

УДК 666.972.16

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОДВИЖНОСТИ ЛИТЫХ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

канд. техн. наук, доц. Л.М. ПАРФЕНОВА, А.Н. ЯГУБКИН  
*(Полоцкий государственный университет)*

Исследовано влияние суперпластификаторов ГП-1, Стакемент, Реламикс, СМ-1, СМ-2, разрешенных к применению при изготовлении товарных бетонов в Республике Беларусь, на кинетику изменения подвижности цементного теста и бетонных смесей. Установлена величина оптимального истинного водоцементного отношения, при котором бетонные смеси с суперпластификаторами имеют наибольшее значение по показателю подвижности без снижения прочности бетона. Исследовано влияние водоцементного отношения на сохраняемость модифицированных бетонных смесей. Показано, что увеличение водоцементного отношения на 20 % приводит к росту сохраняемости подвижности бетонных смесей на 20...40 мин с суперпластификаторами ГП-1, Реламикс, Стакемент и на 80 мин с суперпластификаторами СМ-1, СМ-2. Определена продолжительность транспортирования бетонных смесей с учетом обеспечения требуемой подвижности при дальнейшей подаче в конструкцию бетононасосами. Построена математическая модель для определения подвижности литых бетонных смесей, измеряемой растеканием конуса, в интервале от 5 до 140 мин.

**Введение.** В строительной отрасли Республики Беларусь проводится большая работа по снижению расхода цемента, тепловой и электрической энергии. Одним из основных направлений деятельности научных и производственных организаций является производство и применение современных химических добавок в бетоны и растворы. Письмом Минстроярхитектуры «О применении химических добавок в бетоны и растворы» при изготовлении товарных бетонов разрешены к применению 22 химических добавки, в том числе 8 пластифицирующих добавок I группы (суперпластификаторов).

Согласно СТБ 1112 суперпластификаторы обеспечивают увеличение подвижности бетонной смеси от П1 до П5 без снижения прочности бетона в возрасте 28 суток. При этом указано, что подвижность смеси основного состава в течение 45 минут не должна снизиться более чем в 2 раза. В реальных производственных условиях монолитного строительства нужно знать точно, как будет происходить снижение подвижности модифицированной бетонной смеси с течением времени, что позволит вносить коррективы при назначении начальной подвижности и определять допустимую продолжительность транспортирования бетонной смеси.

Результаты исследований по изменению подвижности модифицированных бетонных смесей во времени, как правило, находят отражение в виде графиков.

Попытки получения математических зависимостей были предприняты в работах Л.И. Дворкина, В.Н. Пунагина, И.А. Кириенко, Н.П. Блещика, Н.Н. Калиновской.

В работе В.Н. Пунагина [1] для определения подвижности бетонных смесей во времени предложена следующая формула:

$$S_{kt} = S_{k0}(1 - kt), \quad (1)$$

где  $S_{k0}$  – осадка конуса бетонной смеси, определенная сразу после перемешивания смеси ( $t = 0$ );  $S_{kt}$  – осадка конуса бетонной смеси через время  $t$  после замеса, ч;  $k$  – коэффициент относительного изменения подвижности смеси, зависящий от температуры окружающего воздуха. Для бетонов на основе портландцемента  $k = t/32$  ( $t$  – средняя температура воздуха за время  $t$ ).

Основной недостаток этой зависимости заключается в том, что она не учитывает особенностей материалов, вида добавок и т.д., а также справедлива лишь при  $k > 1$ , т.е. при средней температуре воздуха, превышающей 32 °C.

И.А. Кириенко [2] для прогнозирования возможной жизнеспособности бетонной смеси были предложены понятия: «начало схватывания бетонной смеси» и «конец схватывания бетонной смеси».

Условно введенное понятие «начало схватывания бетонной смеси» означало период жизнеспособности, в течение которого возможны технологические операции по переработке бетонной смеси. Расчет периода начала схватывания предложено производить по формуле:

$$H_t = \phi_t (\tau_{n.c.} + (B/D)_\phi - K_{n.c.}), \quad (2)$$

где  $H_t$  – начало схватывания бетонной смеси, ч;  $\tau_{n.c.}$  – начало схватывания цементного теста нормальной густоты ( $K_{n.c.}$ ) при 20 °C, ч;  $(B/D)_\phi$  – фактическое водоцементное отношение с вычетом воды, адсорбированной заполнителем;  $\phi_t$  – коэффициент, зависящий от температуры.

Из формулы следует, что при  $(B/D)_\phi = K_{n.c.}$  начало схватывания бетонной смеси равно началу схватывания цементного теста (при 20 °C  $\phi_t = 1$ ).

Л.И. Дворкиным [3] для ориентировочных подсчётов времени падения подвижности литой бетонной смеси с начальной подвижностью 24 см (в интервале относительной стабильности 24...16 см) на каждые 2 см была получена следующая зависимость:

$$\tau = (K_T/12) \cdot (A_1 t_{n.c.} + A_2 (B/I\!C)_u - K_{n.c.}), \quad (3)$$

где  $A_1$  и  $A_2$  – коэффициенты, учитывающие влияние особенностей исходных материалов;  $K_T$  – коэффициент, учитывающий влияние температуры;  $(B/I\!C)_u$  – истинное  $B/I\!C$  с вычетом воды, поглощенной заполнителем.

В работе Н.Н. Калиновской [4] начальную подвижность бетонных смесей, модифицированных гиперпластификатором ГП-1, предложено определять по зависимости, учитывающей пластифицирующий эффект добавки, содержание цементного теста и эффективное водовяжущее отношение. Зависимости расстекания конуса и осадки конуса самоуплотняющейся бетонной смеси представлены в следующем виде:

$$PK = 0,97 \cdot (1 + 0,72 \cdot (W - 0,2)) \cdot (8 \cdot 10^5 \cdot m_{T,1}/S_{y,z} G_z + 180 m_{T,2})/(1 - 0,3 K_{n.c.}); \quad (4)$$

$$OK = 3250 \cdot (0,2 + (W/K_{n.c.} - 1)^{1,25}) \cdot (m_{T,1} - 0,02)^{1,55} \cdot (m_{T,2} - 0,03)/(1 - 41 K_{n.c.}^{3,7})^{-3}, \quad (5)$$

где  $W$  – эффективное водовяжущее отношение;  $S_{y,z}$  – удельная поверхность смеси заполнителей;  $G_z$  – масса заполнителей в единице объёма бетона;  $m_{T,1}$ ,  $m_{T,2}$ ,  $K_{n.c.}$  – коэффициенты учитывающие характеристики бетонной смеси.

Таким образом, до настоящего времени не разработана универсальная математическая модель для прогнозирования подвижности бетонных смесей, модифицированных современными суперпластификаторами. Проведение сравнительного анализа современных суперпластификаторов по показателю сохраняемости подвижности модифицированных бетонных смесей и разработка математической модели, позволяющей прогнозировать этот показатель во времени является актуальной задачей.

**Основная часть.** Для проведения исследований по каталогу КХД1-2007 «Химические добавки для бетонов и строительных растворов» приняты добавки, относящиеся к суперпластификаторам: Стакхемент, СМ-1, СМ-2, ГП-1, Реламикс.

**Стакхемент** – синтетическое органическое вещество ароматических кислот различной молекулярной массы с добавлением эффективного ускорителя твердения и стабилизирующих добавок.

**СМ-1** – добавка на основе сульфированных нафталинформальдегидных поликонденсатов. Обладает пониженным воздухововлечением, что способствует дополнительному повышению прочности бетона за счет уменьшения его пористости.

**СМ-2** – добавка на основе сульфированных нафталинформальдегидных поликонденсатов, содержит компоненты, обеспечивающие удлинение сроков схватывания и снижение содержания воздуха в бетонной смеси. Предназначена в качестве пластифицирующей добавки, обеспечивающей повышенную сохраняемость подвижности бетонной смеси.

**ГП-1** – высокоеффективная пластифицирующая и водоредуцирующая добавка, предназначенная для получения высокоподвижных и самоуплотняющихся бетонных смесей, высокопрочных и сверхвысокопрочных бетонов, бетонов с улучшенным качеством лицевой поверхности и т.д. Изготавливается на основе водного раствора эфира поликарбоксилата. Является пластифицирующей добавкой нового поколения, так как обладает двойным эффектом: позволяет получить смеси марки по подвижности П5 с возможностью снижения водоцементного отношения не менее чем на 12 %.

**Реламикс** – смесь неорганических (политианидов) и органических (полинафталинметиленсульфонатов) солей натрия [5].

В исследованиях использовался портландцемент ПЦ 500-Д0 Белорусского цементного завода.

На первом этапе исследований определена подвижность цементного теста и прочность цементного камня с добавками-суперпластификаторами. Для определения подвижности использовалась методика, разработанная в НИИЖБе. Методика основана на измерении диаметра расстекания цементного теста под действием силы тяжести на мини-конусе. Для определения прочности на сжатие цементного камня изготавливались кубики с размером ребра 2 см. Образцы хранились в камере нормально-влажностного твердения при температуре  $20 \pm 2$  °C и относительной влажности воздуха не менее 90 %. Кубы испытывались в возрасте 7 и 28 суток. Водоцементное отношение бездобавочного цементного теста 0,3. Полученные результаты представлены в таблице 1.

Дозировка добавок, обеспечивающая наибольший расплыв цементного теста при максимальной прочности цементного камня, принятая в качестве оптимальной и составила: 0,3 % от массы цемента для суперпластификатора ГП-1 (прочность  $R_{28} = 55,12$  МПа; расплыв цементного теста 17 см); 0,8 % от массы цемента для суперпластификатора Стакхемент (прочность  $R_{28} = 48,87$  МПа; расплыв цементного теста 16 см); 0,8 % от массы цемента для суперпластификатора СМ-1 (прочность  $R_{28} = 50,72$  МПа, расплыв цементного теста 12 см); 0,3 % от массы цемента для суперпластификатора СМ-2 (прочность  $R_{28} = 49,10$  МПа, расплыв цементного теста 12 см); 1,0 % от массы цемента для суперпластификатора Реламикс (прочность  $R_{28} = 55,68$  МПа, расплыв цементного теста 15 см).

Таблица 1

Влияние дозировок суперпластификаторов  
на прочность цементного камня и подвижность цементного теста

Вид добавки (% от массы цемента)	Прочность, МПа, в возрасте, сут		Диаметр растекания цементного теста на мини-конусе НИИЖБ, см
	7	28	
Без добавок	18,50	47,21	6
ГП-1 (0,2)	34,94	50,84	14
ГП-1 (0,3)	32,23	55,12	17
ГП-1 (0,4)	30,43	46,93	18
Стахемент (0,6)	31,42	34,50	14
Стахемент (0,8)	39,17	48,87	16
Стахемент (1,0)	35,48	39,10	17
СМ-1 (0,6)	37,55	48,72	12
СМ-1 (0,8)	39,28	50,72	12
СМ-1 (1,0)	36,99	43,68	14
СМ-2 (0,2)	32,16	43,81	10
СМ-2 (0,3)	38,91	49,10	12
СМ-2 (0,4)	30,73	36,54	14
Реламикс (0,6)	31,08	41,16	11
Реламикс (0,8)	32,41	45,30	14
Реламикс (1,0)	40,40	55,68	15

На втором этапе исследований определены нормальная густота (НГ) и сроки схватывания модифицированного цементного теста в соответствии с СТБ ЕН 196-3-2007. Результаты испытаний представлены в таблице 2.

Таблица 2

Нормальная густота и сроки схватывания цементного теста,  
модифицированного добавками-суперпластификаторами

Вид добавки (% от массы цемента)	Нормальная густота (НГ), %	Сроки схватывания		Продолжительность периода структурообразования
		начало схватывания	окончание схватывания	
Без добавок	28,5	3 ч 30 мин	4 ч 45 мин	1 ч 15 мин
ГП-1 (0,3)	20,8	4 ч 45 мин	6 ч 15 мин	1 ч 30 мин
Стахемент (0,8)	21,5	4 ч 35 мин	6 ч 05 мин	1 ч 30 мин
СМ-1 (0,8)	21,7	4 ч 40 мин	6 ч 10 мин	1 ч 30 мин
СМ-2 (0,3)	21,0	4 ч 50 мин	5 ч 45 мин	0 ч 55 мин
Реламикс (1)	22,0	3 ч 50 мин	5 ч 00 мин	1 ч 10 мин

Анализ данных таблицы 2 показывает, что максимальное снижение водосодержания при сохранении консистенции нормальной густоты достигнуто при введении суперпластификаторов ГП-1 и СМ-2 в количестве 0,3 % от массы цемента и составляет соответственно 27 и 26 %. Суперпластификаторы Стакхемент и СМ-1 в количестве 0,8 % от массы цемента позволяют снизить водосодержание соответственно на 24,6 и 23,9 %. Наименьший пластифицирующий эффект обеспечивает суперпластификатор Реламикс, снижая водосодержание на 22,8 % при дозировке 1 % от массы цемента.

Для проведения дальнейших исследований подобраны составы бетонных смесей, представленные в таблице 3. В качестве заполнителей использовался песок карьера «Боровое» ( $M_k = 1,97$ ) и щебень карьера «Микашевичи» с наибольшей крупностью зерен 20 мм.

Таблица 3

Базовые составы бетонных смесей

Шифр состава	Расход материалов, кг на 1 м <sup>3</sup> бетона				В/Ц	П/Ц	Осадка конуса, см	Прочность на сжатие бетона в возрасте 28 сут, $R_{28}^{28}$ , МПа
	Цемент (Ц)	Песок (П)	Щебень (Ш)	Вода (В)				
1	420	892	912	176	0,42	0,98	2	38,75
2	420	815	902	210	0,5	0,90	5	33,38
3	420	760	880	231	0,55	0,86	10	28,00

Опыты и расчеты, проведенные в работе [3], показали, что водоцементное отношение цементного теста в бетонной смеси ( $B/C_u$ ), найденное при учете иммобилизации воды заполнителями, является более точным физическим критерием при прогнозировании темпа падения подвижности бетонной смеси во времени, чем начальное водосодержание; ( $B/C_u$ ) физически интерпретируется как  $B/C$  цементного теста в бетонной смеси к моменту выравнивания потенциалов влагопереноса. Отмечается, что ( $B/C_u$ ) выражает такое значение  $B/C$ , при котором бетонная смесь будет иметь ту же подвижность и сроки схватывания, что и цементное тесто. Авторами установлено, что водопотребность заполнителя в бетоне пропорциональна консистенции цементного теста в бетонной смеси по отношению к нормальной густоте: «отношение количества «истинной» воды (воды цементного теста) в бетонной смеси заданной удобоукладываемости к количеству воды, иммобилизованной заполнителями, пропорционально их отношению в бетонной смеси с такой удобоукладываемостью, при которой цементное тесто имеет консистенцию нормальной густоты и те же сроки схватывания». На основании данных выводов исследователями предложена формула для расчета истинного водоцементного отношения [3]:

$$(B/C_u) = (B/C) / [1 + (B_n \cdot P + B_{nq} \cdot \mathcal{C}) / (H\Gamma \cdot C)], \quad (6)$$

где  $B_n$  – водопотребность песка, %;  $P$  – расход песка, кг/м<sup>3</sup>;  $B_{nq}$  – водопотребность щебня, %;  $\mathcal{C}$  – расход щебня, кг/м<sup>3</sup>;  $H\Gamma$  – нормальная густота модифицированного цементного теста, %;  $C$  – расход цемента, кг/м<sup>3</sup>.

Водопоглощение щебня определяли по ГОСТ 8269.0-97. Параллельно были проведены исследования по определению водопоглощения заполнителей по методике Б.Г. Скрамтаева и Ю.М. Баженова.

Отмечается [6], что предложенный способ испытания заполнителей непосредственно в растворе и бетоне обеспечивает получение наиболее достоверных технологических характеристик заполнителя. Методика заключается в определении водоцементного отношения цементного теста, растворной и бетонной смесей, обладающих одинаковой удобоукладываемостью по показателю расплыва на встряхивающем столике (цементное тесто и раствор) и осадкой конуса (раствор и бетонная смесь). Также велся расчет водопоглощения песка и щебня на основе таблиц, составленных по данным И.Н. Ахвердова и М.Г. Элбанидзе [7]. Результаты испытаний и расчетов представлены в таблице 4.

Таблица 4

Водопоглощение песка и щебня, определенное по разным методикам

Вид заполнителя	Водопоглощение, %, по методике		
	ГОСТ 8269.0-97	Б.Г. Скрамтаева, Ю.М. Баженова	По таблицам И.Н. Ахвердова и М.Г. Элбанидзе
Песок	–	3,5 %	3,7 %
Щебень	1,0 %	1,1 %	0,9 %

Анализ данных таблицы 4 показывает, что значение водоноглощения щебня, определенное по ГОСТ 8269.0-97, незначительно отличается от значений водопоглощения, определенных по методике Б.Г. Скрамтаева и таблицам И.Н. Ахвердова.

По формуле (6) выполнены расчеты ( $B/C_u$ ) для составов, представленных в таблице 3, с учетом значений нормальной густоты модифицированного цементного теста (см. табл. 2) и значений водопотребности песка  $B_n = 3,5\%$ , щебня  $B_{nq} = 1,0\%$ .

Согласно исследованиям [7], минимальное количество воды, необходимое для образования коагуляционной структуры, соответствует минимальной влагоёмкости цемента ( $K_{min} = 0,876 K_{n,q}$ ). Предельное  $B/C$ , характеризующее водоудерживающую способность цементного теста в его статическом состоянии, примерно равно  $1,65 K_{n,q}$ .

Таким образом, для используемого в эксперименте цемента ПЦ500Д0 ( $B/C_u$ ) должно находиться в интервале значений от 0,2496 до 0,4702. Рассчитанные значения ( $B/C_u$ ) модифицированного цементного теста в бетонной смеси находятся в пределах от 0,2884 до 0,3924 и не превышают граничных.

На модифицированном цементном тесте проведены исследования изменения подвижности во времени путем последовательного измерения диаметра растекания цементного теста на мини-конусе НИИЖБ с интервалом 20 мин. Согласно СТБ 1545 «Смеси бетонные. Методы испытаний» измерения прекращали в случае изменения первоначального значения подвижности на 50 % и более. Результаты эксперимента представлены в таблице 5.

Анализ полученных результатов показывает, что добавки-суперпластификаторы по-разному влияют на сохраняемость подвижности цементного теста. Наиболее длительный интервал времени до 180 мин сохраняется подвижность с суперпластификатором ГП-1 на уровне 50 % от первоначального значения.

С суперпластификаторами СМ-1, СМ-2, Стакемент цементное тесто теряет подвижность в 2 раза в течение 120...140 мин. Суперпластификатор Реламикс, содержащий ускоряющий компонент, приводит к снижению первоначальной подвижности в 2 раза в течение 20 мин.

Таблица 5

## Кинетика изменения подвижности модифицированного цементного теста

Вид добавки (% от массы цемента)	(В/Ц) <sub>u</sub>	Диаметр растекания цементного теста, см, через интервал времени, мин									
		5	20	40	60	80	100	120	140	160	180
ГП-1 (0,3)	0,2884	15,0	15,0	15,0	14,0	13,0	13,0	12,0	11,0	9,5	7,0
ГП-1 (0,3)	0,3497	16,0	16,0	15,0	14,0	13,0	13,0	12,0	11,0	8,0	7,0
Стакемент (0,8)	0,2915	10,0	7,5	7,5	7,0	6,5	5,5	4,0	—	—	—
Стакемент (0,8)	0,3531	14,0	13,0	13,0	12,5	11,0	9,5	7,0	—	—	—
Реламикс (1,0)	0,2934	14,0	7,0	5,5	4,0	—	—	—	—	—	—
Реламикс (1,0)	0,3555	15,0	14,0	11,0	9,0	8,0	—	—	—	—	—
СМ-1 (0,8)	0,2952	8,0	6,5	6,5	6,0	4,0	—	—	—	—	—
СМ-2 (0,3)	0,2930	9,0	6,0	5,0	5,0	4,0	—	—	—	—	—
СМ-1 (0,8)	0,3541	12,0	12,0	11,6	10,6	9,6	8,6	7,6	6,6	—	—
СМ-2 (0,3)	0,3504	11,0	11,0	10,0	9,0	8,0	7,0	6,0	—	—	—
СМ-1 (0,8)	0,3918	16,0	14,0	12,5	12,0	12,0	10,8	9,6	8,2	—	—
СМ-2 (0,3)	0,3924	15,0	14,0	12,0	11,0	10,5	9,0	8,0	—	—	—

Изучение изменения подвижности во времени бетонных смесей проведено на составах, представленных в таблице 3. В бетонные смеси вводились добавки суперпластификаторы в оптимальных дозировках. Введение добавок обеспечило получение бетонных смесей с маркой по подвижности П5 (осадка конуса 21...24 см). При этом марка бетонных смесей по показателю растекания конуса изменялась от РК1 до РК6. Испытания проводили по СТБ 1545. Результаты испытаний представлены в таблице 6.

Таблица 6

## Кинетика изменения подвижности модифицированных бетонных смесей

Шифр бездоба- вочного состава	Шифр состава с добавкой	Вид добавки (% от массы цемента)	В/Ц	(В/Ц) <sub>u</sub>	OK, см	Растекание конуса, см, через интервал времени, мин							
						5	20	40	60	80	100	120	140
1	1.1	ГП-1 (0,3)	0,42	0,2884	24	50	50	45	30	24	—	—	—
1	1.2	Стакемент(0,8)	0,42	0,2915	21	36	36	25	24	22	21	—	—
1	1.3	Реламикс (1)	0,42	0,2934	16	30	27	25	20	—	—	—	—
1	1.4	СМ-1 (0,8)	0,42	0,2952	22	35	34	22	20	—	—	—	—
1	1.5	СМ-2 (0,3)	0,42	0,2930	21	32	27	21	20	—	—	—	—
2	2.1	ГП-1 (0,3)	0,50	0,3497	24	60	60	50	50	30	25	22	21
2	2.2	Стакемент(0,8)	0,50	0,3531	22	40	39	37	34	28	25	23	21
2	2.3	Реламикс (1)	0,50	0,3556	21	38	36	29	27	24	—	—	—
2	2.4	СМ-1 (0,8)	0,50	0,3541	24	60	60	58	53	48	43	38	30
2	2.5	СМ-2 (0,3)	0,50	0,3504	23	56	55	50	46	40	35	31	23
3	3.1	СМ-1 (0,8)	0,55	0,3918	24	78	70	60	58	50	45	40	34
3	3.2	СМ-2 (0,3)	0,55	0,3924	24	70	64	60	56	50	42	34	31

Анализ результатов таблицы 6 показывает, что для исследуемых добавок показатель сохраняемости подвижности имеет следующие значения:  $\tau_c = 1 \text{ ч } 20 \text{ мин}$  – для суперпластификаторов ГП-1, Реламикс;  $\tau_c = 2 \text{ ч } 20 \text{ мин}$  – для суперпластификаторов СМ-1, СМ-2, Стакемент.

Результаты измерений растекания бетонной смеси коррелируют с результатами измерений растекания цементного теста с водоцементным отношением, равным истинному водоцементному отношению цементного теста в бетонной смеси. Таким образом, для подобранных составов бетонной смеси могут быть проведены пробные испытания по определению сохраняемости подвижности на мини-конусе НИИЖБ.

Следует предположить, что для бетонных смесей существует оптимальное значение истинного водоцементного отношения, при котором достигается максимальная подвижность – растекание конуса при введении суперпластификатора. При превышении этого значения в бетонных смесях наблюдается

водо- и раствороотделение (составы 3.1, 3.2, см. табл. 6). Согласно полученным результатам для бетонных смесей с соотношением  $B/U = 0,9 \dots 1,0$  оптимальное  $(B/L)_u = 0,35$ , при этом прочность модифицированного бетона не ниже прочности бездобавочного (табл. 7).

Таблица 7

## Кинетика набора прочности модифицированного бетона

Шифр состава	Вид добавки (% от массы цемента)	Прочность на сжатие бетона $R_{\text{сж}}^{28}$ , МПа, в возрасте, сут.		
		3	7	28
1	без добавок	18,38	25,25	38,75
1.1	ГП-1 (0,3)	24,38	40,89	53,75
1.2	Стахемент (0,8)	25,97	40,57	50,93
1.3	Реламикс (1,0)	26,88	38,00	43,13
1.4	СМ-1 (0,8)	22,75	36,5	39,38
1.5	СМ-2 (0,3)	18,75	29,38	38,78
2	без добавок	16,74	23,51	33,38
2.1	ГП-1 (0,3)	17,83	29,75	40,00
2.2	Стахемент (0,8)	16,46	28,00	39,75
2.3	Реламикс (1,0)	24,13	35,00	39,00
2.4	СМ-1 (0,8)	20,48	33,88	36,63
2.5	СМ-2 (0,3)	13,25	27,63	35,75

Анализ данных таблицы 7 показывает, что при  $B/U = 0,42$  суперпластификаторы ГП-1, Стахемент, Реламикс обеспечили прирост прочности в возрасте 28 суток по сравнению с прочностью бездобавочного состава соответственно на 38,7, 31,4, 11,3 %. При  $B/U = 0,55$  прочность бетона с суперпластификаторами осталась на уровне бездобавочного бетона.

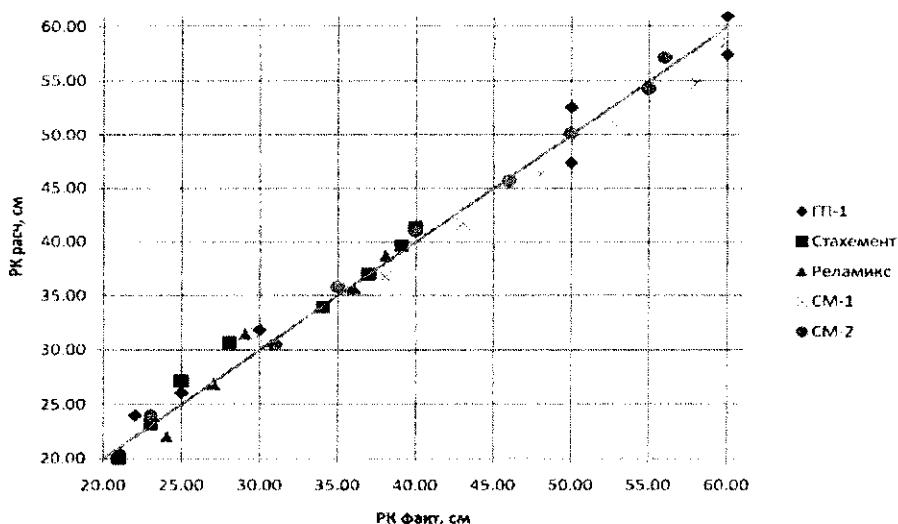
На основании полученных экспериментальных данных получена математическая модель для определения растекания конуса литьих бетонных смесей во времени:

$$PK = PK_5 + \frac{t_{\text{н.сж}}}{140} - a \cdot t - 0,000371 \cdot t^2 - 0,3 \cdot t \cdot (B/U)_u, \quad (7)$$

где  $PK_5$  – растекание конуса через 5 мин, см;  $t_{\text{н.сж}}$  – начало схватывания модифицированного цементного теста, мин;  $t$  – время, мин;  $(B/U)_u$  – истинное водоцементное отношение, определяется по формуле (6);  $a$  – коэффициент, зависящий от вида добавки-суперпластификатора:  $a = 0,118$  – для ГП-1;  $a = 0,006$  – для Стахемент;  $a = 0,084$  – для Реламикс;  $a = 0,06$  – для СМ-1;  $a = 0,08$  для СМ-2.

Формула справедлива в интервале от 5 до 140 мин при значении  $(B/U)_u = 0,35$ .

Степень корреляции опытных данных с расчётными значениями иллюстрируют рисунок и данные, представленные в таблице 8. Средняя относительная погрешность составляет 4,27 %.



Отклонение расчётов и опытных значений растекания конуса

Таблица 8

Сравнение расчётных и экспериментальных значений растекания конуса

Время, мин	Растекание конуса, см, с добавками								
	ГП-1			Стакемент			Реламикс		
	Расчетные значения	Экспериментальные значения	Δ, %	Расчетные значения	Экспериментальные значения	Δ, %	Расчетные значения	Экспериментальные значения	Δ, %
5	60,91	60,00	-1,52	41,40	40,00	-3,49	38,68	38,00	-1,79
20	57,43	60,00	4,29	39,58	39,00	-1,48	35,68	36,00	0,89
40	52,53	50,00	-5,05	36,89	37,00	0,29	31,42	29,00	-8,35
60	47,33	50,00	5,35	33,91	34,00	0,26	26,87	27,00	0,50
80	31,83	30,00	-6,10	30,64	28,00	-9,41	22,01	24,00	8,28
100	26,04	25,00	-4,14	27,06	25,00	-8,24	-	-	-
120	23,94	22,00	-8,84	23,19	23,00	-0,83	-	-	-
140	20,56	21,00	2,11	20,00	21,00	4,76	-	-	-

Окончание таблицы 8

Время, мин	Растекание конуса, см, с добавками					
	СМ-1			СМ-2		
	Расчетные значения	Экспериментальные значения	ΔΔ, %	Расчетные значения	Экспериментальные значения	Δ, %
5	61,16	60,00	-1,93	57,14	56,00	-2,03
20	58,53	60,00	2,46	54,22	55,00	1,42
40	54,76	58,00	5,59	50,07	50,00	-0,15
60	50,69	53,00	4,36	45,63	46,00	0,81
80	46,33	48,00	3,49	40,89	40,00	-2,22
100	41,67	43,00	3,10	35,85	35,00	-2,43
120	36,71	38,00	3,39	30,52	31,00	1,56
140	31,46	30,00	-4,85	23,88	23,00	-3,84

**Заключение.** Установлена величина оптимального истинного водоцементного отношения:  $(B/L)_u = 0,35$ , при котором бетонные смеси с суперпластификаторами имеют наибольшее значение по показателю подвижности без снижения прочности бетона. Показано, что увеличение водоцементного отношения на 20 % приводит к увеличению первоначальной подвижности с суперпластификаторами ГП-1, Реламикс, Стакемент в 1,1...1,2 раза (на 4...10 см); с суперпластификаторами СМ-1, СМ-2 – в 1,7 раза (на 25 см); сохраняемость увеличилась на 20...40 мин с суперпластификаторами ГП-1, Реламикс, Стакемент и на 80 мин – с суперпластификаторами СМ-1, СМ-2. Определено, что продолжительность транспортирования бетонных смесей при дальнейшей подаче бетононасосами не должна превышать 1 ч 20 мин при использовании суперпластификатора ГП-1, Реламикс; 2 ч 20 мин – при использовании суперпластификаторов СМ-1, СМ-2, Стакемент. Получена математическая зависимость, позволяющая прогнозировать подвижность бетонных смесей, модифицированных добавками-суперпластификаторами ГП-1, Стакемент, Реламикс, СМ-1, СМ-2.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пунагин, В.Н. Технология бетона в условиях сухого жаркого климата / В.Н. Пунагин. – Ташкент: Фан, 1977. – 222 с.
2. Кириенко, И.А. Расчёт состава высокопрочных и обычных бетонов и растворов / И.А. Кириенко. – Киев: Госстройиздат УССР, 1961. – 80 с.
3. Дворкин, Л.И. Эффективные литьевые бетоны / Л.И. Дворкин, В.П. Кизима. – Львов: Вища шк. Ізд-во при Львов. ун-те, 1986. – 144 с. – (Сер. Учёные Украины – народному хозяйству).
4. Калиновская, Н.Н. Комплексный гиперпластификатор для бетона: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Н.Н. Калиновская. – Минск: БНТУ, 2008. – 20 с.
5. Химические добавки для бетонов и строительных растворов. Каталог -- КХД1-2007 / М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь; сост. Н.С. Протыко. – Минск: Белстройцентр, 2007. – 57 с.
6. Баженов, Ю.М. Технология бетона / Ю.М. Баженов. – М.: Высш. шк., 1978. – 454 с.
7. Ахвердов, И.Н. Основы физики бетона / И.Н. Ахвердов. – М.: Стройиздат, 1981. – 464 с.

Поступила 12.05.2008