

ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОГО БЕТОНА И ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

**КИНЕТИКА НАБОРА ПРОЧНОСТИ МОДИФИЦИРОВАННОГО
БЕТОНА В РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ
KINETICS OF MATURING OF MODIFIED CONCRETE IN
DIFFERENT TEMPERATURE CONDITIONS**

Блещик Николай Павлович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник РУП «Институт БелНИИС».

Рак Алексей Николаевич, заместитель заведующего отделом.

Суходоева Надежда Валерьевна, младший научный сотрудник РУП «Институт БелНИИС».

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты экспериментально-теоретических исследований влияния различных комплексов химических добавок, водоцементного отношения, температуры выдерживания бетона, приготовленного из высокоподвижных, в том числе самоуплотняемых бетонных смесей, на кинетику набора прочности.

ABSTRACT

The results of experimental and theoretical researches on kinetics of maturing of different complex chemical admixtures influence, water-cement ratio, temperature of concrete curing, made of highly workable concrete including self-compacting are represented

ВВЕДЕНИЕ

Различные аспекты развития прочности бетона во времени рассматривались многими исследователями, в том числе: Ахвердовым И.Н., Баженовым Ю.М., Батраковым Я.А., Бабицким В.В., Блещиком Н.П., Малининой Л.А., Мчедловым-Петросяном О.П., Несветаевым Г.В., Скрамтаевым Б.Г., Сорокером В.М. При оценке нарастания прочности бетона, как правило, используется зависимость, предложенная Б.Г.Скрамтаевым:

$$f_{c,\tau} = f_{c,28}(\lg\tau/\lg28), \quad (1)$$

где τ - время твердения бетона в нормально-влажностных условиях в сутках.

Она действительна при τ не менее трех суток и при условии приготовления бетона с использованием рядовых портландцементов.

Последующие уточнения логарифмической зависимости прочности бетона в различной степени учитывали те или иные факторы. Однако до сих пор не получено общепризнанной зависимости, которая учитывала бы влияние множества факторов на кинетику набора прочности бетона, в том числе: минералогического состава цемента, водоцементного отношения в бетоне,

наличия и вида химических добавок, содержания и физико-механических характеристик минеральных добавок, температуры и влажности среды твердения бетона. Ниже рассмотрены некоторые результаты исследований влияния указанных факторов на развитие прочности бетона во времени.

1. ОБЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О КИНЕТИКЕ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА

1.1 Влияние времени выдерживания в нормально-влажностных условиях

Достаточно полный обзор работ, посвященный прочности высококачественного бетона представлен в отчете рабочей группы 8.2 Международной федерации бетона «Построение основополагающих моделей высокопрочного (высококачественного) бетона» [1]. На основании результатов анализа различных зависимостей, отражающих кинетику набора прочности бетона, авторами [1] предлагается оценивать скорость набора прочности бетона на сжатие следующей зависимостью:

$$f_{cm(\tau)} = \beta_{cc(\tau)} \cdot f_{cm}, \quad (2)$$

в которой

$$\beta_{cc(\tau)} = \exp\{s [1 - (28/(\tau/\tau_1))^{0,5}]\}, \quad (3)$$

где $f_{cm(\tau)}$ – средняя прочность бетона на сжатие в возрасте τ суток;

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

$\beta_{cc(\tau)}$ – функция для оценки развития прочности бетона на сжатие во времени;

τ – время твердения бетона в сутках;

τ_1 – одни сутки;

s – коэффициент, зависящий от вида и класса цемента, имеет следующие значения:

- для цементов класса 32,5 $s=0,38$;
- для цементов классов 32,5 R и 42,5 $s=0,25$;
- для цементов класса 42,5 R и 52,5 $s=0,2$.

Г.В.Несветаев с сотрудниками на основании результатов исследования свойств высокопрочных бетонов предположил для быстротвердеющих бетонов принимать значение s равным 0,2 и для особобыстротвердеющих -0,16.

По утверждению авторов [1] применение различных других формул не приводит к получению более точных данных, чем при использовании зависимости (2).

Для бетонов, модифицированных химическими добавками нового поколения, зависимости $\beta_{cc(\tau)}$ представлены в виде [2-4]:

$$\beta_{cc(\tau)} = \varphi(\tau) = 0,08 + 0,95 \lg \tau + 3,45 \cdot 10^{-3} (1 - \lg \tau) \cdot (f_{c.cube28} - 19,5)^{1,2}, \quad 1 \leq \tau \leq 7; \quad (4)$$

$$\beta_{cc(\tau)} = \varphi(\tau) = 0,78 + 0,37 (\lg \tau - 0,845) + 5 \cdot 10^{-3} (1,447 - \lg \tau) \cdot (f_{c.cube28} - 30), \quad 7 \leq \tau \leq 28; \quad (5)$$

где $f_{c.cube28}$ – прочность бетона на сжатие, определенная в возрасте 28 суток на образцах-кубах размером 15x15x15 см.

1.2 Влияние микроструктуры и водоцементного отношения

Влияние микроструктуры гидратированного цемента играет решающую роль в нарастании прочности на сжатие и других механических свойств бетона. Процесс образования микроструктуры во многом обусловлен воздействием водоцементного отношения бетона. С уменьшением водоцементного отношения толщина слоя воды между гидратированными частицами цемента в бетоне уменьшается. С одной стороны, это означает, что частицы цемента расположены ближе друг к другу и для заполнения пустот и соединения открытых участков в матрице цементного теста требуется меньше гидратированных продуктов [1]. С другой стороны, в процессе гидратирования обычно остается немного воды, что обуславливает снижение скорости гидратации и, наконец, прекращение после связывания всей воды - физически или химически.

В случаях, когда водоцементный фактор ниже $\sim 0,40$, что типично для высокопрочного бетона, существует дефицит воды затворения. С уменьшением водоцементного отношения процесс гидратации приостанавливается.

Бетоны с более низким водоцементным отношением демонстрируют более быстрое нарастание прочности в течение первых часов и дней. Например, бетон с водоцементным отношением равным 0,25 достигает 50% 28-суточной прочности всего лишь за 24 часа, в то время как бетон с водоцементным отношением равным 0,6 за аналогичный отрезок времени достигает $\sim 25\%$ относительной прочности на сжатие. Однако по мере дальнейшего увеличения возраста бетона процесс гидратации и, соответственно, нарастание прочности на сжатие замедляется, что наиболее ярко выражено у бетонов с низким водоцементным отношением.

1.3 Влияние вида и класса прочности цемента

Еще одним немаловажным фактором, влияющим на развитие прочности высокопрочного бетона, является тип цемента. На процесс гидратации влияют как минеральная композиция цементного клинкера, так и дисперсность цемента. Анализ экспериментальных данных Бергнера (1997) свидетельствует о том, что в случае высокопрочного бетона, в качестве примеси содержащего микрокремнезем, влияние класса прочности цемента не столь явно выражено. В своем исследовании Бергнер сообщает, что рассматривались бетоны с водоцементным отношением между 0,25 и 0,45, содержащие одинаковое количество микрокремнезема равное 8% по массе цемента.

Поскольку высокопрочный бетон нередко кроме цемента содержит значительное количество других вяжущих компонентов, следует учитывать влияние этих примесей на развитие прочности бетона. Наиболее часто используются две добавки-микрокремнезем и зола-унос, способные вступать в реакцию с $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Нарастание дополнительной прочности в результате

пуццолановых реакций становится заметно в зрелом бетоне. Скорость реакции зависит от содержания в примеси реактива SiO_2 , размера его частиц, а также выделения $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в процессе гидратации цемента. Помимо этого, определенное нарастание прочности бетона объясняется тем фактом, что частицы микрокремнезема, которые приблизительно в 30-100 раз меньше гранул цемента, заполняют пустоты между частицами цемента, увеличивая плотность упаковки, и тем самым - плотность и прочность цементного камня.

1.4 Влияние температуры выдерживания бетона.

В качестве альтернативы зрелости бетона можно также использовать возраст бетона для учета влияния температуры. Если температура бетона отклоняется от 20°C , тогда эффективный или эквивалентный возраст бетона соответствует временному интервалу при температуре t , после которого бетон достиг зрелость, которая была бы при температуре 20°C .

Современные понятия о зрелости бетона основаны на термодинамике. Если применяется хорошо известная зависимость Arrhenius, то функция зрелости должна иметь общую форму уравнения (6) [1]:

$$M = \text{const} \cdot \int_{\tau_0}^{\tau_i} e^{-Q/RT} dt, \quad (6)$$

где t – температура бетона в возрасте τ , [K];

Q – энергия активации гидратированного цемента [кДж/моль];

R – универсальная газовая постоянная [кДж/моль·K].

Согласно СЕВ-FIP ТК 90 [1] эффективный возраст бетона можно определить по уравнению (7), основанному на функции нарастания прочности бетона, согласно уравнению (6) и активизирующую энергию для гидратации цемента, равную 33 кДж/моль:

$$\tau_T = \sum_{\tau=1}^n \Delta\tau_i \cdot \exp \left[13,65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta\tau_i) / \tau_0} \right], \quad (7)$$

где τ_T – эффективное (приведенное) время выдерживания бетона;

$t(\Delta\tau_i)$ – температура интервалов во время выдерживания бетона, $^\circ\text{C}$;

$t_0 = 1^\circ\text{C}$.

Эта зависимость действительная для бетонов, изготовленных из портландцемента или цемента, содержащего лишь небольшое количество компонентов помимо клинкера портландцемента.

Согласно [1], активизирующая энергия зависит не только от типа и класса прочности цемента, но также от водоцементного отношения, добавок и примесей. Поскольку при производстве высокопрочного бетона часто используются химические и минеральные добавки, необходимо учитывать их влияние на зрелость бетона. На текущий момент не существует доступной базы данных, которая бы сделала возможным модификацию уравнения (6) для учета таких влияний. Поэтому, какая бы точность температурного воздействия не требовалась, энергия активации должна определяться экспериментально [1].

В [3, 4] приведены зависимости для определения эффективного (приведенного) времени выдерживания бетона при температурах от 5 до 50 °С с учетом вида цемента и минеральных добавок, которые приведены в [3, 4].

2 ХАРАКТЕРИСТИКА ИСПОЛЬЗУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Характеристика свойств используемых материалов

В качестве вяжущего использовали портландцемент ПЦ 500 - Д20 ПРУП "Кричевцементношифер" и ПЦ 500-Д0 ОАО«Красносельскстройматериалы».

Использовали заполнитель гранитный щебень фракций 5-20 производства ОАО «Гранит» и песок с модулем крупности $M_k=2,67$ карьера Крапужино.

В качестве модификаторов бетона применялись: гиперпластификаторы ГП-1, «Стахемент 2000 –М Ж 30», ускорители твердения бетона «Темп», карбонат лития (Li_2CO_3) и комплекс ($NaOH + Na_2SO_4$).

2.2 Методика экспериментальных исследований и характеристика составов бетона

Все образцы бетона одной серии испытывались на прочность в расчетном возрасте по ГОСТ 10180-90.

Нагружение образцов производили непрерывно со скоростью, обеспечивающей повышение расчетного напряжения в образцах до его полного разрушения в пределах $(0,6 \pm 0,4)$ МПа/с. При этом время нагружения одного образца принималось не менее 30 с.

Максимальное усилие, достигнутое в процессе испытания, принимали за разрушающую нагрузку.

Характеристика составов бетона, принятых для исследования, приведены в таблицах 1, 2, 3, 4.

Как известно, прочность на сжатие бетона и кинетика набора прочности при прочих равных условиях зависят от прочности и объемной концентрации в бетоне цементного камня. В этой связи выполнялись исследования влияния водоцементного отношения, содержания и вида химических добавок, температуры выдерживания на кинетику набора прочности цементного камня. Исследования проводились на цементном камне, составы которого приведены в таблице 5.

При определении прочности на сжатие цементного камня использовались образцы кубы размером 20x20x20 мм. Образцы изготавливались в металлических формах по 6 образцов. Выдерживание образцов осуществлялось при температуре 10, 20 и 30°С. Определение прочности производилось в соответствии с ГОСТ 10180-90. Скорость нагружения образцов составляла 0,4-0,6 МПа/с. Каждую партию образцов испытывали в возрасте 2,3 и 7 суток.

Таблица 1. – Характеристика составов бетонных смесей с добавками гиперпластификатором ГП-1 и ускорителем твердения ТЕМП

Состав	Подвижность, ОК или РК, см	Цемент	Содержание материалов							Способ ввода
			Ц, кг/м ³	П, кг/м ³	Щ, кг/м ³	В, л	В/Ц	ГП-1 (30%), кг	ТЕМП (45%), кг	
1 ГТ	20	ПЦ 500 –	450	810	1030	160	0,355	4,5	3,0	ГП-1+ТЕМП
2 ГТ	22		570	648	1080	155	0,272	6,7	3,8	ГП-1+ТЕМП
3 ГТ	62	ДО	500	870	870	174	0,348	5,0	3,3	ГП-1+ТЕМП

Таблица 2 - Характеристика составов бетонных смесей с добавками гиперпластификатором Стахемент 2000- М Ж 30 и ускорителем твердения ТЕМП

Состав	Цемент	Подвижность, ОК или РК, см	Содержание материалов							Способ ввода
			Ц, кг/м ³	П, кг/м ³	Щ, кг/м ³	В, л	В/Ц	Стахемент-2000-М Ж30 (30%), кг	ТЕМП (45%), кг	
1 СтТ	ПЦ 500 -Д20	20	450	810	1030	169	0,375	4,5	3,0	Стахемент-2000-М Ж30 + ТЕМП
2 СтТ		22	570	648	1080	177	0,31	5,7	3,8	Стахемент-2000-М Ж30 + ТЕМП
3 СтТ		62	500	870	870	190	0,38	5,0	3,3	Стахемент-2000-М Ж30 + ТЕМП

3 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Влияние водоцементного отношения и химических добавок на кинетику набора прочности цементного камня

Исследования влияния различных факторов на прочность и кинетику набора прочности цементного камня проводились и ранее при выполнении заданий Минстройархитектуры [5]. Отдельные результаты исследований, включая полученные математические модели прочности на сжатие цементного камня, представлены в [6...9]. В указанных работах установлено, что прочность цементного камня на сжатие зависит от минералогического состава цемента, его плотности и удельной поверхности, водовязущего отношения, вида и содержания химических и минеральных добавок.

Таблица 3 - Характеристика составов бетонных смесей с добавками гиперпластификатором Стахемент 2000- М Ж 30 и ускорителями твердения: карбонат лития (Li_2CO_3), гидроксид натрия NaOH и сульфат натрия Na_2SO_4 .

Состав	Це-мент	Подвижность, ОК или РК, см	Содержание материалов									
			Ц, кг/м ³	П, кг/м ³	Щ, кг/м ³	В, л	В/Ц	Стахемент-2000-М Ж30 (30%), кг	Карбонат лития (Li_2CO_3), кг	Гидроксид натрия (NaOH), кг	Сульфат натрия (Na_2SO_4), кг	Способ ввода
1СтЛ	ПЦ 500 - Д20	23	500	870	870	192	0,384	5,0	1,0	-	-	Стахемент-2000-М Ж30 + Li_2CO_3
2СтЛ		21	500	870	870	192	0,384	5,0	1,5	-	-	Стахемент-2000-М Ж30 + Li_2CO_3
3СтН		21	500	870	870	192	0,384	5,0	-	1,0	4,0	Стахемент-2000-М Ж30 + (NaOH + Na_2SO_4)
4СтЛ		20	450	810	1030	187	0,415	4,5	0,9	-	-	Стахемент-2000-М Ж30 + Li_2CO_3
5СтЛ		63	450	810	1030	197	0,438	4,5	1,4	-	-	Стахемент-2000-М Ж30 + Li_2CO_3

Таблица 4 Характеристика составов бетонных смесей с добавками гиперпластификатором ГП-1 и ускорителем твердения FRAME FAST

№ опытов	Це-мент	Содержание материалов							Способ ввода
		Ц, кг/м ³	П, кг/м ³	Щ, кг/м ³	ГП-1, % МЦ	FRAME FAST, % МЦ	В, л	В/Ц	
1 ГФ	ПЦ 500 - Д0	350	832	1040	0,3	0,6	154	0,44	ГП-1 + FRAME FAST
2 ГФ		350	832	1040	0,3	0,4	154	0,44	ГП-1 + FRAME FAST
3 ГФ		350	832	1040	0,3	1	154	0,44	ГП-1 + FRAME FAST
4 ГФ		350	832	1040	0,3	1,4	154	0,44	ГП-1 + FRAME FAST

Таблица 5 Составы цементного камня, модифицированного различными химическими добавками.

Шифр состава	Цемент	Добавка	Дозировка добавки от МЦ по сух. в-ву, %	К _{нг}	К _{пл}	$X_T = V/Ц / K_{нг}$
К	ПЩ 500 -Д20	–	–	0,2625	–	1.0
СтГ		Стахемент 2000 –М Ж 30 ТЕМП	0,3	0.1940	0.2610	1.0
			0,3			
СтЛ		Стахемент 2000 –М Ж 30 Карбонат Лития (Li ₂ CO ₃)	0,3	0.1945	0.2590	1.0
			0,3			
СтН		Стахемент 2000 –М Ж 30 Гидроксид Натрия (NaOH) Сульфат Натрия (Na ₂ SO ₄)	0,3	0.1970	0.2495	1.0
			0,2			
			0,8			

В [9] математическая модель прочности цементного камня представлена в идее произведения функций содержания продуктов гидратации вяжущего и капиллярной пористости, которые учитывают влияние отмеченных факторов. Полученная модель может быть использована для разработки инженерных зависимостей для конкретных видов цемента и химических добавок, в том числе пластификаторов и ускорителей твердения бетона.

Результаты исследований, представленных в [6,9], свидетельствуют о том, что прочность цементного камня, приготовленного на цементах белорусских предприятий – Красносельскстройматериалы и Белорусского цементного завода, с применением пластификаторов нового поколения ГП-1 и «Стахемент 2000 –М Ж 30», в суточном возрасте превышает прочность цементного камня, приготовленного с применением суперпластификаторов С-3 или СМ-1, на 70%. Применение гиперпластификатора «Стахемент 2000 –М Ж 30» обеспечивает увеличение прочности цементного камня в суточном возрасте на 10...15% по сравнению с прочностью цементного камня, модифицированного ГП-1 при равных относительных водосодержаниях.

Однако, влияние комплекса химических добавок – гиперпластификаторов и ускорителей твердения на кинетику набора прочности цементного камня практически не исследовалось. Представленные в настоящем отчете результаты исследования влияния различных комплексов химических модификаторов цементного камня, составы которого приведены в таблице 4, свидетельствуют о высокой эффективности предложенных гиперпластификаторов и ускорителей твердения (см. таблицу 6).

На рисунках 1, 2, 3 представлены графические зависимости кинетики набора прочности цементного камня контрольных образцов (без химических добавок) и модифицированных комплексами добавок – «Стахемент 2000 –М Ж 30», в сочетании с ускорителями твердения: Темп; карбонат лития (Li₂CO₃), гидроксид натрия NaOH + сульфат натрия Na₂SO₄.

Таблица 6 Результаты исследований влияния химических добавок на кинетику набора прочности цементного камня.

Шифр состава	Прочность образцов, МПа, при температуре											
	1 сутки			2 сутки			3 сутки			7 сутки		
	10°C	20°C	30°C	10°C	20°C	30°C	10°C	20°C	30°C	10°C	20°C	30°C
К	≤ 4,75	≤ 8,00	≤ 7,75	8,75	23,58	24,83	21,83	36,25	29,83	37,42	42,00	44,58
СтГ	≤ 3,00	≤ 10,75	≤ 9,25	7,25	35,91	37,00	31,75	39,75	41,20	45,75	49,17	48,00
СтЛ	≤ 1,00	≤ 5,25	≤ 5,75	10,25	28,42	30,25	19,67	42,67	40,58	45,08	49,45	45,92
СтН	≤ 2,75	≤ 8,50	≤ 7,25	8,33	34,75	37,08	34,67	38,50	43,30	55,08	61,67	57,17

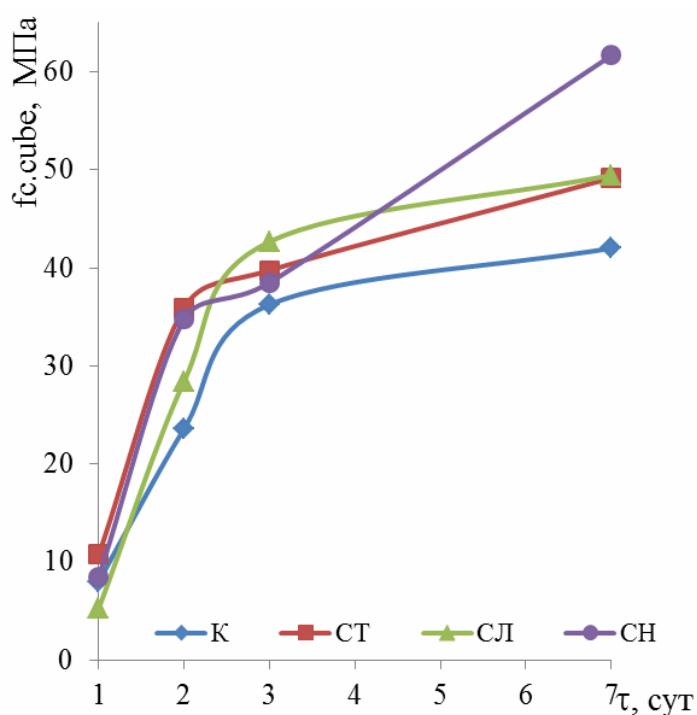


Рисунок 1 Кинетика набора прочности цементного камня, модифицированного различными химическими добавками при выдерживании в нормально-влажностных условиях

Из приведенных данных следует, что в двухсуточном возрасте при твердении в нормально-влажностных условиях наибольшую скорость набора прочности обеспечивают комплексы добавок «Стахемент 2000 - М Ж 30» с ускорителями твердения ТЕМП и гидроокись натрия (NaOH) совместно с сульфатом натрия (Na₂SO₄), которые увеличивают двухсуточную прочность по сравнению с контрольными образцами на 47...52%. В семисуточном возрасте наибольший эффект обеспечивает комплекс «Стахемент 2000 - М Ж 30»+ гидроокись натрия (NaOH) + с сульфат натрия (Na₂SO₄). Этот комплекс обеспечивает также наибольший эффект в условиях выдерживания при температуре 30°C.

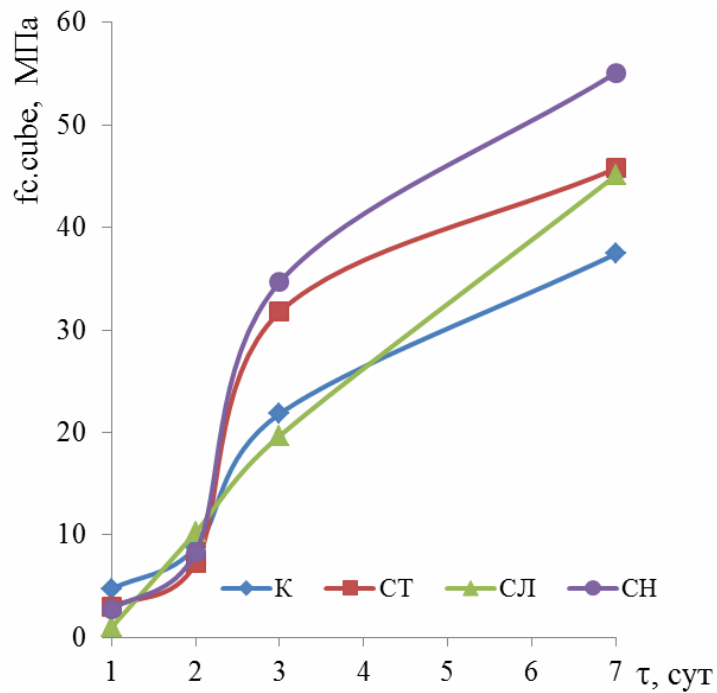


Рисунок 2 Кинетика набора прочности цементного камня, модифицированного различными химическими добавками при выдерживании в условиях температуры 10°C

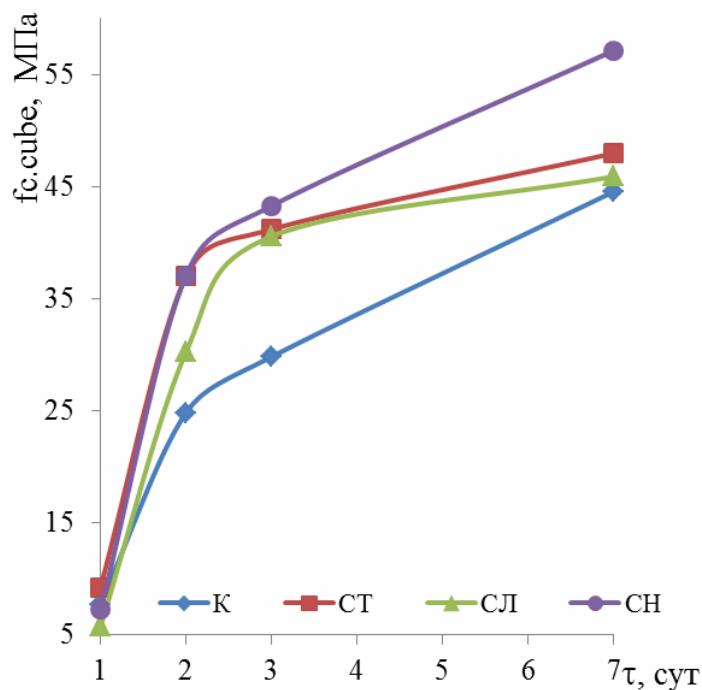


Рисунок 3 Кинетика набора прочности цементного камня, модифицированного различными химическими добавками при выдерживании в условиях температуры 30°C

Анализ графических зависимостей развития прочности цементного камня во времени свидетельствует о том, что для многих зависимостей не соблюдается линейная зависимость прочности цементного камня от логарифма времени. В связи с этим необходимо учитывать нелинейные функции для каждого комплекса химических добавок.

3.2 Влияние комплекса химических модификаторов на кинетику набора прочности бетона.

Для исследований кинетики набора прочности бетонов были приняты четыре серии их основных составов, обеспечивающих необходимые проектную и распалубочную прочность. Первая серия состояла из бетонов трех составов, модифицированных комплексом химических добавок ГП-1 и ТЕМП. Вторая серия также состояла из трех составов, в которых вместо ГП-1 применен гиперпластификатор «Стахемент 2000 - М Ж 30». В третьей и четвертой сериях, включающих также по три основных состава, применялся гиперпластификатор «Стахемент 2000 - М Ж 30» и соответственно карбонат лития (Li_2CO_3) и гидроксид натрия (NaOH) и совместно с сульфатом натрия (Na_2SO_4). При этом подвижность бетонной смеси во всех сравниваемых составах принималась постоянной: ОК=20±2 см и РК=62±2 см. В связи с различной пластифицирующей способностью комплексов химических добавок задаваемая удобоукладываемость бетонной смеси обеспечивалась изменением водоцементного отношения.

Полученные результаты исследований кинетики набора прочности бетона всех серий представлены в таблицах 7-10.

Таблица 7 - Результаты исследований влияния добавок ГП-1 и ТЕМП на кинетику набора прочности бетона серии 1.

№ опытов	Температура выдерживания	Прочность, МПа, в различном возрасте, сут				
		1	2	3	7	28
1ГТ	10 °С	8,6	31,75	32,2	-	-
	20°С	15,3	38,85	43,2	51,6	56,35
	30 °С	41,4	51,8	55,0	-	-
2ГТ	20°С	23,1	48	59,75	64,0	67,45
3ГТ	10 °С	7,75	25,5	30,35	-	-
	20°С	16,0	39,5	47,15	63,4	64,9
	30 °С	36,0	42,25	46,4	-	-

Таблица 8 Результаты исследований добавок гиперпластификатора Стахемент 2000 - М Ж 30 и ускорителя твердения ТЕМП на кинетику набора прочности бетона серии 2

Состав	Температура выдерживания	Прочность, МПа, в различном возрасте, сут		
		1 сутки	2 сутки	3 сутки
1	2	3	4	5
1 СтТ	10°С	17,95	23,95	26,55
	20°С	22,95	31,05	38,45
	30°С	37,35	43,5	44,4
2 СтТ	10°С	15,45	26,55	51,85
	20°С	21,6	36,45	41,85
	30°С	36,05	40,8	44,5
3 СтТ	10°С	6,1	15,55	29,85
	20°С	15,8	28,3	32,45
	30°С	30,4	40,8	41,3

Таблица 9 Результаты определения прочности бетона на сжатие с добавками гиперпластификатором Стахемент 2000- М Ж 30 и ускорителями твердения: карбонат лития (Li_2CO_3), гидроксид натрия NaOH и сульфат натрия Na_2SO_4 .

Состав	Условия выдерживания	Прочность, МПа, в различном возрасте, сут		
		1 сутки	2 сутки	3 сутки
1СтL	10°C	4,85	20,5	28
	20°C	14,7	25,5	32,9
	30°C	27,6	39,5	38,4
2СтL	10°C	3,7	12,2	18,4
	20°C	8,8	28,0	33,5
	30°C	28,6	34,3	39,0
3СтN	10°C	4,2	21	23,6
	20°C	12,3	24,25	28,8
	30°C	22,8	29,7	31,9
4СтL	10oC	2,2	10,3	21,4
	20oC	5,7	22,3	29,1
	30oC	25,7	35,1	38,5
5СтL	10oC	-	2,2	9,7
	20oC	1,3	16,3	25,6
	30oC	16,4	31,2	33,1

Таблица 10 Результаты исследований влияния добавок ГП-1 и FRAME FAST на кинетику набора прочности бетона серии 5

№ опытов	ОК, см	Прочность, МПа		
		1 сутки	2 сутки	3 сутки
К GF	18	10,9	24,55	30,15
2 GF	18	8,5	21,15	25,95
3 GF	20	4,9	20,9	25,95
4 GF	23	5,95	23,25	29,30

Графические зависимости кинетики набора прочности бетона, твердеющего в нормально-влажностных условиях различных серий, представлены на рисунках 4-8.

Как следует из представленных данных, наибольшую скорость набора прочности бетона обеспечивает комплекс добавок ГП-1 + ТЕМП. Последующий ряд по снижению кинетики набора прочности составляют следующие модификаторы: ГП-1>«Стахемент 2000 - М Ж 30»+ТЕМП> «Стахемент 2000 - М Ж 30»+ карбонат лития (Li_2CO_3) >«Стахемент 2000 - М Ж 30»+(NaOH) + (Na_2SO_4). Прочность бетона в двухсуточном возрасте с добавками ГП-1+ТЕМП и с расходом цемента 570 кг/м^3 на 32% больше соответствующей прочности бетона с добавками «Стахемент 2000 - М Ж 30»+ТЕМП.

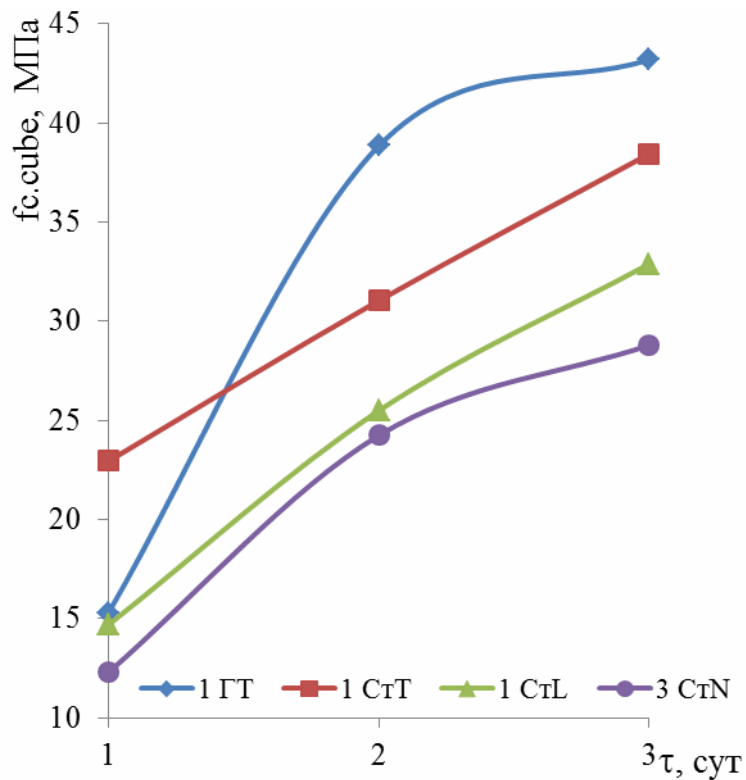


Рисунок 4 Кинетика набора прочности бетона составов 1 ГТ, 1 СтТ, 1 СтЛ, 3 СтН в раннем возрасте при выдерживании в нормально-влажностных условиях

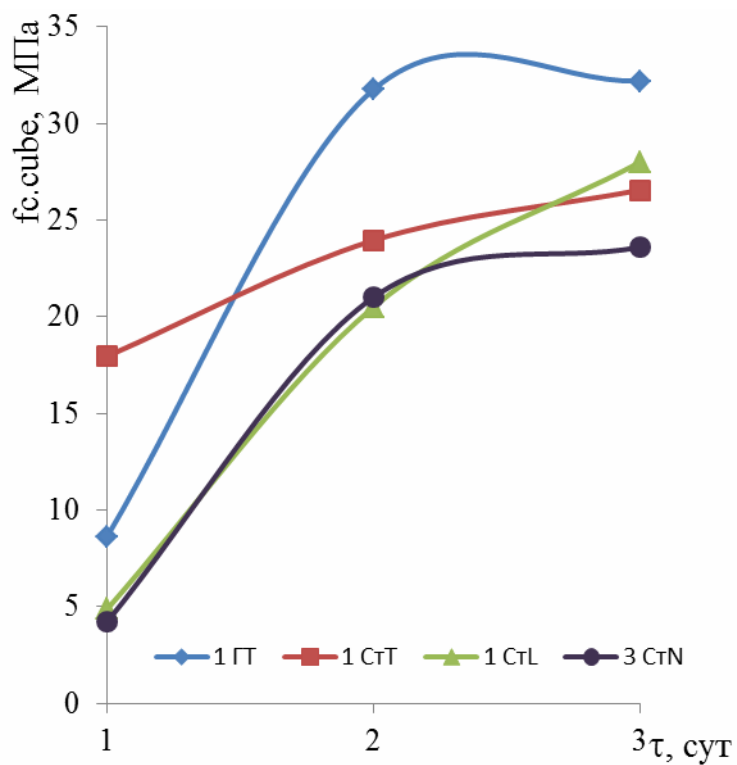


Рисунок 5 Кинетика набора прочности бетона составов 1 ГТ, 1 СтТ, 1 СтЛ, 3 СтН в раннем возрасте при выдерживании при температуре 10°C

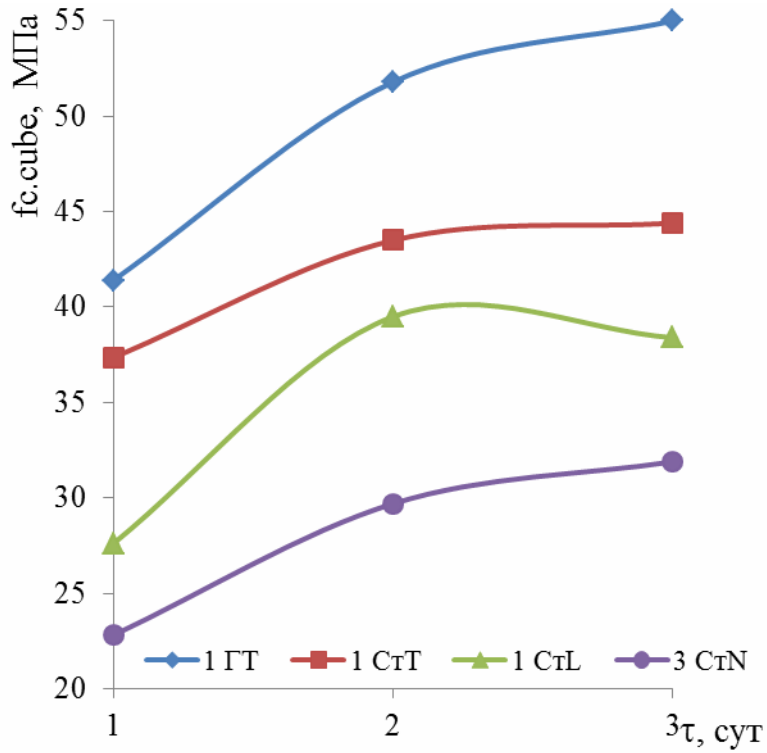


Рисунок 6 Кинетика набора прочности бетона составов 1 ГТ, 1 СтТ, 1 СтЛ, 3 СтН в раннем возрасте при выдерживании при температуре 30°C

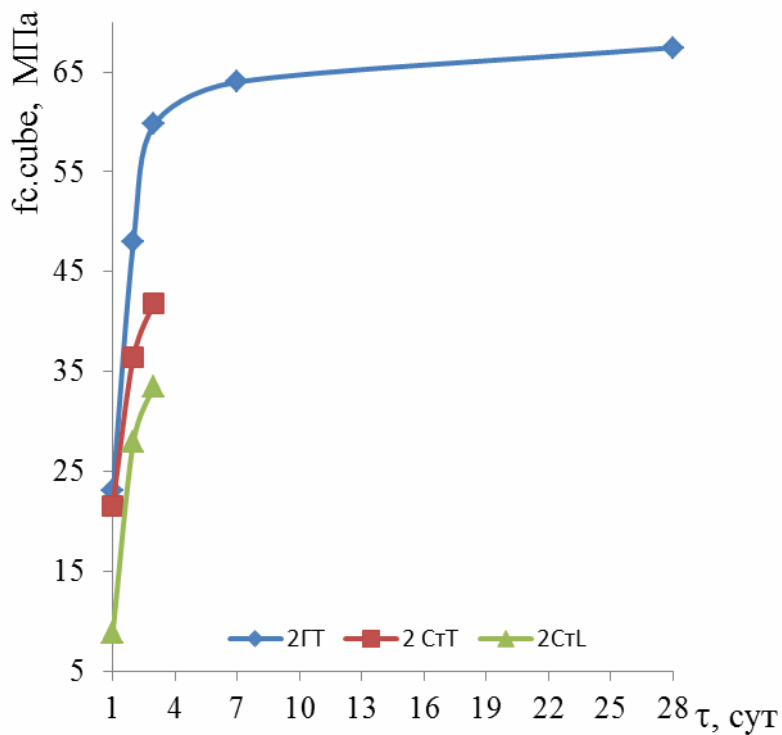


Рисунок 7 Кинетика набора прочности самоуплотняющегося бетона составов 2 ГТ, 2 СтТ, 2 СтЛ при выдерживании в нормально-влажностных условиях

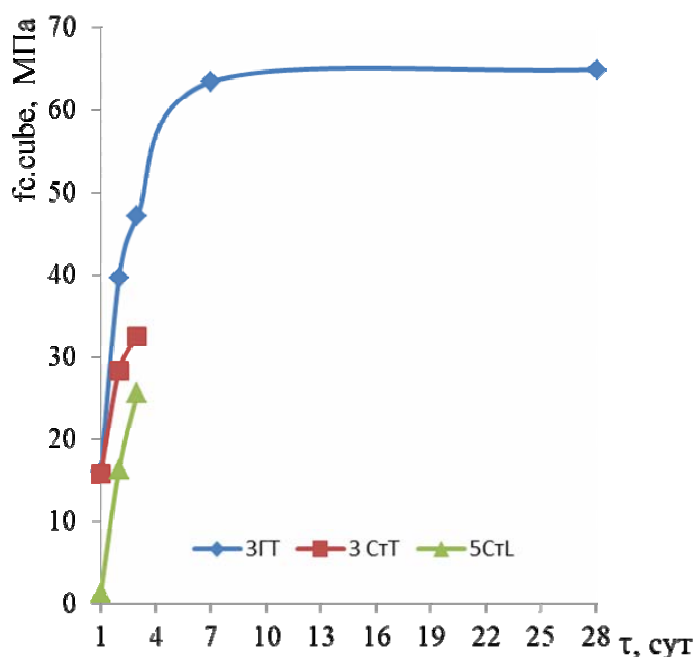


Рисунок 8 Кинетика набора прочности самоуплотняющегося бетона составов 3 ГТ, 3 СтТ, 5 СтЛ при выдерживании в нормально-влажностных условиях

Это в большей степени обусловлено необходимостью увеличивать водоцементное отношение для достижения заданной удобоукладываемости бетонной смеси ($OK=20\text{см}$) из-за меньшей пластифицирующей способности добавки «Стахемент 2000 - М Ж 30» по сравнению с пластифицирующей способностью ГП-1. В то же время разница двухсуточной прочности самоуплотняющегося бетона составов 3 ГТ и 3 СтТ при $RК=62\text{ см}$ составляет лишь 7,6%. Наименьшей интенсивностью набора прочности бетона обладают составы третьей и четвертой серий, в которых двухсуточная прочность бетона на 35-38% меньше соответствующей прочности бетона первой серии.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ КИНЕТИКИ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА И ПОДБОРА ЕГО СОСТАВА

На основании анализа результатов выполненных работ по структурной теории прочности бетона представляется возможным сделать вывод о том, что для надежного прогнозирования поведения бетона под нагрузкой во времени, следует использовать комплекс параметров, включающих физико-механические характеристики начальной структуры бетона и характеристики, позволяющие квалифицировать вид и интенсивность внешнего воздействия.

В ряде работ [10-13] обоснованно отмечается, что структурные характеристики бетона и его прочность, в значительной мере обуславливаются структурой и прочностью цементного камня в бетоне. В работах [14, 15] отмечается, что структура камня является результатом комплекса сложных физико-химических процессов, обуславливающих и сопровождающих твердение вяжущих.

Прочность бетона зависит не только от свойств цементного камня, но и его объемной концентрации, степени раздвижки зерен заполнителя цементным камнем, свойств крупного и мелкого заполнителя, количества вовлеченного воздуха, температурно-влажностных условий формирования структуры. Необходимость учета этих факторов порождает разные подходы к оценке и прогнозированию прочности бетона в различном возрасте. Анализ существующих теорий свидетельствует о том, что большинство авторов рассматривают три основные группы подходов к решению проблемы прочности бетона [16, 17]: феноменологические; статистические; структурные.

Наиболее рациональными считаются структурные подходы к математическому описанию прочности бетона. Моделирование структуры бетона, как композиционной системы, позволяет выявить характер механического взаимодействия элементов системы под нагрузкой, установить принципы разрушения и на основании этого определить его прочность и деформативность [18].

В большинстве случаев структура бетона схематизируется двухкомпонентными моделями. При этом чаще всего бетон рассматривается как композит, включающий растворную составляющую и крупный заполнитель. Используются модели вида цементный камень – заполнитель. В последнее время появились работы, в которых применены трехкомпонентные модели: цементный камень или раствор – контактная зона – заполнитель. В любом случае выбор тех или иных схем зависит от целей и задач исследования.

К настоящему времени предложены многие математические модели прочности бетона, в которых фигурируют ряд структурных характеристик. Одними из первых выражений этого типа являлась формула, предложенная в свое время Б.Г. Скрамтаевым.

В последующие годы был предложен ряд других структурных моделей прочности бетона, в том числе: Б.М. Гладышева [17]; И.Н. Ахвердова [18]; А.Е. Денисова [17]; А.И. Маркова, Н.В. Михайлова, П.А. Ребиндера [18]; Н.П. Блещика [19] и др. Степень корреляции предложенных математических моделей прочности бетона с фактическими показателями прочности зависит от предельных значений структурных характеристик, вида и содержания химических модификаторов, условий твердения бетона.

На основании анализа результатов теоретических и экспериментальных исследований можно предположить, что зависимость прочности бетона, твердеющего в различных температурных условиях в течении заданного времени, может быть представлена в виде произведения нескольких функций, учитывающих влияние основных факторов:

$$f_{c,\tau,t} = f_{ц.к,t} \cdot \varphi_{m\tau} \cdot \varphi_M \cdot \varphi_n \cdot \varphi_{d,n} \cdot \varphi_t, \quad (8)$$

где $f_{c,\tau,t}$ — кубиковая прочность бетона на сжатие, твердеющего в течении $\tau_{сут}$ при температуре t , °С;

$f_{ц.к.τ}$ — зависимость прочности цементного камня на сжатие, твердеющего в нормально влажностных условиях в течении $τ_{сут}$.

$φ_{mτ}, φ_M, φ_n, φ_{д.н}, φ_t$ — функциональные зависимости, отражающие влияние на прочность бетона соответственно объемной концентрации цементного теста, модифицирующих химических добавок, соотношения масс крупного и мелкого заполнителей, содержание и вида тонкодисперсных минеральных наполнителей, температуры выдерживания бетона.

Использование общей зависимости (8) и результатов ранее выполненных исследований по влиянию структурных характеристик бетона, приведенных в [10] были получены экспериментально-теоретические зависимости, характеризующие прочность бетона в различном возрасте, твердеющего при температуре окружающей среды от 5 до 50°C, а также удобоукладываемость бетонной смеси, определяемой осадкой и распылом конуса. В результате совместного решения системы уравнений прочности бетона и удобоукладываемости бетонной смеси можно определить значения комплекса структурных характеристик, определяющих состав бетона. Для решения уравнений целесообразно использовать компьютерную технику, что может представлять трудности для заводской лаборатории.

Имея ввиду, что запроектированный состав бетона должен в любом случае корректироваться по результатам пробных замесов и испытаний прочности контрольных образцов, целесообразно получить приближенные зависимости прочности и объемного содержания теста из вяжущего для выполнения инженерных расчетов при проектировании начального состава бетона.

С целью получения указанных зависимостей был выполнен анализ результатов комплекса исследований.

В результате анализа установлено, что для бетонов с прочностью на сжатие свыше 20 МПа наблюдается корреляционная связь между прочностью бетона, активностью цемента и отношением массы цемента к общей массе воды в бетонной смеси Ц/В.

На рисунке 9 показано влияние Ц/В на функциональную зависимость

$$φ_{ц.кубс(\frac{Ц}{В})} = \frac{f_{ц.кубс}}{φ(R_{ц})}, \quad (9)$$

где $f_{ц.кубс}$ - кубиковая прочность бетона в возрасте 28 сут, твердеющего в нормальных условиях;

$φ(R_{ц})$ - функциональная зависимость, характеризующая влияние активности цемента $R_{ц}$ на прочность бетона.

В ранее выполненных исследованиях зависимость $φ(R_{ц})$ была получена в виде:

$$φ(R_{ц}) = 0,45 R_{ц} - 20, \text{ МПа} \quad (10)$$

Как следует из данных, приведенных на рисунке 9, зависимость $φ_{ц.кубс(\frac{Ц}{В})}$ имеет ярко выраженный нелинейный характер в отличие от линейных зависимостей, принимаемых в известных формулах, в том числе в [17].

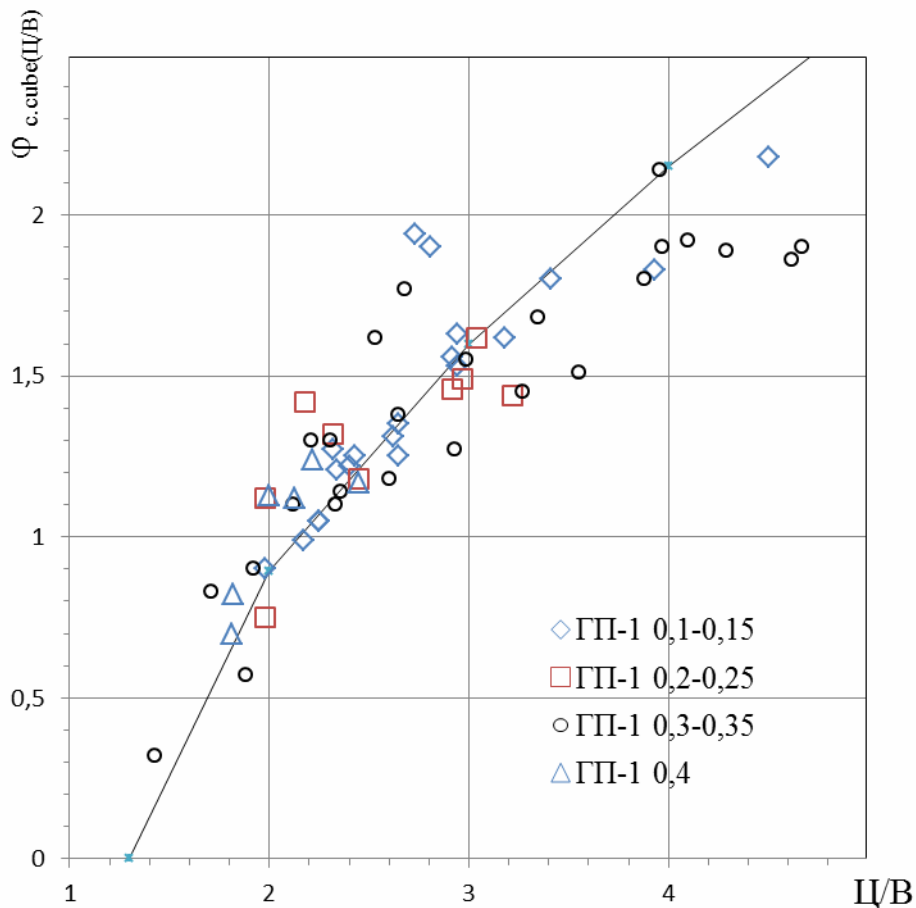


Рисунок 9 - Влияние цементно-водного отношения на функцию $\varphi_{c.cube}(\frac{Ц}{В})$

В результате математико-статистической обработки экспериментальных данных, представленных на рисунке 9, зависимость $\varphi_{c.cube}(\frac{Ц}{В})$ получена в следующем виде:

$$\varphi_{c.cube}(\frac{Ц}{В}) = 1,17(\frac{Ц}{В} - 1,35)^{0,625}, \quad (11)$$

С учетом зависимости $\varphi(R_{ц})$ математическая модель прочности бетона в возрасте 28 сут получена в виде:

$$f_{c,гр} = 1,17(0,45R_{ц} + 20)(\frac{Ц}{В} - 1,35)^{0,625}, \text{ МПа} \quad (12)$$

Полученная модель удовлетворительно коррелируется с опытными данными, полученными по контрольным образцам бетона, изготовленным из 72 составов бетона, в которых варьировалось содержание вяжущего от 340 до 640 кг/м³. Количество гиперпластификатора в бетонных смесях составляло от 0,1 до 0,4% от массы цемента в расчете на сухое вещество. Количество ускорителей твердения ТЕМП и сульфат натрия заменялось соответственно от 0,2 до 0,5% и 0,5 до 1,0%.

Разрешение модели (12) относительно $\frac{Ц}{В}$ позволило получить зависимости для расчета отношения массы цемента к общей массе воды в бетонной смеси в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \frac{C}{B} &= 10^a; \\ a &= 0,625 \cdot \lg \frac{f_{с.тпр}}{1,17 \cdot (0,43R_t + 20)} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

По зависимостям (13) может рассчитываться значение $\frac{C}{B}$, необходимое для достижения требуемой прочности в возрасте 28 сут, соответствующей заданному классу бетона по прочности на сжатие.

При необходимости расчета значения Ц/В исходя из заданной прочности бетона на сжатие в ином возрасте и при твердении бетона в температурных условиях, отличных от нормальных, а также при применении в составе бетона тонкодисперсных минеральных добавок, следует учесть влияние указанных факторов.

Для нахождения зависимостей, отражающих влияние времени выдерживания бетона в нормальных условиях были построены графические зависимости отношения прочности бетона в возрасте τ к прочности бетона в возрасте 28 суток.

Полученные зависимости коэффициентов K_τ для прочности бетона в возрасте 1, 2, 3 и 7 суток представлены на рисунках 10-13.

Математико-статистическая обработка экспериментальных данных, представленных на графических зависимостях, позволила получить следующие математические модели, отражающие влияние возраста бетона на его прочность:

при $\tau_{эKB} = 1$ сут:

$$K_{\tau=1.эKB} = 5,8 \cdot 10^{-3} \cdot f_{с.тпр}, \quad 20 \text{ МПа} \leq f_{с.тпр} \leq 65 \text{ МПа}; \quad (14)$$

$$K_{\tau=1.эKB} = 0,38 + 4,65 \cdot 10^{-3} (f_{с.тпр} - 65)^{1,2}, \quad f_{с.тпр} > 65 \text{ МПа}; \quad (15)$$

при $\tau_{эKB} = 2$ сут:

$$K_{\tau=2.эKB} = 0,23 + 4,45 \cdot 10^{-3} \cdot f_{с.тпр}, \quad 20 \text{ МПа} \leq f_{с.тпр} \leq 65 \text{ МПа}; \quad (16)$$

$$K_{\tau=2.эKB} = 0,55 + 1,25 \cdot 10^{-3} (f_{с.тпр} - 65)^{1,75}, \quad f_{с.тпр} > 65 \text{ МПа}; \quad (17)$$

при $\tau_{эKB} = 3$ сут:

$$K_{\tau=3.эKB} = 0,47 + 2,67 \cdot 10^{-3} \cdot f_{с.тпр}, \quad 20 \text{ МПа} \leq f_{с.тпр} \leq 65 \text{ МПа}; \quad (18)$$

$$K_{\tau=3.эKB} = 0,64 + 3,6 \cdot 10^{-3} (f_{с.тпр} - 65)^{1,35}, \quad f_{с.тпр} > 65 \text{ МПа}; \quad (19)$$

при $\tau_{эKB} = 7$ сут:

$$K_{\tau=7.эKB} = 0,75 + 2,4 \cdot 10^{-3} \cdot f_{с.тпр}, \quad f_{с.тпр} > 20 \text{ МПа}; \quad (20)$$

При оценке влияния температуры выдерживания бетона на его прочность отличной от нормальной ($t=20 \pm 2$), в полученные зависимости следует подставлять вместо τ эквивалентное время $\tau_{эKB}$, которое определяется по следующим формулам:

$$\tau_{эKB} = K_t \cdot \tau_t; \quad (21)$$

$$K_t = 2^{(20-t)/\Delta E}, \quad \text{при } 5^\circ\text{C} \leq t \leq 20^\circ\text{C}; \quad (22)$$

$$K_t = \frac{1+0.5[1-\exp(-0.16(t-20))]}{\eta_t^2 + \frac{K(t-20)}{t}}; \quad (23)$$

$$\Delta E = 11,7 - 16,5r_{д.н.}, \quad (24)$$

$$K = 4 - 15r_{д.н.}, \quad (25)$$

где τ_t - время выдерживания бетона при средней температуре t °С, сут;
 ΔE - характерная температурная разность;
 η_t - вязкость воды при температуре t °С, Па с 10^3 .

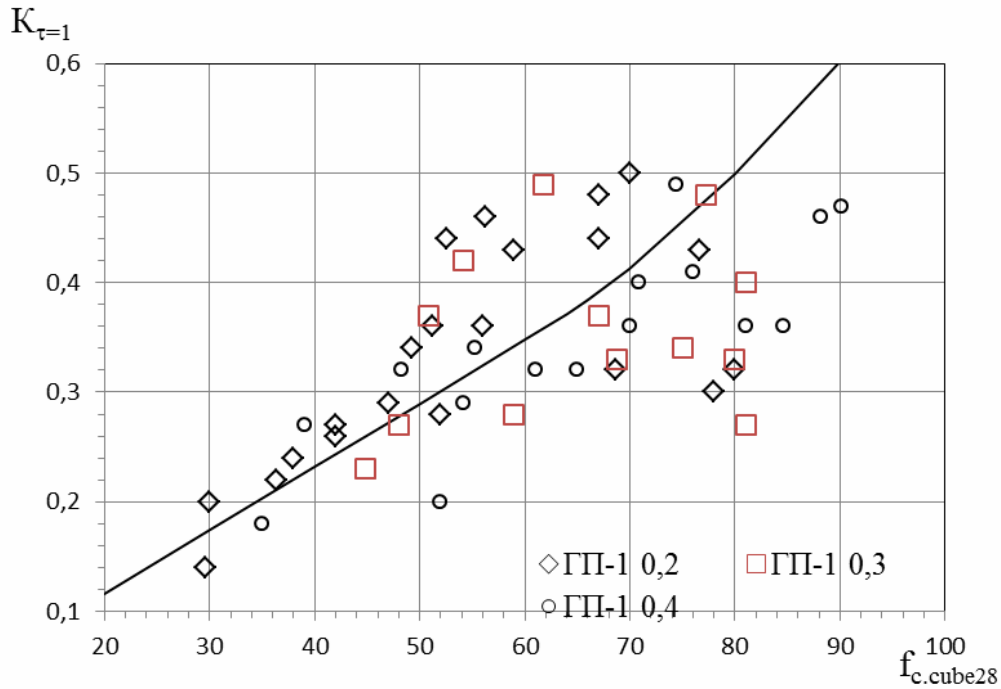


Рисунок 10 Графическая зависимость коэффициента K_{τ} при $\tau=1$ сутки

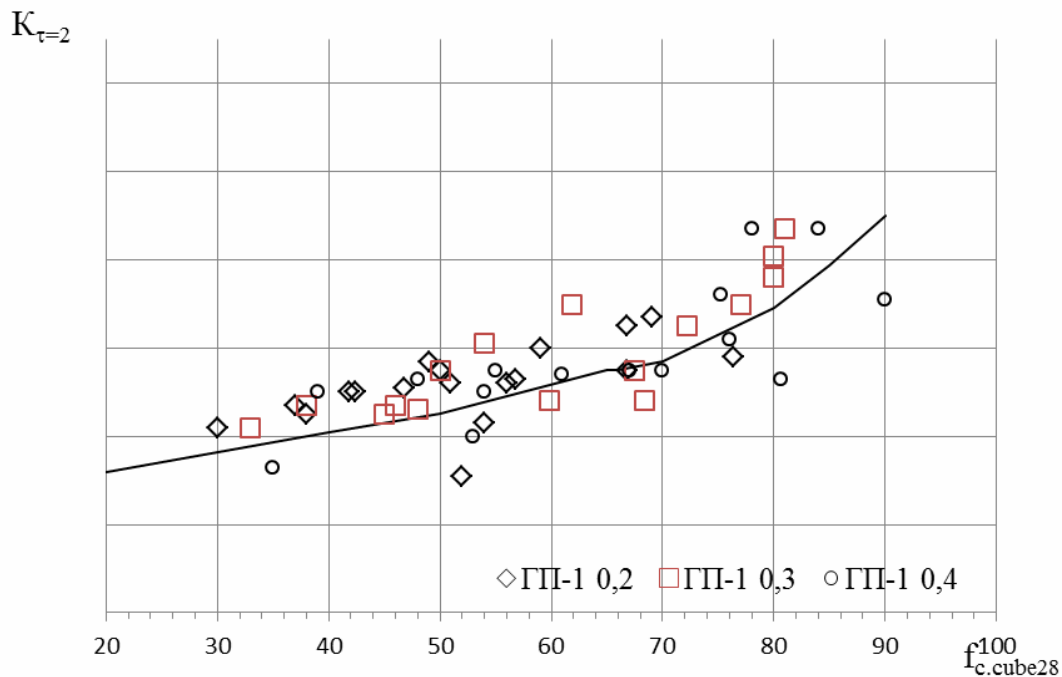


Рисунок 11 Графическая зависимость коэффициента K_{τ} при $\tau=2$ суток

$$k_{\partial.n} = \frac{R_{\partial.n,i}}{R_{\partial.n,o}}, \quad (26)$$

где $R_{\partial.n,i}$, $R_{\partial.n,o}$ – прочность бетона, соответственно, с содержанием дисперсного наполнителя в количестве i процентов и контрольного без ДН.

Рекомендуется находить зависимость величины $k_{\partial.n}$ от относительной массовой доли дисперсного наполнителя в вяжущем бетона $r_{\partial.n} = ДН / (ДН + Ц)$ как функцию вида $k_{\partial.n} = 1 \pm a \cdot r_{\partial.n}^n$. С этой целью, следует изготовить по шесть образцов-кубов с ребром 10 см из бетона трех составов с содержанием дисперсного наполнителя – 0 %, 15 % и 40 % от массы вяжущего (шаг и диапазон ввода ДН может быть изменен) при фиксированном [Ц/В]. Первым проектируется состав бетона с $r_{\partial.n} = 0$, который должен обеспечить $\pm 15\%$ от заданной марки по удобоукладываемости и класса бетона по прочности на сжатие.

При применении доломитовых наполнителей функция $k_{\partial.n}$ от относительной массовой доли наполнителя в вяжущем $r_{\partial.n}$ (при значениях $r_{\partial.n} \leq 0,40$) может быть принята в виде:

$$k_{\partial.n, \text{дол}} = 1 + 0,05 \cdot r_{\partial.n}, \quad 3 < \tau \leq 28; \quad (27)$$

$$k_{\partial.n, \text{дол}} = (1 - r_{\partial.n}^{0,54} (1,15 - 0,575(\tau - 1))) (1 - 1,05 r_{\partial.n}^{1,35}), \quad 1 \leq \tau \leq 3, \quad (28)$$

где τ - время выдерживания бетона, сут.

Влияние содержания химических добавок на значение прочности бетона должно учитываться значением коэффициента $K_{x,d}$, который должен определяться экспериментальным путем. Значения коэффициента $K_{x,d}$ для наиболее распространенных химических добавок, полученные в результате выполненных исследований представлены в таблице 11.

Таблица 11 Значения коэффициента $K_{x,d}$ для некоторых видов химических добавок и их комплексов

№ п/п	Наименование добавок и их комплексов	Содержание добавок в % от массы цемента по сухому веществу, $m_{x,d}$	Значения $K_{x,d}$ при эквивалентном времени $\tau_{\text{экв}}$, в сут.:		
			1	2	3
1	Темп	0,3	1,17	1,11	1,10
		0,5	1,22	1,09	1,06
2	СН	1,0	1,20	1,23	1,10
		1,25	1,25	1,23	1,17
3	(С-3)+Темп	0,8+0,3	1,07	1,05	1,05
4	(ГП-1)+Темп	0,3+0,3	1,23	1,12	1,11
5	(ГП-1)+Темп	0,3+0,2	1,08	1,12	1,08

Примечание: 1 Сокращенные названия приняты для следующих добавок: СН – ускоритель сульфат натрия; С-3 – суперпластификатор; ГП-1 – гиперпластификатор.
2 Технические условия, по которым производятся добавки, указаны в Каталоге химических добавок.
3 При $\tau_{\text{экв}} > 3$ сут $K_{x,d} = 1$

С учетом полученных выражений зависимостей функциональных коэффициентов, учитывающих влияние времени и температурных условий выдерживания бетона, вида и содержания тонкодисперсных заполнителей и химических добавок, зависимости для определения $\frac{G_{в.л.к.}}{B}$ для достижения прочности бетона в эквивалентном возрасте представлены в следующем виде

$$\frac{G_{в.л.к.}}{B} = 10^a + 1,35; \quad (29)$$

$$a = \frac{1}{0,625} \cdot \lg \frac{f_{с.субет,т.к.}}{1,17 \cdot K_{т.к.} \cdot K_{д.н} \cdot K_{д.д} \cdot (0,45 R_{ц} + 20)},$$

Для расчета содержания компонентов бетона необходимо определить соотношение масс мелкого и крупного заполнителей «п» и относительное условное содержание в бетонной смеси теста из вяжущего $m_{т.у.}$

Зависимость для определения значения «п» получено в следующем виде

$$n = 0,55 + 0,25 M_{кр}^{0,7}; \quad (30)$$

Для получения зависимостей $m_{т.у.}$, отражающих влияние $\frac{G_{в.л.к.}}{B}$ характеристик удобоукладываемости- ОК и РК, а также коэффициента пластификации цементного теста $K_{пл}$, были проанализированы и статистически обработаны 72 экспериментальных данных на основе которых получены следующие математические зависимости

- для бетонных смесей, удобоукладываемость которых определяется осадкой конуса ОК:

$$m_{т.у.} = \left(\frac{G_a}{B} + 0,75 \right)^{0,65} \cdot (0,125 + 10^{-3} \cdot (73 \cdot K_{нгпл} - 9,4) \cdot ОК^{0,55}) \cdot \varphi(n) \cdot \varphi(M_{кр}) \quad (32)$$

если $n \geq 0,9$ $\varphi(n) = 0,95 + 0,165 \cdot (n - 0,9)^{0,2}$
 $n < 0,9$ $\varphi(n) = 0,95$

$$\varphi(M_{кр}) = 1,125 - 0,05 \cdot M_{кр}$$

где n – отношение массы мелкого заполнителя к массе крупного;

$M_{кр}$ – модуль крупности мелкого заполнителя;

$K_{нгпл}$ – коэффициент нормальной густоты пластифицированного цементного теста;

- для бетонных смесей, удобоукладываемость которых определяется распылом конуса РК:

$$m_{т.у.} = \left(\frac{G_a}{B} - 0,35 \right)^{0,55} \cdot (a + K \cdot (РК - 40)^{0,75}) \cdot \varphi(n) \cdot \varphi(M_{кр}) \quad (33)$$

где $a = 0,2 + 0,56 \cdot (K_{нгпл} - 0,16)^{0,785}$

$$K = (36,6 \cdot (K_{нгпл} - 0,17)^{0,65} + 1,05) \cdot 10^{-3}$$

Полученные зависимости использованы при разработке методики предварительного подбора состава бетона.

В соответствии с разработанной методикой содержание вяжущего в бетонной смеси рассчитывают по формуле:

$$G_{\text{в.д.}} = \frac{(m_{\text{т.у.}} - m_{\text{в.д.}}) \cdot 10^3}{\frac{G_{\text{в.д.}}}{B} - 1000 / \rho_{\text{в.д.}}}, \quad \text{кг/м}^3. \quad (34)$$

где $m_{\text{в.д.}}$ – относительное содержание воздуха в бетонной смеси, принимаемое равным 0,02.

Содержание цемента и химических добавок рассчитывают по следующим формулам:

$$G_{\text{ц}} = G_{\text{в.д.}} (1 - \Gamma_{\text{д.н}}), \quad \text{кг/м}^3; \quad (35)$$

где $\Gamma_{\text{д.н}}$ – содержание дисперсного наполнителя в долях единицы от массы вяжущего;

$$G_{\text{х.д.}} = G_{\text{ц}} \cdot m_{\text{х.д.}} / 100, \quad \text{кг/м}^3. \quad (36)$$

где $m_{\text{х.д.}}$ – содержание химической добавки в бетонной смеси в относительных единицах от массы цемента, %.

Содержание дисперсного наполнителя (при необходимости) рассчитывают по формуле:

$$G_{\text{д.н}} = G_{\text{в.д.}} \cdot \Gamma_{\text{д.н}}; \quad \text{кг/м}^3. \quad (37)$$

Рекомендуемое соотношение масс смеси заполнителей n и среднюю плотность их зерен ρ_3 рассчитывают по формуле:

$$\rho_3 = \frac{1+n}{\frac{n}{\rho_n} + \frac{1}{\rho_{\text{кр}}}}. \quad (38)$$

Содержание заполнителей и воды рассчитывают по следующим формулам:

$$G_{\text{з}} = (1 - m_{\text{т.у.}}) \cdot \rho_3; \quad \text{кг/м}^3; \quad (39)$$

$$G_{\text{кр}} = \frac{G_{\text{з}}}{1+n}; \quad \text{кг/м}^3; \quad (40)$$

$$G_{\text{м}} = G_{\text{з}} - G_{\text{кр}}; \quad \text{кг/м}^3; \quad (41)$$

$$G_{\text{в}} = G_{\text{в.д.}} / (G_{\text{в.д.}} / B); \quad \text{кг/м}^3; \quad (42)$$

$$G_{\text{ф}} = m_{\text{с.ф.}} \cdot 10^{-2} \cdot \rho_{\text{ф.}}; \quad \text{кг/м}^3; \quad (43)$$

Сходимость расчетных данных с экспериментальными показана на рисунках 14...17, из которых предоставляется возможным сделать вывод об удовлетворительной корреляции расчетных и экспериментальных данных важнейших характеристик состава бетона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Выполнен анализ результатов исследований влияния характеристик прочности цемента, водовяжущего отношения, вида и содержания химических добавок и тонкодисперсных наполнителей, температуры и времени выдерживания бетона на прочность бетона в различном возрасте.

2 Обобщены опытные данные, характеризующие влияние водовяжущего отношения и технологических характеристик бетонной смеси на показатели удобоукладываемости, выражаемые осадкой и расплывом конуса.

3 На основании результатов математико-статистической обработки опытных данных получен комплекс экспериментально-теоретических зависимостей, позволяющих рассчитывать отношение масс вяжущего и воды и условную объемную концентрацию теста из вяжущего.

4 Разработаны алгоритм расчета начального состава и методика проектирования рабочего состава бетона.

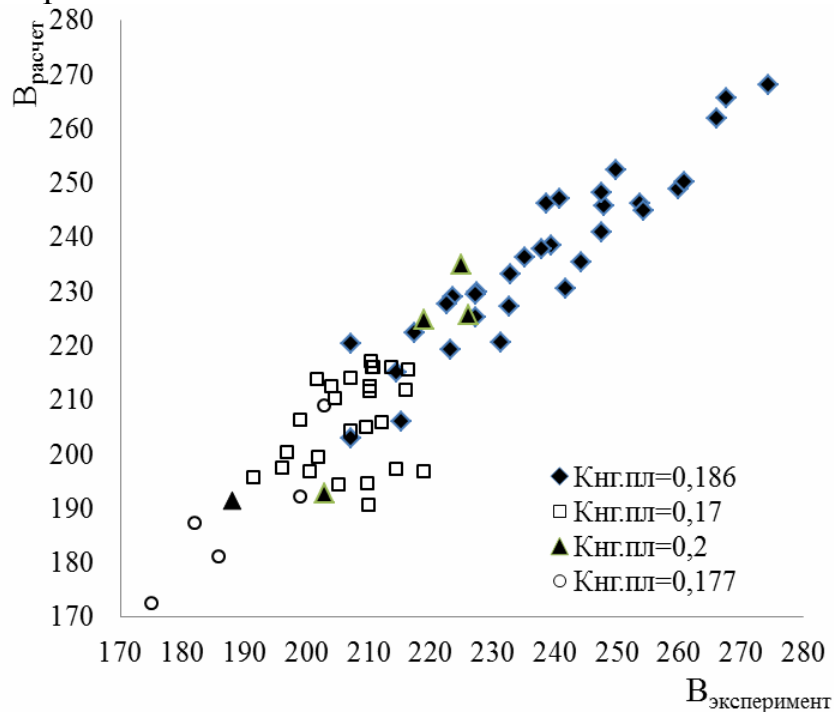


Рисунок 14 – Взаимосвязь экспериментальных и расчетных данных по содержанию воды в составах с различным РК

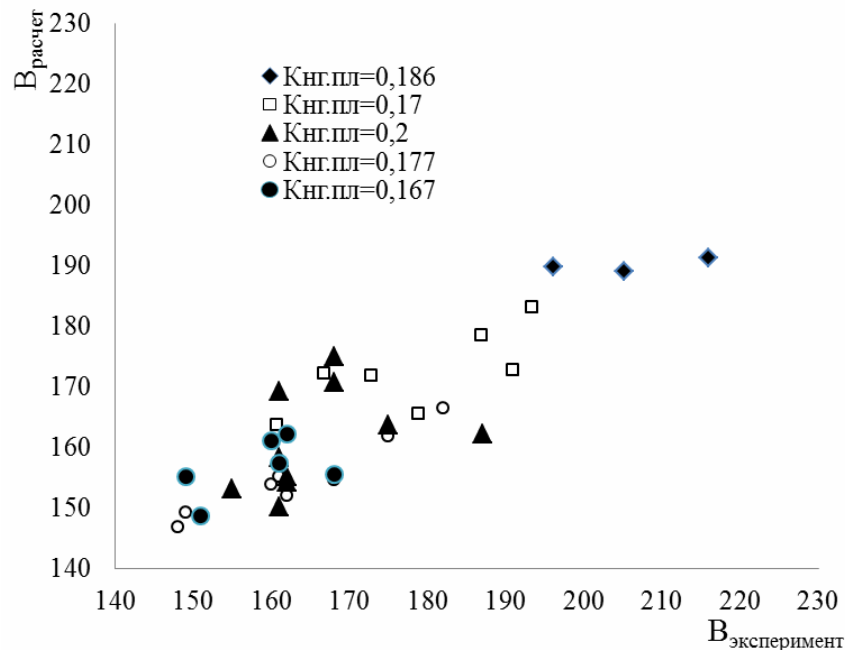


Рисунок 15 – Взаимосвязь экспериментальных и расчетных данных по содержанию воды в составах с различной ОК

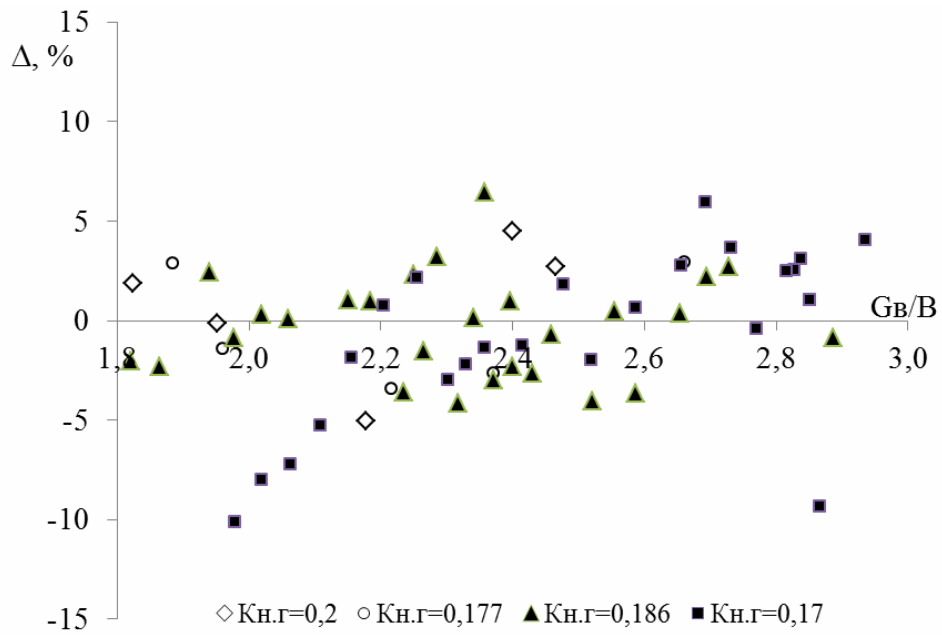


Рисунок 16– Зависимость вяжуще-водного отношения от отклонений расчетного и экспериментальных значений воды в процентах составов с различным РК

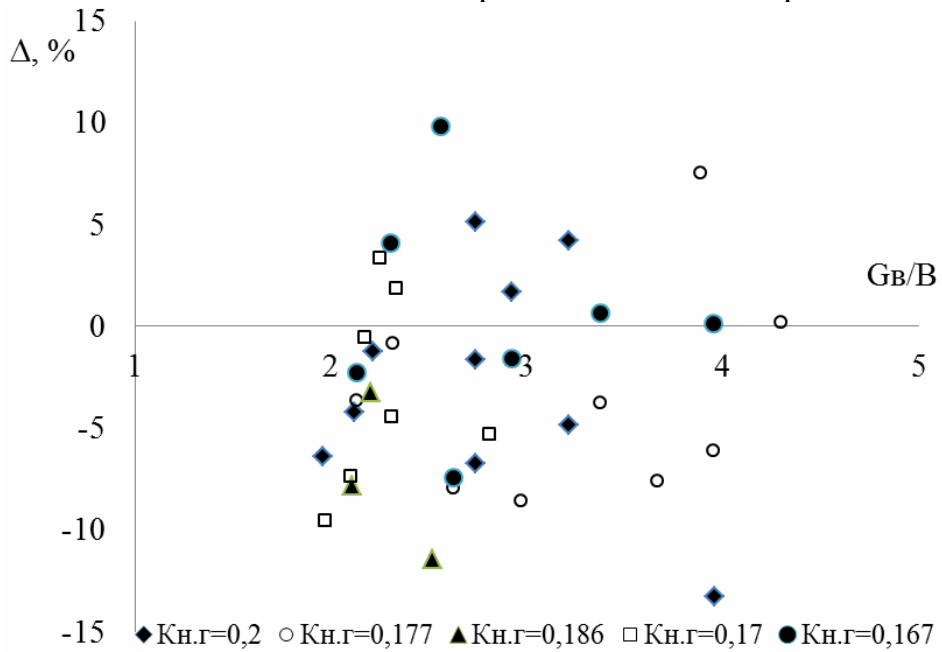


Рисунок 17– Зависимость вяжуще-водного отношения от отклонений расчетного и экспериментальных значений воды в процентах составов с различной ОК

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Constitutive modeling hinh streengthn (hinh performance concrete)/ Bulletin 42-01.208-p.122.
- 2 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: сб. тр. в 2 ч. - Мн., 2009. – т.2. -С.132-158.
- 3 Блещик, Н.П. Кинетика формирования структуры и прочности самоуплотняющегося бетона / Н.П.Блещик, А.Н.Рак // Строительная наука и техника. – 2006.-№6- С.30-41.
- 4 Блещик, Н.П. Особенности технологии применения гиперпластификаторов для бетона с целью экономии цемента / Н.П.Блещик, Н.Н.Калиновская, А.Н.Рак // Архитектура и строительство. - 2007.-№6. - С.82-84.
- 5 Провести исследования, разработать и внедрить комплексный гиперпластификатор для бетонов и растворов и технологию его производства: отчет о НИР / БелНИИС; рук. Н.П.Блещик. – Мн., 2005. – 118с.- № ГР 20044188.
- 6 Калиновская, Н.Н. Технологические свойства, прочность и эффективность применения бетона, модифицированного гиперпластификатором ГП-1 / Н.Н. Калиновская // Строительная наука и техника, 2007. - №5 (14). – С.74-83.
- 7 Рак, А.Н. Структура, технологические свойства и основные положения методики проектирования композиций самоуплотняющихся бетонных смесей /А.Н.Рак//Строительная наука и техника, 2007. - №5(14). - С.52-68.
- 8 Бабицкий, В.В. Структура и коррозионная стойкость бетона и железобетона: автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.23.05/В.В.Бабицкий; Бел.нац.техн.ун-т.- Мн.2005. - 45с.
- 9 Блещик, Н.П. Прочность на сжатие цементного камня, модифицированного различными химическими модификаторами и тонкодисперсными наполнителями / Н.П.Блещик, Д.С.Котов// Вестник Брестского Государственного технического университета.- Брест, 2008. -С.172.
10. Тейлор, Х. Химия цемента. Пер. с англ. – М.: Мир, 1996.-560 с.
11. Пауэрс, Т.К. Физические свойства цементного теста и камня // Четвертый международный конгресс по химии цемента. – М.: Стройиздат, 1964.
12. Бабков, В.В. Физико-механические аспекты оптимизации структуры цементных бетонов: автореф. дисс. ... докт. техн. наук.-Л., 1990.-35 с.
13. Блещик, Н.П. Структурно-механические свойства и реология бетонной смеси и прессвакуумбетона. - Минск, 1977. - 230 с.
14. Блещик, Н.П., Рыскин, М.Н. Взаимосвязь структуры и свойств цементного камня// Матер. междунар. 53-й науч.-техн. конф. профессоров, преподавателей, науч. работников и аспирантов Белорусской государственной политехнической академии: в 4 ч. -Мн., 1999. – ч.3. - С. 3-39.

15. Блещик, Н.П., Рыскин, М.Н. Структурно-механическая модель и прочность цементного камня на сжатие // Проблемы технологии производства строительных материалов, изделий и конструкций, строительства зданий и сооружений: сб. статей Межвуз. науч.-техн. конф.: в 2 ч. / под ред. Н.П. Блещика, В.В. Тура.-Брест:БПИ, 1998. – ч.1. -С. 44-50.
16. Берг, О.Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона.- М.: Госстройиздат, 1961.-125 с.
17. Десов, А.Е. Некоторые вопросы структуры, прочности и деформаций бетонов // Структура, прочность и деформации бетонов / под ред. Десова А.Е. - М.: Стройиздат, 1966. - С. 4-58.

источник: www.belniis.by