / редкол.: М.Ф. Марковский (гл. ред.) [и др.]. – Минск: Минсктиппроект, 2009. – Ч. 2: Технология бетона. – С. 118–131.

6. Блещик, Н.П. Основы прогнозирования технологических и физико-механических свойств самоуплотняющегося бетона / Н.П. Блещик, А.Н. Рак, Д.С. Котов // Проблемы современного бетона и железобетона: сборник трудов: в 2 ч. / редкол.: М.Ф. Марковский (гл. ред.) [и др.]. – Минск: Минсктиппроект, 2009. – Ч. 2: Технология бетона. – С. 132–159.

РЭЗІЮМЭ

Котаў Дзмітрый Святаслававіч

ФІЗІКА-МЕХАНІЧНАЯ ЎЛАСЦІВАСЦІ БЕТОНУ, ЯКІ САМАЎШЧАЛЬНЯЕЦЦА

Ключавыя словы: бетон, які самаўшчальняецца, цэментны камень, мадыфікатары, мінеральныя дадаткі, структура, трываласць, дэфармацыйнасць, структурна-механічная мадэль.

Мэта працы – на выснове вынікаў комплексу тэарытычных і эксперыментальных даследаванняў уласцівасцяў бетону, які самаўшчальняецца, распрацаваць фізічныя і матэматычныя мадэлі яго асноўных характарыстык, якія неабходны для праектавання жалезабетонных канструкцый і тэхналагічных рэжымаў іх узвядзення.

Эксперыментальныя даследаванні выконваліся з выкарыстаннем стандартызаваных метадык і метадаў статыстычнай апрацоўкі эксперыментальных дадзеных.

У працы атрыманы эксперыментальна і навукова абгрунтаваныя структурныя матэматычныя мадэлі трываласці на сціск і расцяжэнне, модуля пругкіх дэфармацый, падоўжных і папярочных дэфармацый і дэфармацый усаджвання бетону, які самаўшчальняецца.

Вынікі даследаванняў выкарыстаны пры распрацоўцы Змянення № 5 БНБ 5.03.01-2002 «Бетонныя і жалезабетонныя канструкцыі», складаў бетону, які самаўшчальняецца і тэхналагічных рэжымаў узвядзення канструкцый ГЭС на рацэ Нёман, г. Гродна, якія забяспечваюць дасягненне зададзеных тэхнічных характарыстык бетону і неперавышэння крытэрыяльных тэмпературна-усаджвальных дэфармацый масіўных маналітных канструкцый.

РЕЗЮМЕ

Котов Дмитрий Святославович

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА САМОУПЛОТНЯЮЩЕГОСЯ БЕТОНА

Ключевые слова: самоуплотняющийся бетон, цементный камень, модификаторы, минеральные добавки, структура, прочность, деформативность, структурно-механическая модель

Цель работы – на основе результатов комплекса теоретических и экспериментальных исследований свойств самоуплотняющегося бетона разработать физические и математические модели его основных характеристик, необходимых для проектирования железобетонных конструкций и технологических режимов их возведения.

Экспериментальные исследования выполнялись с использованием стандартизированных методик и методов статистической обработки экспериментальных данных.

В работе получены экспериментально и научно обоснованные структурные математические модели прочности на сжатие и растяжение, модуля упругости, продольных и поперечных деформаций и деформаций усадки самоуплотняющегося бетона.

Результаты исследований использованы при разработке Изменения № 5 СНБ 5.03.01-2002 «Бетонные и железобетонные конструкции», составов самоуплотняющегося бетона и технологических режимов возведения конструкций ГЭС на реке Неман, г. Гродно, обеспечивающих достижение заданных технических характеристик бетона и не превышение критериальных температурно-усадочных деформаций массивных монолитных конструкций.

SUMMARY

Dmitry Kotov

PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF SELF-COMPACTING CONCRETE

Key-words: self-compacting concrete, cement stone, modifying agents, disperse filling agents, structure, strength, deformability, structural-mechanical model.

The object of the paper is the development of the structural mathematical models of self-compacting concrete physical-mechanical properties based on the results of experimental-technical investigations.

Experimental investigations were held using standardized techniques and methods of experimental data statistical treatment.

Experimental- and science-based structural mathematical models of self-compacting concrete compressive and tensile strength, modulus of elasticity, longitudinal and lateral strains and shrinkage strains are obtained.

The investigations results are applied to develop Amendment 5 of BNB 5.03.01-2002 "Plain and Reinforced Concrete Structures", self-compacting concrete mixes and practice of erecting Neman river hydroelectric power plant in Grodno that provide concrete specified technical characteristics achievement and not exceeding criterion contraction strains for heavy cast-in-place constructions.

Научное издание

КОТОВ Дмитрий Святославович

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
САМОУПЛОТНЯЮЩЕГОСЯ БЕТОНА

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

по специальности
05.23.05 – Строительные материалы и изделия

Подписано в печать 23.04.2013. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Ризография.
Усл.-печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 0,91. Тираж 80. Заказ 388.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический
университет. ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.