

Деформации усадки бетона, модифицированного химическими и тонкодисперсными минеральными наполнителями¹

Аспирант, младший научный сотрудник Д.С. Котов*,
РУП «Институт БелНИИС»

Необходимость прогнозирования величины усадки бетона и железобетонных конструкций в последнее время приобретает все большее значение в связи с интенсивным развитием строительства зданий и сооружений из монолитных и сборно-монолитных железобетонных конструкций на основе бетонных смесей, модифицированных химическими модификаторами и тонкодисперсными минеральными наполнителями. Данная проблема рассматривалась многими исследователями, в том числе в работах [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]. Как показывают многолетние наблюдения за состоянием эксплуатирующихся конструкций, практически в любой монолитной железобетонной конструкции могут быть обнаружены трещины различных размеров, приводящие к снижению их долговечности [1]. В этой связи исследователи многих стран мира продолжают изучать влияние различных факторов на величину усадки бетона и железобетона и разрабатывать уточненные методики расчета их значений на стадии проектирования конструктивных систем зданий и сооружений.

Представленные в настоящей статье результаты исследований явились основой для уточнения нормативных значений усадки бетона, модифицированного химическими добавками и тонкодисперсными минеральными наполнителями, а также для совершенствования методик проектирования состава бетона с учетом прогнозируемых значений деформаций усадки.

Исследования выполнялись по заданию Минстройархитектуры Белоруссии по теме: «Провести исследования влияния содержания в бетоне арматуры, пластифицирующих, расширяющих и минеральных тонкодисперсных добавок на его физико-механические свойства, в том числе на собственные деформации, и разработать дополнение к СНБ 5.03.01-02 в части определения деформаций усадки и потерь предварительного напряжения в арматуре с рекомендациями с целью массового применения бетонов и растворов с компенсированной усадкой» (рег. № 20053269).

Предпосылки по уточнению методики расчета деформаций усадки

Анализ методов оценки деформаций усадки цементного камня и железобетона представлен в работах [2, 4, 9, 10, 11, 12, 13]. Из этого анализа можно сделать вывод о том, что пока нет единства во взглядах и в методах расчета усадки бетона и железобетона, причем как на стадии расчета железобетонных конструкций, так и на стадии проектирования состава бетона с заданными значениями усадки. В работах [9, 10] предложена методика расчета усадки бетона и железобетонных конструкций на основе учета структурно-технологических и физико-химических факторов, которая может быть использована при подборе состава бетона с заданными значениями усадки. В них показано, что деформации усадки бетона обуславливаются множеством факторов конструктивного и технологического характера. Однако предложенная методика требует наличия сведений о физико-химических свойствах цемента и использования сложной компьютерной техники. Для использования ее на стадии проектирования конструкций необходимы дополнительные упрощения с целью разработки инженерной методики. Данное допущение может иметь место и в связи с тем, что цементы, производимые в Республике Беларусь, имеют сходный минералогический состав. Как отмечается в [14], расчетная методика должна быть уточнена в связи с применением химических модификаторов и (или) тонкодисперсных минеральных наполнителей в бетонной смеси, что может в значительной степени изменять физико-механические характеристики бетона, такие как степень гидратации цемента, сроки схватывания, прочность в раннем возрасте и т.д., а, соответственно, и деформации усадки.

В EN 1992 – 2 – 1 [15] и, соответственно, в СНБ 5.03.01 – 02 [16] представлена инженерная методика расчета усадки бетона ε_{cs} , в которой ее величина рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cs,d} + \varepsilon_{cs,a}, \quad (1)$$

где $\varepsilon_{cs,d}$ – часть усадки бетона, обусловленная испарением из него влаги;

$\varepsilon_{cs,a}$ – часть усадки бетона, обусловленная процессами твердения бетона.

Величина усадки бетона $\varepsilon_{cs,d}$ определяется по формуле:

$$\varepsilon_{cs,d} = \beta_{ds} \cdot \varepsilon_{cs,d,\infty}, \quad (2)$$

¹ Исследования выполнены совместно с Н.С.Протьюко под руководством д.т.н., профессора Н.П. Блещика

где $\varepsilon_{cs,d,\infty}$ – предельные значения части усадки, которые допускается определять по таблице 6.3 [16];

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

$$\beta_{ds} = \left[\frac{(t-t_s)/t_1}{350(h_0/h_1)^2 + (t-t_s)/t_1} \right]^{0,5}, \quad (3)$$

где t – возраст бетона, для которого рассчитывается величина части усадки, сут.;

t_s – возраст бетона к моменту окончания влажного хранения бетона, сут.;

$$h_0 = \frac{2A_c}{u};$$

A_c, u – соответственно, площадь и периметр поперечного сечения элемента, мм;

$$h_1 = 100 \text{ мм};$$

$$t_1 = 1 \text{ сут.}$$

Предельные значения части усадки бетона $\varepsilon_{cs,d,\infty}$, приведенные в таблице 6.3 [16], применимы для бетонных смесей с марками по удобоукладываемости П2 и П3. Для бетонных смесей, имеющих другие марки по удобоукладываемости, значения $\varepsilon_{cs,d,\infty}$, принятые по таблице 6.3 [16], следует умножать на поправочные коэффициенты, равные:

- при П1, СЖ1-СЖ3, Ж1-Ж4 – 0,70;
- при П4, П5 – 1,20.

При определении промежуточных значений части усадки бетона $\varepsilon_{cs,d,\infty}$ по таблице 6.3 [16] допускается линейная интерполяция.

Величину части усадки бетона $\varepsilon_{cs,a}$ следует определять по формуле:

$$\varepsilon_{cs,a} = \beta_{as} \cdot \varepsilon_{cs,a,\infty}, \quad (4)$$

где $\varepsilon_{cs,a,\infty} = -2,5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} \leq 0$; (5)

$$\beta_{as} = 1 - \exp(-0,2 t^{0,5}); \quad (6)$$

t – время, сут.

Из приведенных формул и таблиц следует, что основными факторами, обуславливающими величину усадки бетона, являются: класс бетона по прочности на сжатие, относительная влажность окружающей среды, геометрические размеры конструкций, а удобоукладываемость бетонной смеси учитывается грубо, в зависимости от жесткости или осадки стандартного конуса.

Методика, предложенная в DIN EN 1992-1-1 [17], по сути, аналогична [15] и [16] с видоизменением функции β_{ds} , определяемой как:

$$\beta_{ds} = \frac{(t-t_s)}{0,04 \cdot \sqrt{h_0^3 + (t-t_s)}}, \quad (7)$$

где все входящие величины приняты в соответствии с (3).

Отклонения расчетных значений, рассчитанных согласно методике [16], от фактических экспериментальных данных, приведенных далее, представлены на рис. 1. Как видно из рисунка, разброс составляет от плюс 300% до минус 50%, что не может считаться удовлетворительным.

При этом не учитываются такие важные факторы, как вид цемента (его минералогический состав и удельная поверхность, обуславливающие кинетику набора прочности бетона); наличие химических модификаторов и тонкодисперсного минерального наполнителя; влияние литых и самоуплотняющихся бетонных смесей, удобоукладываемость которых определяется распылом стандартного конуса.

Возможность учета указанных факторов при расчете усадки бетона на стадии проектирования конструкций может быть реализована путем уточнения коэффициентов $\alpha_{ds,1}$ и $\alpha_{ds,2}$ Приложения Б [16], входящих в зависимости, определяющие предельные значения части усадки бетона $\varepsilon_{cs,d,\infty}$. При этом

зависимости (4)–(6), определяющие незначительную величину части усадки бетона $\varepsilon_{cs,d}$, могут быть оставлены в прежнем виде.

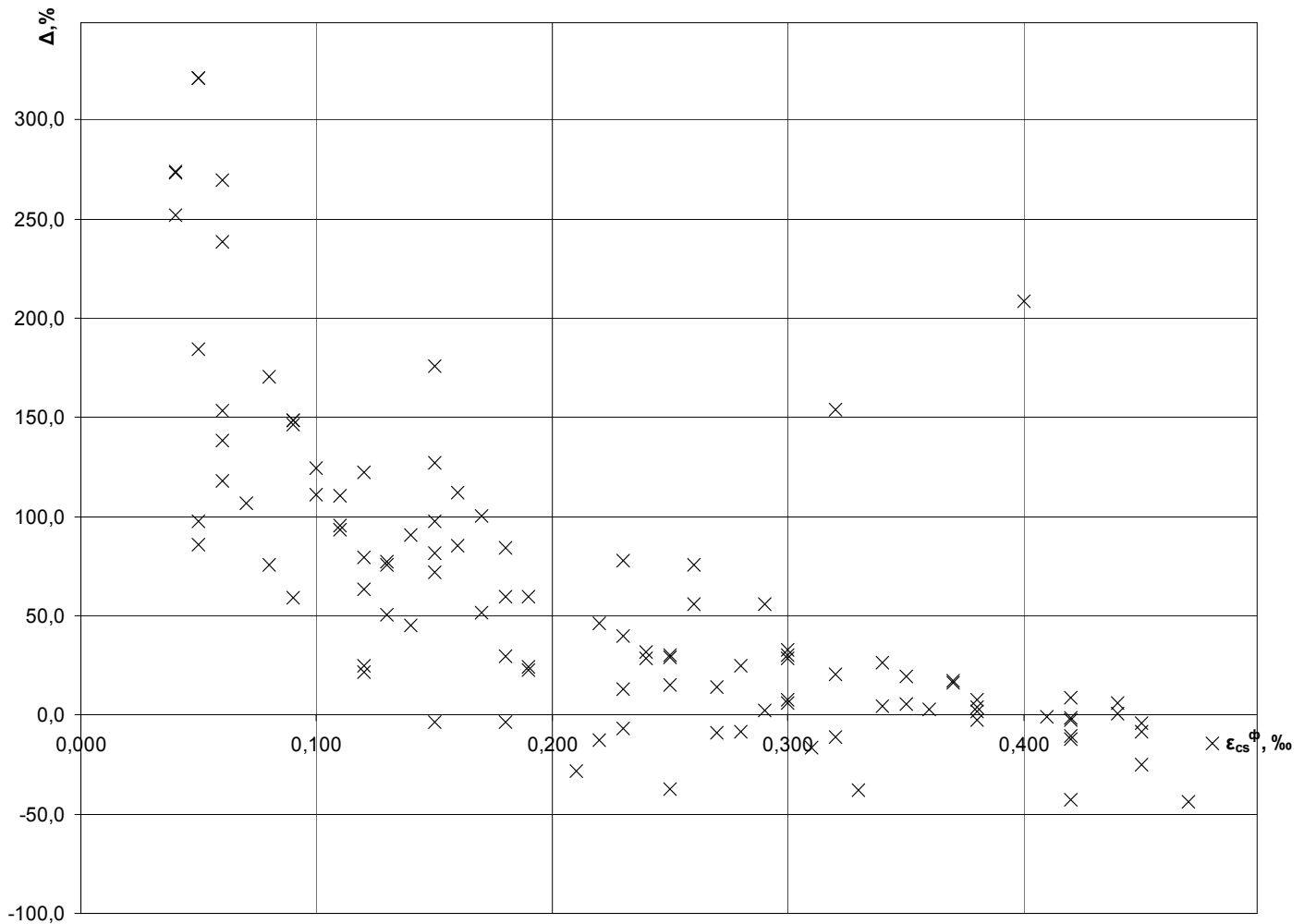


Рисунок 1. Отклонения расчетных значений усадки бетона от опытных данных

Значения коэффициентов $\alpha_{ds,1}$ и $\alpha_{ds,2}$ могут быть получены на основе результатов экспериментальных исследований и зависимостей (Б.11 – Б.14) Приложения Б [16]:

$$\varepsilon_{cs,d,\infty} = \left[(220 + 110\alpha_{ds,1}) \cdot \exp\left(-\alpha_{ds,2} \frac{f_{cm}}{f_{cm,o}}\right) \right] \cdot 10^6 \cdot \beta_{RH}, \quad (\text{Б.11})$$

где f_{cm} – средняя прочность бетона в возрасте 28 суток, МПа;

$$f_{cm,o} = 10 \text{ МПа};$$

$\alpha_{ds,1}, \alpha_{ds,2}$ – коэффициенты, учитывающие вид цемента и принимаемые по таблице Б.1;

$$\beta_{RH} = -1,55 \cdot \left[1 - \left(\frac{RH}{RH_0} \right)^3 \right] \text{ при } RH < 99 \% \beta_{sl}; \quad (\text{Б.12})$$

$$\beta_{RH} = 0,25 \text{ при } RH \geq 99 \% \beta_{sl}; \quad (\text{Б.13})$$

$$\beta_{sl} = \left(\frac{3,5 f_{cm,o}}{f_{cm}} \right)^{0,1}; \quad (\text{Б.14})$$

$$RH_0 = 100 \text{ \%}.$$

$$\alpha_{ds.1} = \left[\frac{\varepsilon_{cs.d.\infty} \cdot 10^6}{\beta_{RH} \exp\left(-\alpha_{ds.2} \frac{f_{cm}}{f_{cm.o}}\right)} - 220 \right] \cdot \frac{1}{110}. \quad (8)$$

Таблица Б.1. Значения коэффициентов $\alpha_{ds.1}$, $\alpha_{ds.2}$

Вид цемента	$\alpha_{ds.1}$	$\alpha_{ds.2}$
Медленно твердеющий	3,0	0,13
Нормально и быстротвердеющий	4,0	0,11
Быстротвердеющий высокопрочный	6,0	0,12

Значение $\alpha_{ds.2}$ изменяется в соответствии с данными таблицы Б.1 в незначительных пределах (от 0,11 до 0,13) и может быть принято равным средней величине 0,12.

В соответствии с зависимостями (1) и (2) значение $\varepsilon_{cs.d.\infty}$ должно вычисляться по формуле:

$$\varepsilon_{cs.d.\infty} = \frac{\varepsilon_{cs}^{on} - \varepsilon_{cs.a}}{\beta_{ds} \cdot k}, \quad (9)$$

где ε_{cs}^{on} – опытное значение относительных деформаций усадки бетона в возрасте 28 сут;

$\varepsilon_{cs.a}$ – значение части усадки бетона, вычисляемое по формулам (4)–(6) при $t = 28$ суток и f_{ck} , определяемом по формуле:

$$f_{ck} = f_{c.cube}^{on} \cdot 0,8; \quad (10)$$

β_{ds} – функция, вычисляемая по зависимости (3) при $t = 28$ сут;

k – значение коэффициента, применяемого в зависимости от удобоукладываемости опытной бетонной смеси. Для литых и самоуплотняющихся смесей значения k при предварительных расчетах следует принимать равным 1,2.

Характеристика материалов и методика экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования проводились с использованием следующих материалов:

- цемент ПЦ 500-Д0 производства ОАО «Красносельскстройматериалы», $K_{нз}=0,27$;
- пластификаторы: суперпластификатор СМ-1 (ТУ ВУ100138369.466-2006), гиперпластификаторы ГП-1 (ТУ ВУ 100230600.447-2006), Stachement 2000-М Ж30 (St-2000) (ТУ ВУ 800013176.545-2007);
- минеральная добавка – тонкодисперсный доломит, выпускаемый ОАО «Доломит» по ГОСТ 16557-78 «Минеральный порошок для асфальтобетонных смесей. Технические условия», $S_{yd.o}=50, 200$ и $450 \text{ м}^2/\text{кг}$;
- мелкий заполнитель – песок карьера «Волма» Минского района с $M_{кр}=2,69$, $S_{yd} = 8,1 \text{ м}^2/\text{кг}$;
- крупный заполнитель – гранитный щебень ПРУП «Гранит» с межзерновой пустотностью ($m_{н.кр}$) 0,37, удельной поверхностью $S_{yd.кр} = 0,365 \text{ м}^2/\text{кг}$;
- питьевая вода, соответствующая требованиям СТБ 1114.

Для нахождения значений $\alpha_{ds.1}$ были проведены экспериментальные исследования деформаций усадки бетона, модифицированного различными химическими добавками, и содержащего минеральные тонкодисперсные наполнители. Выдерживание бетона производилось в средах минимум с двумя значениями относительной влажности. Удобоукладываемость бетонной смеси варьировалась в широких пределах – от жесткости до расплыва конуса. Варьировалась и средняя прочность бетона (класс бетона по прочности на сжатие).

Водовязущее отношение варьировалось в пределах 0,32–0,55.

Содержание тонкодисперсного наполнителя принималось в количестве 20–40% от общей массы цемента и наполнителя.

Относительное содержание и вид пластификаторов принимались следующими: 0,2–0,4% для ГП-1; 0,6-1% для СМ-1 и 0,17–0,23% для St-2000 от массы вяжущего (цемент + наполнитель), в расчете на сухое вещество.

При определении усадки бетона использовались образцы-призмы с размерами 70×70×225мм.

Образцы-призмы изготавливались в одногнездовых металлических формах. Уплотнение бетонных смесей в формах осуществлялось в зависимости от их подвижности. Заформованные образцы до распалубки выдерживались 1 сутки в формах при температуре $20 \pm 2^\circ\text{C}$. После распалубки, но не позднее 2 часов со времени распалубки, образцы устанавливались в камеру нормально-влажностного твердения с температурой $20 \pm 2^\circ\text{C}$ и влажностью $90 \pm 5\%$, и камеру с температурой $20 \pm 2^\circ\text{C}$ и влажностью, соответствующей экспериментальной ($40 \pm 5\%$, $60 \pm 5\%$ и $75 \pm 5\%$).

Определение изменений линейных деформаций образцов осуществлялось с помощью индикаторной стойки, состоящей из стойки для крепления индикатора и индикатора часового типа с ценой деления 1×10^{-3} мм. За базу измерений принимался стальной эталон длиной 225 мм.

Каждая серия образцов, на которых производился контроль усадки в возрасте 2, 3, 7, 14 и 28 суток, содержала по 2 образца-призмы для каждого из 2 условий.

Результаты исследований

Полученные значения деформации усадки бетонов экспериментальных составов представлены на рисунках 2–5.

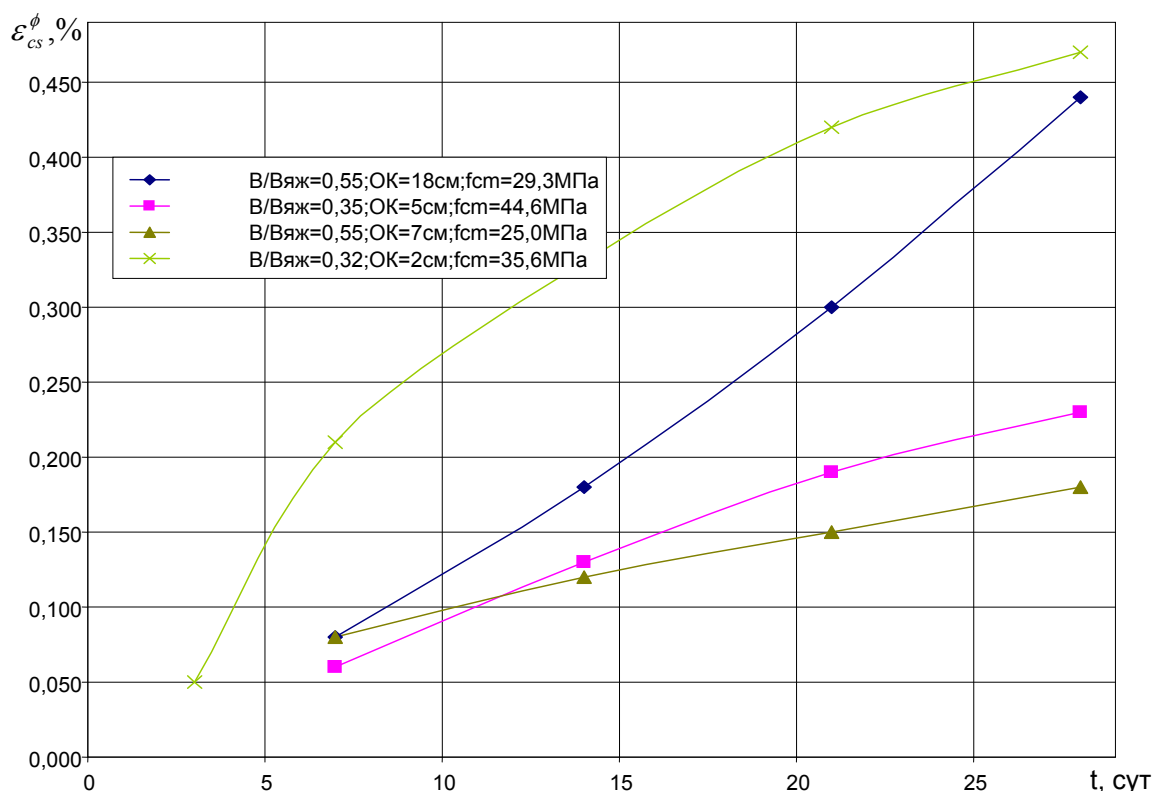


Рисунок 2. Опытные значения деформации усадки экспериментальных составов без химических модификаторов выдерживаемых при RH=60 и 75%

Предварительно в качестве среднего может быть принято значение $\alpha_{ds,1}$, представленное в таблице Б.1 [16] для нормально- и быстротвердеющего цемента, равное 4. Это значение изменяется в зависимости от удобоукладываемости бетонной смеси, применяемых тонкодисперсных наполнителей и вида химических добавок в широких пределах (от 2 до 7).

Анализ полученных данных показал, что коэффициент $\alpha_{ds.1}$ увеличивается при увеличении показателей удобоукладываемости бетонной смеси и уменьшается при увеличении содержания тонкодисперсных наполнителей и введении в состав бетона химических добавок. Причем наибольшее снижение коэффициента $\alpha_{ds.1}$ достигается при введении гиперспластификаторов.

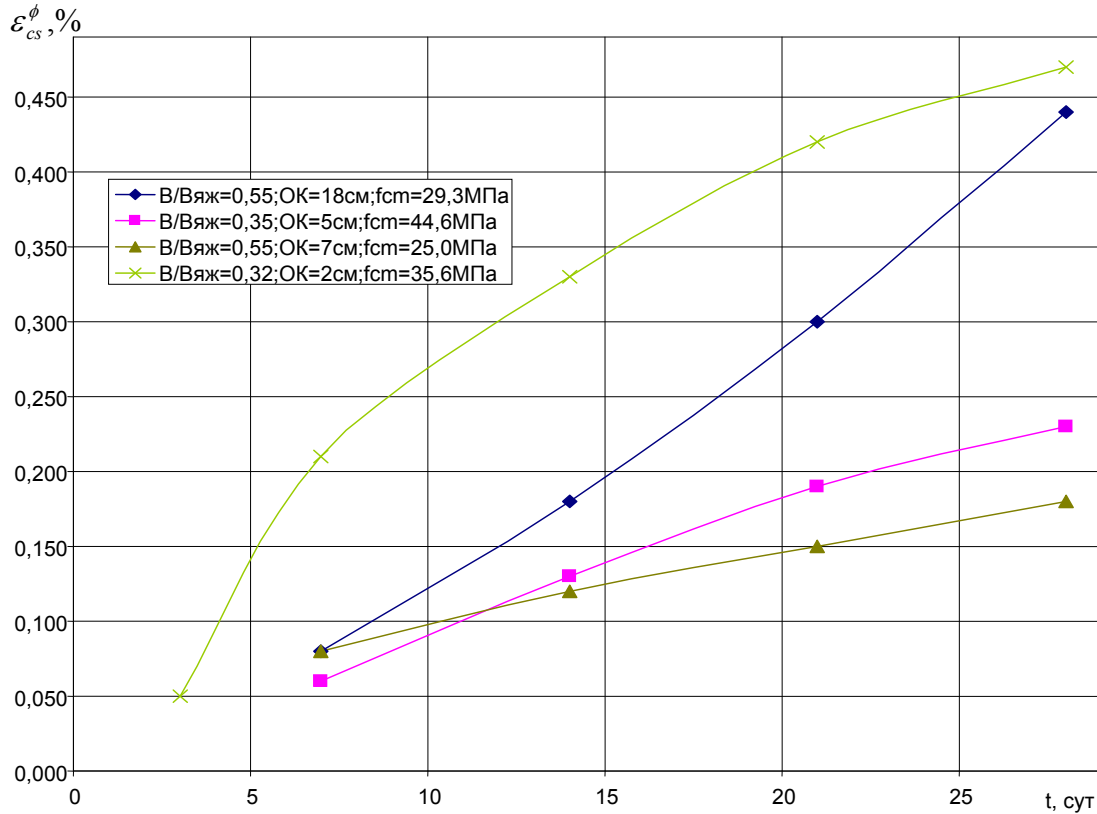


Рисунок 3. Опытные значения деформации усадки экспериментальных составов модифицированных добавками С-3 или СМ-1 выдерживаемых при RH=60 и 75%

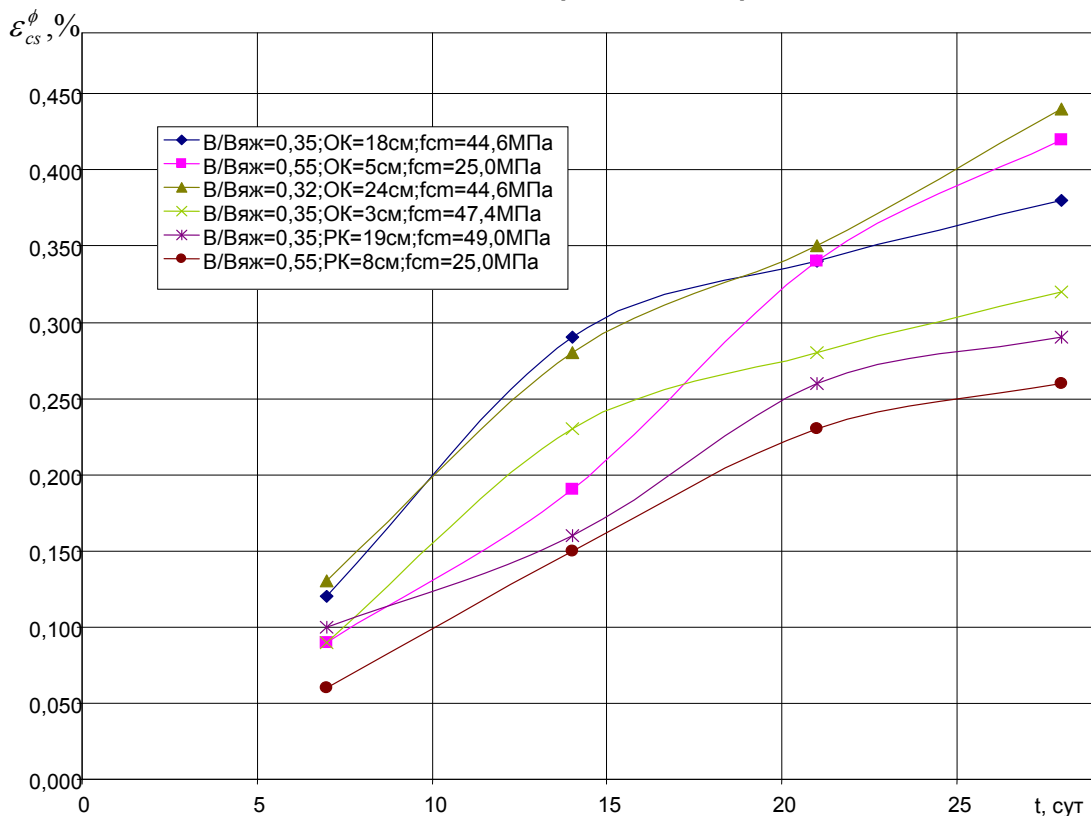


Рисунок 4. Опытные значения деформации усадки экспериментальных составов модифицированных добавками ГП-1 или St-2000 выдерживаемых при RH=60 и 75%

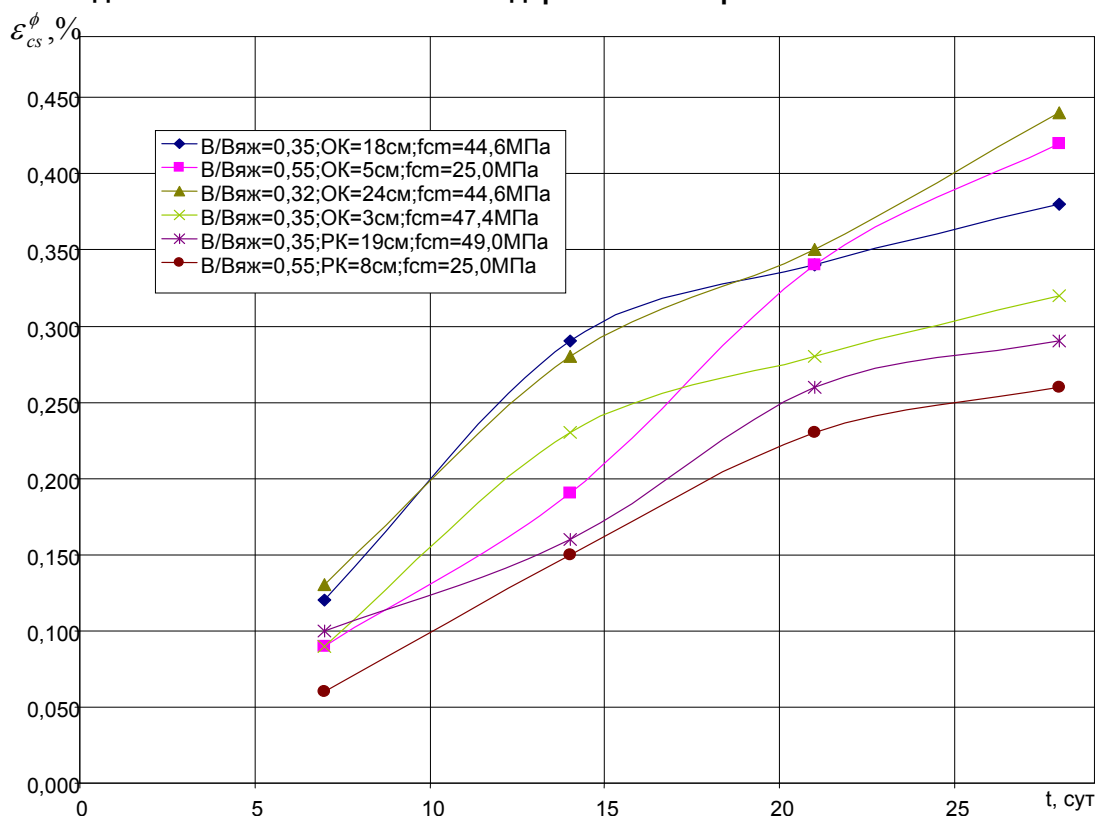


Рисунок 5. Опытные значения деформации усадки экспериментальных составов модифицированных различными добавками выдерживаемых при RH=40%

В результате математико-статистической обработки экспериментальных данных предложено принять следующий вид функции $\varepsilon_{cs,d}$:

$$\varepsilon_{cs,d} = k \cdot \beta_{ds} \cdot \varepsilon_{cs,d,\infty}, \quad (11)$$

а функция $\varepsilon_{cs,d,\infty}$ должна быть записана в виде:

$$\varepsilon_{cs,d,\infty} = \left[(220 + 110\alpha_{ds,1.M}) \cdot \exp\left(-\alpha_{ds,2} \frac{f_{cm}}{f_{cm,o}}\right) \right] \cdot 10^6 \cdot \beta_{RH}, \quad (12)$$

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 (3);

$\alpha_{ds,1.M}$ – коэффициент для бетонов, модифицированных химическими добавками, – должен определяться путем умножения коэффициента $\alpha_{ds,1}$ на коэффициент k_M , который следует принимать равным значениям, представленным в таблице 2. Значения коэффициента $\alpha_{ds,1}$ в зависимости от вида цемента следует принимать по данным таблицы 3.

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, РК-1, РК-2	1,2
РК-3, РК-4, РК-5 (SF-1), РК-6 (SF-2), РК-6 (SF-3)	1,3

Таблица 2. 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

Таблица 3. 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

В соответствии с полученными значениями коэффициентов $\alpha_{ds.1}$, k_M и k были рассчитаны новые значения деформации усадки бетона, которые в сопоставлении с фактическими значениями деформаций усадки представлены на рис. 6.

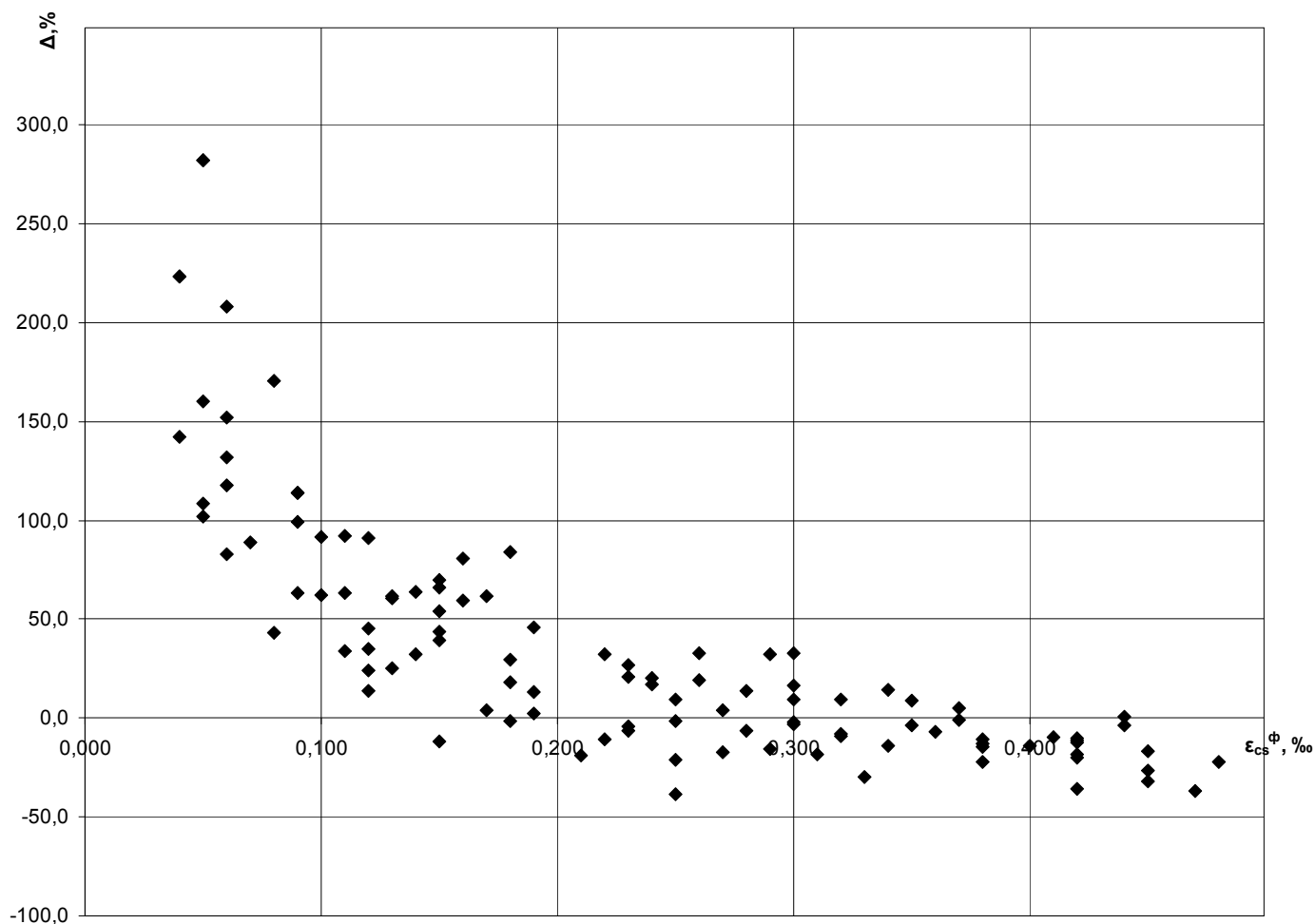


Рисунок 6. Отклонения расчетных значений усадки бетона от опытных данных

Котов Д.С. Деформации усадки бетона, модифицированного химическими и тонкодисперсными минеральными наполнителями

Представленные данные показывают удовлетворительные отклонения для образцов в возрасте 28 суток (в пределах $\pm 30\%$). Однако отклонения в более раннем возрасте (2-21-е сутки) составили от плюс 250% до минус 40%, что не может считаться удовлетворительным.

Очевидно, что возможность снижения разброса отклонений деформаций усадки в раннем возрасте связана с необходимостью уточнения функции β_{ds} , описывающей развитие усадки во времени.

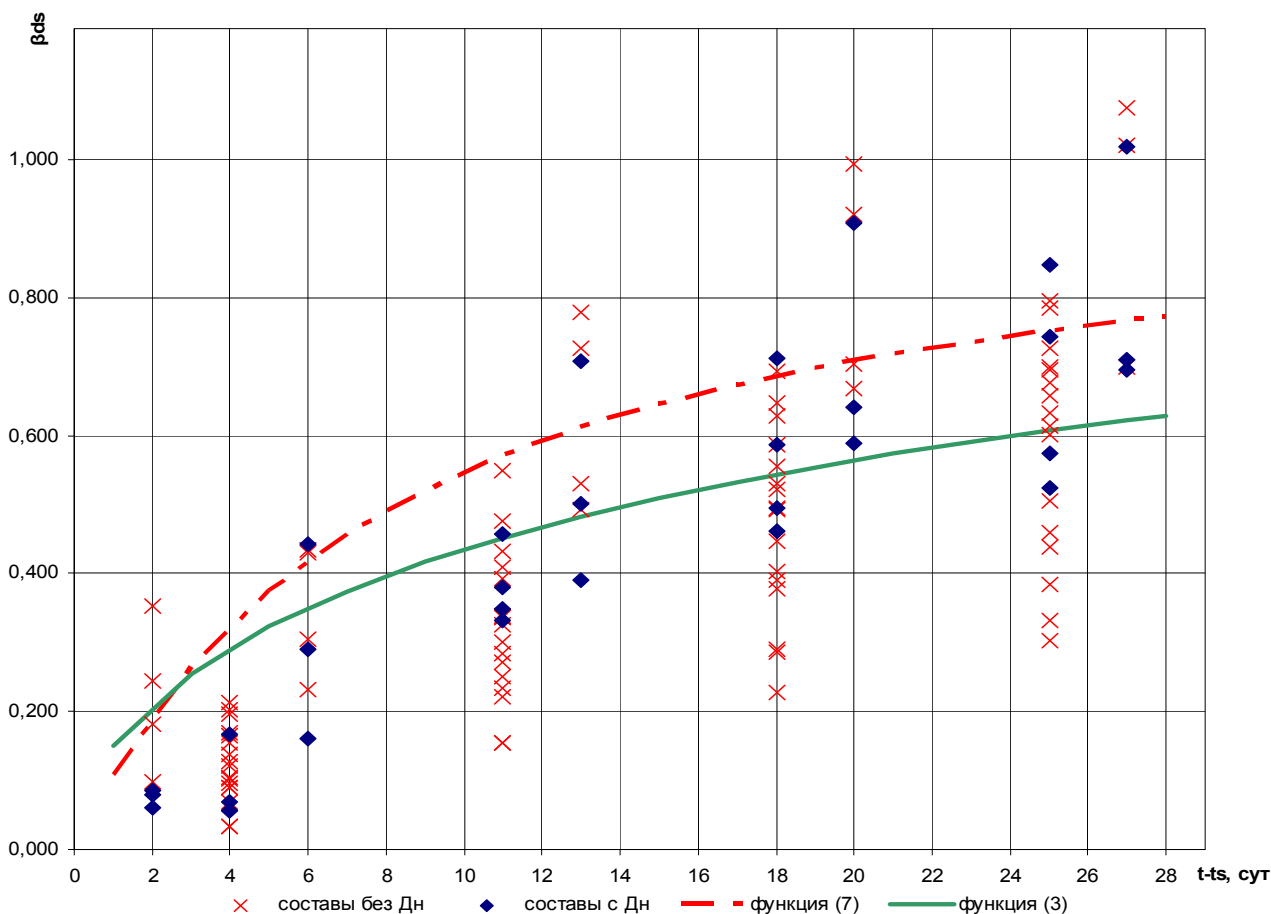


Рисунок 7. Соотношения опытных значений функции β_{ds} по (13) и значений по (3) и (7)

На рис. 7 представлены значения $\beta_{ds,i}$ для опытных значений деформаций усадки, рассчитанных согласно (13).

$$\beta_{ds,i}^{\tilde{i}} = \frac{\varepsilon_{cs,i}^{\tilde{i}} - \varepsilon_{cs,a,i}}{k_i \cdot \varepsilon_{cs,d,\infty,i}}, \quad (13)$$

где $\varepsilon_{cs,i}^{\tilde{i}}$ — опытное значение относительных деформаций усадки бетона в различном возрасте;

$\varepsilon_{cs,a,i}$ — часть усадки бетона, обусловленная процессами твердения бетона, вычисляемая по формулам (4)–(6);

$\varepsilon_{cs,d,\infty,i}$ — предельные значения части усадки, определяемые по (12);

k — коэффициент, учитывающий влияние марок по удобоукладываемости бетонной смеси, представленный в таблице 1.

В результате математико-статистической обработки экспериментальных данных предложено принять следующий вид функции β_{ds} для составов бетона без тонкодисперсного минерального наполнителя:

$$\beta_{ds} = \left[\frac{(t-t_s)}{0,04 \cdot \sqrt{h_0^3} + (t-t_s)} \right]^{1.8}, \quad (14)$$

где все входящие величины приняты в соответствии с (3).

В случае применения тонкомолотого минерального наполнителя, в количестве от 10 до 30% от массы вяжущего, значение функции β_{ds} следует определять путем умножения значения β_{ds} , полученного по формуле (14), на коэффициент $K_{дн} = 1,1$.

С учетом (11), (12) и (14) был произведен перерасчет новых значений деформаций усадки для всех экспериментальных составов. Отклонения расчетных величин от опытных представлены на рис. 8.

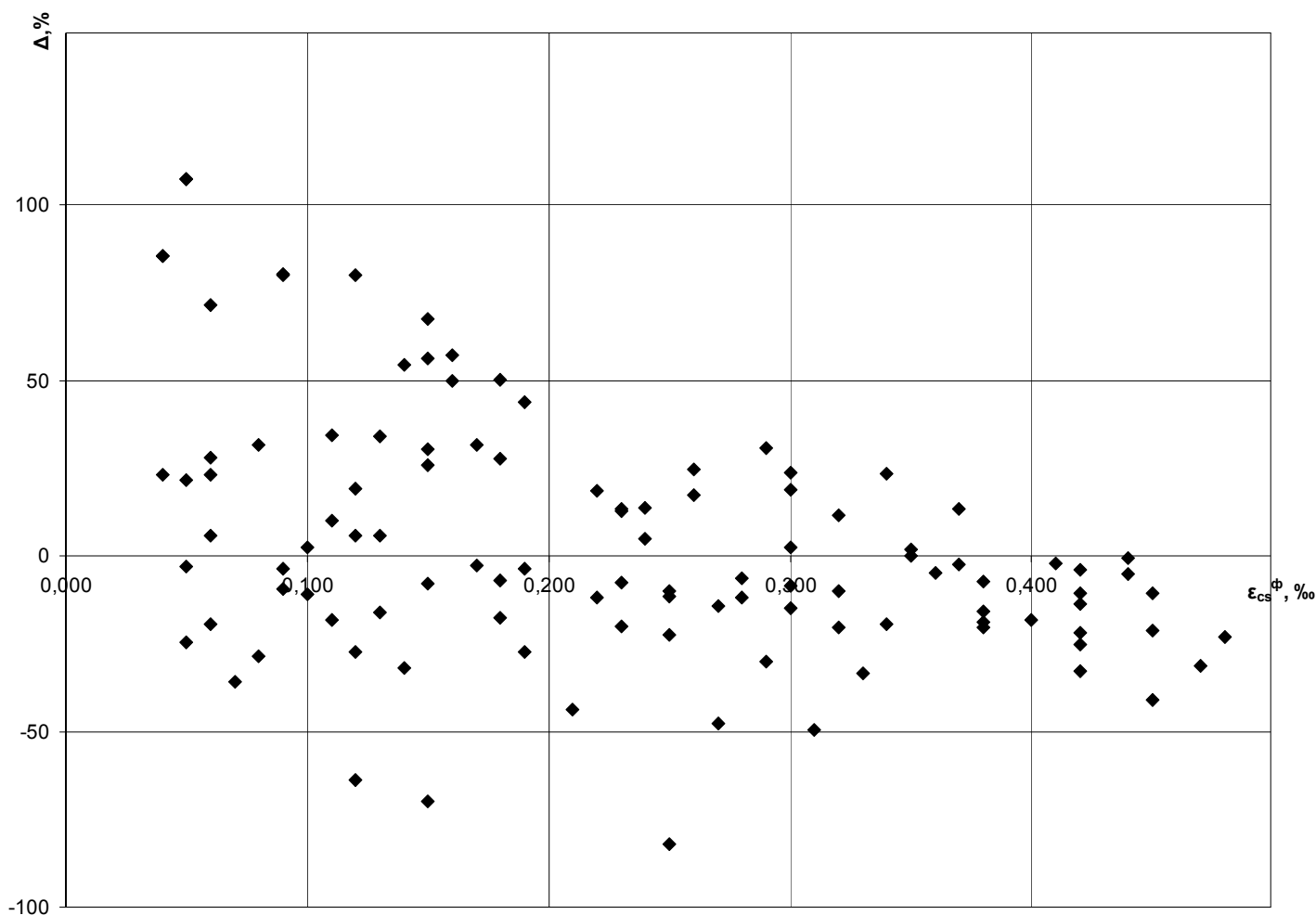


Рисунок 8. Отклонения расчетных значений усадки бетона от опытных данных

Выводы

1. Представлены результаты комплекса экспериментально-теоретических исследований, позволивших установить основные закономерности усадки бетона, модифицированного химическими модификаторами и тонкодисперсным наполнителем.
2. Результаты экспериментальных исследований усадки бетона в возрасте 28-ми суток, модифицированного химическими модификаторами и тонкодисперсным минеральным наполнителем, позволили установить, что она зависит от минералогического состава цемента, его плотности и удельной поверхности, начального водовяжущего отношения, вида и содержания пластификатора и тонкомолотого минерального наполнителя.
3. Математическая модель усадки бетона представлена в виде уточненной модели, предложенной в [16] и [17], скорректированной в области определения части усадочных деформаций, обусловленных испарением влаги при твердении бетона. Статистические характеристики адекватности расчетных и фактических значений усадки бетона свидетельствуют об их удовлетворительной сходимости и о возможности применения полученных коэффициентов при прогнозировании усадки бетонов, модифицированных химическими и тонкомолотыми минеральными наполнителями.

4. Результаты экспериментально-теоретических исследований могут быть также использованы при дальнейшем развитии основных положений технологии модифицированного бетона, являющегося наиболее перспективным для современных конструктивных систем зданий и сооружений, и назначения более достоверных нормативных значений усадки бетона.

Литература

1. Тур В.В. Экспериментально-теоретические основы предварительного на-пряжения конструкций при применении напрягающего бетона. Брест, 1998.
2. Цилосани З.Н. Усадка и ползучесть бетона. Тбилиси, 1963.
3. Александровский С.В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на изменение температуры и влажности с учетом ползучести. М: 1973.
4. Берг О.Я. Высокопрочный бетон / О.Я. Берг, Е.Н. Щербаков, Г.Н. Писанко. М., 1971.
5. Десов А.Е. Некоторые вопросы теории усадки бетона // Ползучесть и усадка бетона и железобетонных конструкций. М., 1973.
6. Улицкий И.И. Определение величин деформаций ползучести и усадки бетонов. Киев, 1963.
7. Voellmy A. Influence du temps sur la deformation du beton // Rizem Bulletin, №9, 1960.
8. Leviant i Einfluss der Betonzusammen-setzung auf daz Swinder // Betonzustein-Zeitung, №30, 1964.
9. Блещик Н.П. К построению расчетной модели усадки цементного камня с позиций физико-химической механики дисперсных систем / Н.П. Блещик, А.Н.Рак, М.Н. Рыскин // Вестник БГТУ, Строительство и архитектура, Приложение – Материалы XI Международного научно – методического семинара «Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь», часть 2. Брест, 2004. С. 81 – 93.
10. Блещик Н.П. Расчетные модели усадки бетонных и железобетонных конструкций / Н.П. Блещик, А.Н. Рак, М.Н. Рыскин // Вестник БГТУ, Строительство и архитектура, Приложение – Материалы XI Международного научно – методического семинара «Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь», часть 2. Брест, 2004. С. 93 – 103.
11. Некрасов В.В. Изменение объема системы при твердении гидравлических вяжущих. ОТН, – 1945. – №6.
12. Холмянский М.М. Бетон и железобетон. Деформативность и прочность. М., 1997.
13. Шейкин А.Е. Структура и свойства цементных бетонов / А.Е. Шейкин, Ю.В. Чеховский, М.И. Бруссер. М., 1979.
14. 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. Этап 7.06.02. Исследовать физико-механические свойства самоуплотняющихся бетонов: отчет о НИР (промежуточный) / Бел НИИС; рук. Н.П. Блещик. №ГР 20053269. Минск, 2006.
15. EN 1992-2-1, Eurocodez «Desing of concrete structures. Part 1: General Rules and Rules for Building» – Commition of European Communities, Des 1991. P. 253.
16. Национальный комплекс нормативно-технических документов в строительстве. Строительные нормы Республики Беларусь. Бетонные и железобетонные конструкции: СНБ 5.03.01-02.-Введ. 01.07.2003.-Минск, 2002.
17. DIN EN 1992-1-1:2005-10, Eurocodez «Desing of concrete structures. Part 1: General Rules and Rules for Building» – Commition of European Communities, 2005. P. 248.

** Дмитрий Святославович Котов, г. Минск*

Тел. раб.: 8(10-375-17) 267-10-01, эл. почта: info@belniis.by