

Внутри же полупроницаемого слоя процесс образования кристаллогидратов идет топомимическим путем. Основную роль здесь играет взаимодействие с водой алита и белита. Именно здесь создается мелкокристаллическая структура с гелевой пористостью. По мере образования этих кристаллогидратов увеличивается прочность образующегося цементного камня. Она растет за счет увеличения площади контакта слоев CASH соседних гидратирующихся зерен цемента.

Так в общих чертах может быть описан предлагаемый нами механизм твердения цемента. Наш взгляд, он может быть распространен также на другие гидравлические вяжущие вещества, как моно-, так и полиминеральные.

Такой подход позволяет объяснить многие свойства цементного камня, а также порой парадоксальное поведение цементно-водных систем как с изменяющимся составом клинкера, так и при введении различных минеральных и органических добавок.

Также в связи с этим открываются новые возможности по изменению технологии изготовления бетонных изделий и приданию им новых свойств, чего можно достичь, оказывая соответствующее воздействие на определенном этапе твердения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Якимович В.Д. Коагуляционное структурообразование цементного теста. Материалы VIII международного научно-практического семинара «Проблемы технологии производства строительных материалов, изделий и конструкций, строительства зданий и сооружений, подготовки инженерных кадров для строительной отрасли»: Минск, БГПА, 2001.
2. Н.Санкин, В.С.Тесленко. Разрушение двойного электрического слоя слабой ударно-акустической волной. Институт гидродинамики СО РАН, 630090, Новосибирск Тр. IV Международного конгресса по химии цемента.- М.: Стройиздат, 1976.- 453с.
3. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона.- М.:Стройиздат, 1981.- 464с.
4. Брунауэр С.Адсорбция газов и паров.- М.: Государственное издательство иностранной литературы, 1948.- 790с.
5. Jennings H.M., Pratt P.L. On the Hydration of Portland Cement. Гидратация портландцемента. //Proc. Brit. Ceram. Soc. -1979. -№28. -pp.179-193.
6. Birchall J.D., Howard A.J., Bailey J.A. On the hydration of Portlandcement. О гидратации портландцемента. //Proc. Ray. Soc. -London. -1978. A360, №1702. -pp.445-453.

УДК 693.22.004.18

Астафьев Я.В.

ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЙ ТЕОРИИ "ИЗЛИШКА ПАСТЫ" ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СОСТАВОВ САМОУПЛОТНЯЮЩИХСЯ БЕТОНОВ НА ОСНОВЕ НАПРЯГАЮЩЕГОСЯ ЦЕМЕНТА

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в технологии бетона все больше внимания уделяется направлению, связанному с разработкой составов высокофункциональных самоуплотняющихся бетонов, показывающих наравне с требуемой прочностью и долговечностью превосходную способность к уплотнению под действием собственного веса, обладающих высокой устойчивостью против сегрегации, обеспечивающих воздухоотделение в момент укладки и растекания. Такие бетоны могут быть уложены в густоармированные конструкции без применения вибрации, обеспечивая высокое качество поверхности. Однако существует много неопределенностей относительно соотношений компонентов и метода подбора составов таких бетонов. Кроме того, для оценки консистенции таких бетонных смесей не могут быть применены стандартные методы, содержащиеся в действующих нормативных документах [1]. Чрезвычайно важной задачей является выявление критериев и механизмов, необходимых для достижения характерных свойств самоуплотнения. В настоящее время существует лишь разрозненные рекомендации по определению составов самоуплотняющихся бетонов и расчетно-экспериментальные методики подбора составов самоуплотняющихся бетонов [2].

В соответствии с [3] прогнозирование свойств самоуплотняющихся бетонов может быть выполнено, опираясь на реологию исходной бетонной смеси. Применяя теорию многофазного потока, бетон упрощенно рассматривают как двухфазный поток, что позволяет объяснить с точки зрения реологии поведение заполнителей в бетонных смесях. В качестве базовой теории согласно [3] принимают теорию "излишка пасты", которая выявляет зависимости, возникающие при взаимодействии

заполнителя с цементной пастой. Целью представленной работы явилось изучение реологических характеристик и деформаций расширения самоуплотняющихся бетонных смесей на основе расширяющегося цемента при изменении объемного содержания и granulometрии заполнителя, опираясь на теорию "излишка пасты".

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ИЗЛИШКА ЦЕМЕНТНОЙ ПАСТЫ

Согласно [3], бетонную смесь упрощенно рассматривают как двухфазный материал, состоящий из заполнителей и расположенной между ними цементной пасты. В соответствии с теоретическими представлениями большая часть цементной пасты необходима не только для того, чтобы минимизировать трение между зернами заполнителя, но и в значительной мере для того, чтобы обеспечить требуемую текучесть бетонной смеси. На рисунке 1а приведена схема бетонной смеси. Если максимально уплотнить заполнитель (см. рис. 1б), то объем цементной пасты, находящийся между заполнителем, образует так называемую упакованную цементную пасту P_c , а остальной объем цементной пасты называется, согласно [3], "излишком" цементной пасты P_e . "Излишек" цементной пасты обуславливает текучесть бетонных смесей. Реологические характеристики бетонных смесей зависят от свойств собственно цементной пасты и толщины прослойки "излишка" цементной пасты. Объем "излишка" цементной пасты можно рассчитать простым вычитанием из полного объема цементной пасты V_p объема упакованной цементной пасты P_c (см. рис. 1в).

$$P_e = V_p - P_c \quad (1)$$

Толщина прослойки, образуемой "излишком" цементной пасты t_p , может быть определена делением объема "излишка" цементной пасты на полную площадь поверхности заполнителя

$$t_p = \frac{P_e}{S_{\text{all}}}, \quad (2)$$

где S_{all} — полная площадь поверхности заполнителя.

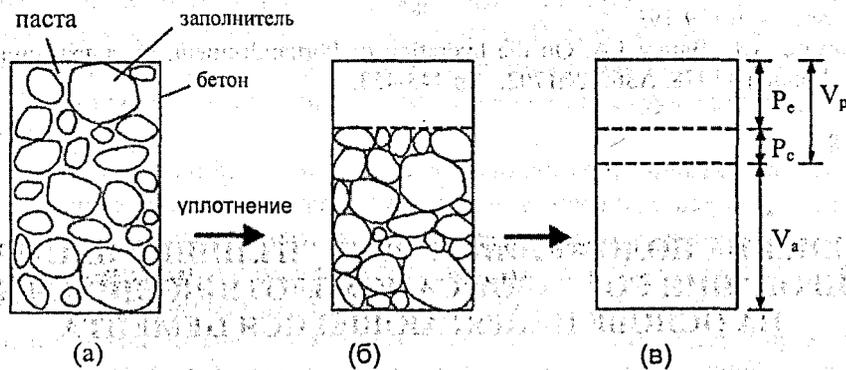


Рисунок 1 — К определению объема прослойки цементной пасты

Для того, чтобы получить более точное значение t_p , рассматривают относительное объемное содержание заполнителя в бетоне V_a , а также процентное содержание твердой фазы в объеме заполнителя G . Тогда толщину прослойки цементной пасты можно, согласно [3], рассчитать по формуле

$$t_p = \left(1 - \frac{V_a}{G} \times 100\right) \times \frac{10}{S \times V_a}, \quad (3)$$

где V_a — относительное объемное содержание заполнителя в бетоне;

G — процентное содержание твердой фазы в объеме заполнителя,

S — удельная площадь поверхности заполнителя, $\text{мм}^2/\text{мм}^3$.

Определение удельной площади поверхности заполнителя возможно вычислять используя положения методики [3].

Объем зерна заполнителя v_p может быть определен:

$$v_p \cong kD_p^3, \quad (4)$$

где D_p — расчетный диаметр зерна заполнителя, согласно [4],

k — коэффициент формы объема (в случае сферы, $k = \pi$, $f = \pi/6$, и $f/k = 6$, для гравия $f/k = 6.5$, дробленый заполнитель $f/k = 7.5$).

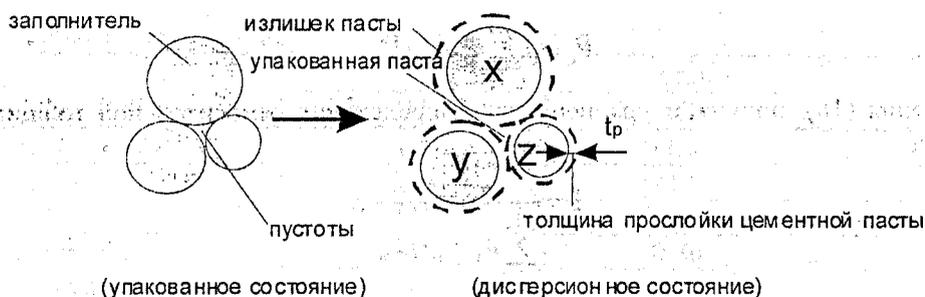


Рисунок 2 – К определению толщины прослойки цементной пасты

Площадь поверхности зерна заполнителя

$$s = fD_p^2, \quad (5)$$

где f – коэффициент формы площади.

Тогда полная площадь поверхности заполнителя

$$S_{all} = \sum_i s_i N_i, \quad (6)$$

где s_i – площадь поверхности частицы размера x ,

N_i – номер поверхности частицы размера x .

$$N_i = \frac{V_{ai}}{kD_{pi}^3}, \quad (7)$$

$$S_{all} = \left(fD_{p0.15}^2 \times \frac{V_{a0.15}}{kD_{p0.15}^3} \right) + \dots + \left(fD_{p20}^2 \times \frac{V_{a20}}{kD_{p20}^3} \right), \quad (8)$$

$$S_{all} = \sum_i \frac{f}{k} \times \frac{V_{ai}}{D_{pi}}, \quad (9)$$

$$V_a = \sum_i V_{ai}, \quad (10)$$

$$S = \frac{S_{all}}{V_a}. \quad (11)$$

При обобщении результатов [3], рекомендовано использовать относительные реологические характеристики и относительную толщину прослойки цементной пасты. Относительная толщина прослойки цементной пасты I определяется как – толщина прослойки цементной пасты частицы t_{px} , отнесенная к расчетному диаметру заполнителя D_{px}

$$I = \frac{t_{px}}{D_{px}}, \quad (12)$$

$$t_{px} = I \cdot D_{px}, \quad (13)$$

Тогда объем прослойки цементной пасты p_{ex} , окружающей частицу заполнителя x (см. уравнение 14), может быть рассчитан при умножении t_{px} на площадь поверхности заполнителя s_x . При помощи уравнений (14) и (15) возможно вычислить полный объем прослоек цементной пасты вокруг n частиц заполнителя x .

$$p_{ex} = t_{px} \cdot s_x, \quad (14)$$

$$P_{ex} = n_x \cdot p_{ex}, \quad (15)$$

$$P_{ex} = n_x \cdot I \cdot D_{px} \cdot s_x, \quad (16)$$

Полный объем прослоек цементной пасты может быть определен суммированием P_e для каждого заполнителя размера i :

$$P_e = \sum_i P_{ei}, \quad (17)$$

$$P_e = I \sum_i^n n_i \cdot s_i \cdot D_{pi}^3, \quad (18)$$

Из уравнения (18), получают уравнение для определения относительной толщины прослойки цементной пасты:

$$I = \frac{P_e}{\sum_i^n n_i \cdot s_i \cdot D_{pi}}, \quad (19)$$

или

$$I = \frac{P_e}{\sum_i^n \frac{f}{k} \cdot \frac{V_{ai}}{D_{pi}} D_{pi}}, \quad (20)$$

Пояснения к формулам (19) и (20) даны ранее по тексту.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

В выполненных исследованиях использовали смесь портландцемента (ПЦ) класса 42,5 с расширяющейся сульфалоюминатной добавкой. В качестве расширяющейся добавки использовали смесь глиноземистого цемента (ГЦ) и двуводного гипса (Г). Соотношение ПЦ:ГЦ:Г составляло 77:13:10. Для получения требуемой подвижности применяли два вида суперпластификаторов: суперпластификатор – С-3 по ТУ 6-36-0204229-625-90 (на базе сульфированных нафталинформальдегидов), Melment F10 (на базе сульфированных меламинформальдегидов), мелкодисперсный наполнитель – доломитовая мука (истинная плотность 2650 кг/м³). В качестве модификатора вязкости использовали Vinnoras Re 5044N. В качестве крупного заполнителя использовался щебень фракции 5...10 мм Микашевичского карьера, мелкий заполнитель песок с модулем крупности $M_k=2,32$. График зернового состава песка приведен на рисунке 3.

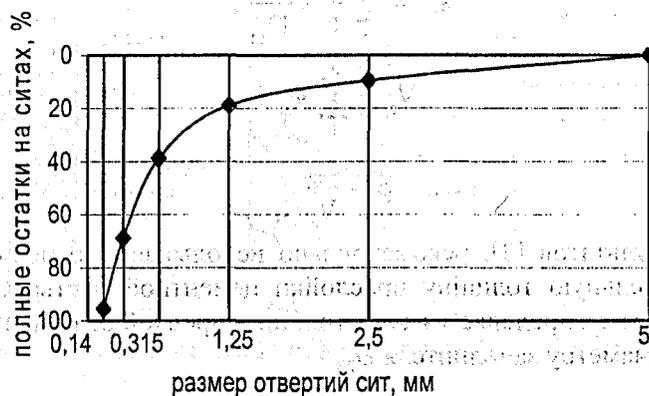


Рисунок 3 – График зернового состава песка с $M_k=2,32$

Соотношение крупного заполнителя и мелкого принимали равным 1:1. Пустотность заполнителя составляла 30%. Составы цементных паст проектировали с учетом требований, необходимых для получения самоуплотняющихся свойств. Были исследованы три различные пасты, составы и основные характеристики которых приведены в табл. 1.

Величину распыла конуса цементных паст определяли в соответствии с методикой [5]. Время истечения определяли, используя конус высотой 30 см, диаметром отверстия 2 см и диаметром верхней части 10 см. Для определения самонапряжения использовали образцы-кольца. Испытания образцов проводили по стандартным методикам [6].

Относительное объемное содержание заполнителя в бетоне варьировали от 0,5 до 0,57. Распыл конуса самоуплотняющихся бетонных определяли согласно [7], вязкость смесей оценивали временем t_{50} , необходимым для достижения распыла конуса, равного 50 см, согласно [7]. Для оценки способности прохождения самоуплотняющегося бетона через арматурные препятствия использовали кольцо, согласно методики [7] (см рис 4). На опорную плиту устанавливают кольцо, в центре которого помещен стандартный конус с диаметром основания 20 см. Конус заполняют бетоном, затем равномер-

Таблица 1 – Составы и свойства паст

	Составы		
	П1	П2	П3
Напрягающий цемент, кг/м ³	1033	1126	1549
Доломитовая мука, кг/м ³	519	481	-
Вода, л/м ³	471	455	500
С-3, % по массе цемента	0,79	0,80	-
Melment F10, % по массе цемента	-	-	0,78
Vinnopas RE 5044N, кг/м ³	-	-	16,6
Распływ конуса, см	30	32	29
Время истечения, с	4,72	3,8	4,3
Самонапряжение, МПа	1,6	1,5	3,0

ным движением поднимают. После окончания течения бетона измеряют расстояния в центре и в четырех точках, расположенных на взаимно перпендикулярных осях на внутренней и внешней гранях кольца (см. рисунок 5). Рассчитывают $h_1 = 110 - d_1$ и все значения $h_{a,i} = 110 - d_{a,i}$ и $h_{b,i} = 110 - d_{b,i}$ ($i = 1$ to 4). Вычисляют 4 значения $h_{mi} = h_1 - h_{a,i}$; затем среднюю величину h_m . вычисляют четыре значения $h_{ni} = h_{a,i} - h_{b,i}$; и среднее значение h_r . Вычисляют $2h_r - h_m$. Величина $2h_r - h_m$ является характеристикой способности прохождения самоуплотняющихся бетонных смесей через ограничения.

Схема 1

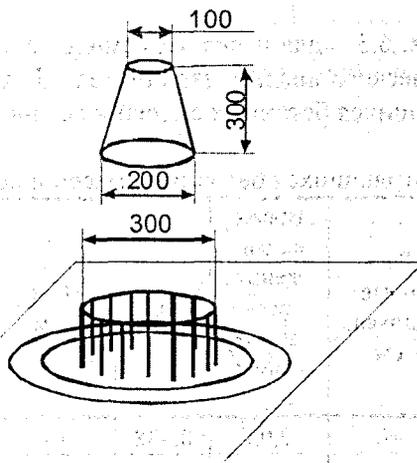


Схема 2

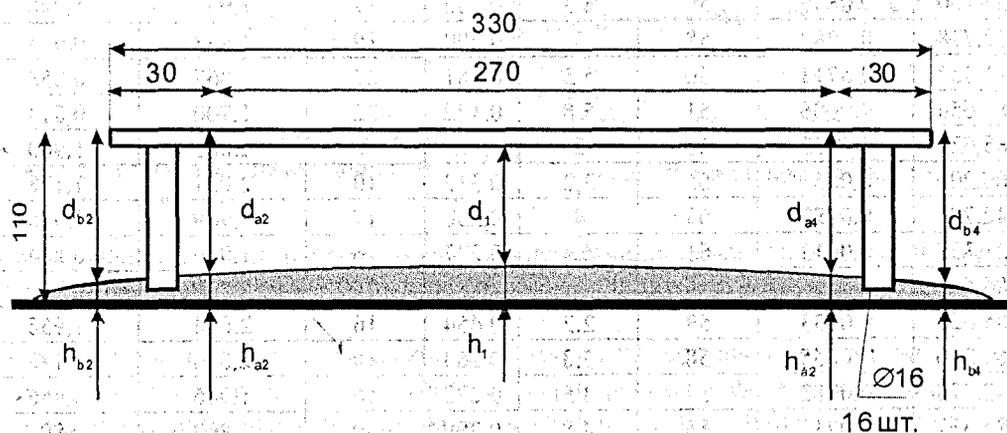


Рисунок 4 – Установка для испытания способности прохождения самоуплотняющихся бетонных смесей сквозь арматурные стержни; согласно [7]

Для определения самонапряжения самоуплотняющихся бетонов изготавливали образцы (по три образца для каждого состава бетона) размером 160×40×40 мм. Испытания образцов проводили по стандартным методикам [6]. Составы бетонов приведены в табл. 2.

Расчет толщины прослойки цементной пасты и относительной толщины прослойки цементной пасты производили, принимая отношение коэффициента формы площади к коэффициенту формы

Таблица 2 – Составы самоуплотняющихся бетонов

Составы	Напрягающий цемент, кг/м ³	Доломит, кг/м ³	Вода, кг/м ³	песок, кг/м ³	щебень, кг/м ³	С-3, л/м ³	Melment F10, кг/м ³	Vinnopas Re 5044N, кг/м ³
B050-П1	516,3	259,7	235,5	662,5	662,5	11,8	-	-
B0515-П1	500,8	251,9	228,4	682,4	682,4	11,4	-	-
B053-П1	485,3	244,1	221,4	702,3	702,3	11,1	-	-
B0545-П1	469,8	236,3	214,3	722,1	722,1	10,7	-	-
B057-П1	444,0	223,3	202,5	755,3	755,3	10,1	-	-
B050-П2	504,7	269,7	235,4	662,5	662,5	11,5	-	-
B0515-П2	489,6	261,6	228,4	682,4	682,4	11,2	-	-
B053-П2	474,4	253,5	221,3	702,3	702,3	10,8	-	-
B0545-П2	459,3	245,4	214,2	722,1	722,1	10,5	-	-
B057-П2	434,0	231,9	202,5	755,3	755,3	9,9	-	-
B050-П3	782,8	-	247,5	662,5	662,5	-	6,1	8,4
B0515-П3	759,3	-	240,1	682,4	682,4	-	5,9	8,1
B053-П3	735,9	-	232,6	702,3	702,3	-	5,7	7,9
B0545-П3	712,4	-	225,2	722,1	722,1	-	5,6	7,6
B057-П3	673,2	-	212,8	755,3	755,3	-	5,3	7,2

объема для щебня $f/k = 7,5$ и $f/k = 6,5$ – для песка. Объемное содержание фракций заполнителя принимали по данным гранулометрического анализа заполнителя. В таблице 3 приведены полученные в опытах параметры самоуплотняющихся бетонных смесей и бетонов.

Таблица 3 – Параметры самоуплотняющихся бетонных смесей и бетонов

Составы	Толщина прослойки цементной пасты, мкм	Относительная толщина прослойки цементной пасты	Распływ конуса, см	Время достижения расплыва конуса t_{50} , с	$1/t_{50}$	$2H_r - H_m$, мм	Подвижность бетона, отнесенная к подвижности пасты	Вязкость бетона, отнесенная к вязкости пасты	Самонапряжение, МПа
B050-П1	285,622	0,0933	60	2,95	0,338	13	2,000	1,600	0,687
B0515-П1	264,200	0,0855	59	4,3	0,232	17	1,967	1,098	0,652
B053-П1	242,778	0,0782	58	5	0,200	19	1,933	0,944	0,601
B0545-П1	221,357	0,0713	56	5,5	0,181	27	1,867	0,858	0,558
B057-П1	185,654	0,0606	51	5,8	0,172	32	1,700	0,814	0,550
B050-П2	285,622	0,0933	66	2	0,500	8	2,063	1,900	0,630
B0515-П2	264,200	0,0855	65	3,2	0,312	10	2,031	1,188	0,644
B053-П2	242,778	0,0782	63	4	0,250	17	1,969	0,950	0,601
B0545-П2	221,357	0,0713	61	4,4	0,227	16	1,906	0,864	0,515
B057-П2	185,654	0,0606	55	5	0,2	25	1,719	0,760	0,500
B050-П3	285,622	0,0933	59	2,2	0,454	16	2,034	1,955	2,300
B0515-П3	264,200	0,0855	58	3,8	0,263	16	2,000	1,132	1,970
B053-П3	242,778	0,0782	57	4,5	0,222	16	1,966	0,956	1,720
B0545-П3	221,357	0,0713	55	4,8	0,208	30	1,897	0,896	1,670
B057-П3	185,654	0,0606	51	4,8	0,208	35	1,759	0,896	1,610

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рисунке ба и бб показаны графики изменения вязкости и подвижности бетонных смесей в зависимости от относительной толщины прослойки цементной пасты. С увеличением относительного объемного содержания заполнителя в бетоне уменьшается толщина прослойки цементной пасты. Увеличение толщины прослойки цементной пасты изменяет характер взаимодействия между зернами заполнителя. С возрастанием количества заполнителя возрастает вязкость и уменьшается подвиж-

ность бетонных смесей. Изменение реологических характеристик самоуплотняющихся бетонных смесей зависит также от свойств паст. Если отнести реологические характеристики самоуплотняющихся бетонных смесей к реологическим характеристикам паст (см. рис. 7а и 7б), то получим зависимость реологических характеристик от относительной толщины прослойки цементной пасты. Как показано на рисунке 7, вязкость и подвижность бетонных смесей по отношению к реологическим характеристикам паст зависит только от относительной величины прослойки цементной пасты. Причем точки перегиба графиков соответствуют одной и той же величине относительной толщины прослойки цементной пасты, примерно равной 0,82...0,85. Это значение является оптимальным для подборов составов самоуплотняющихся бетонов.

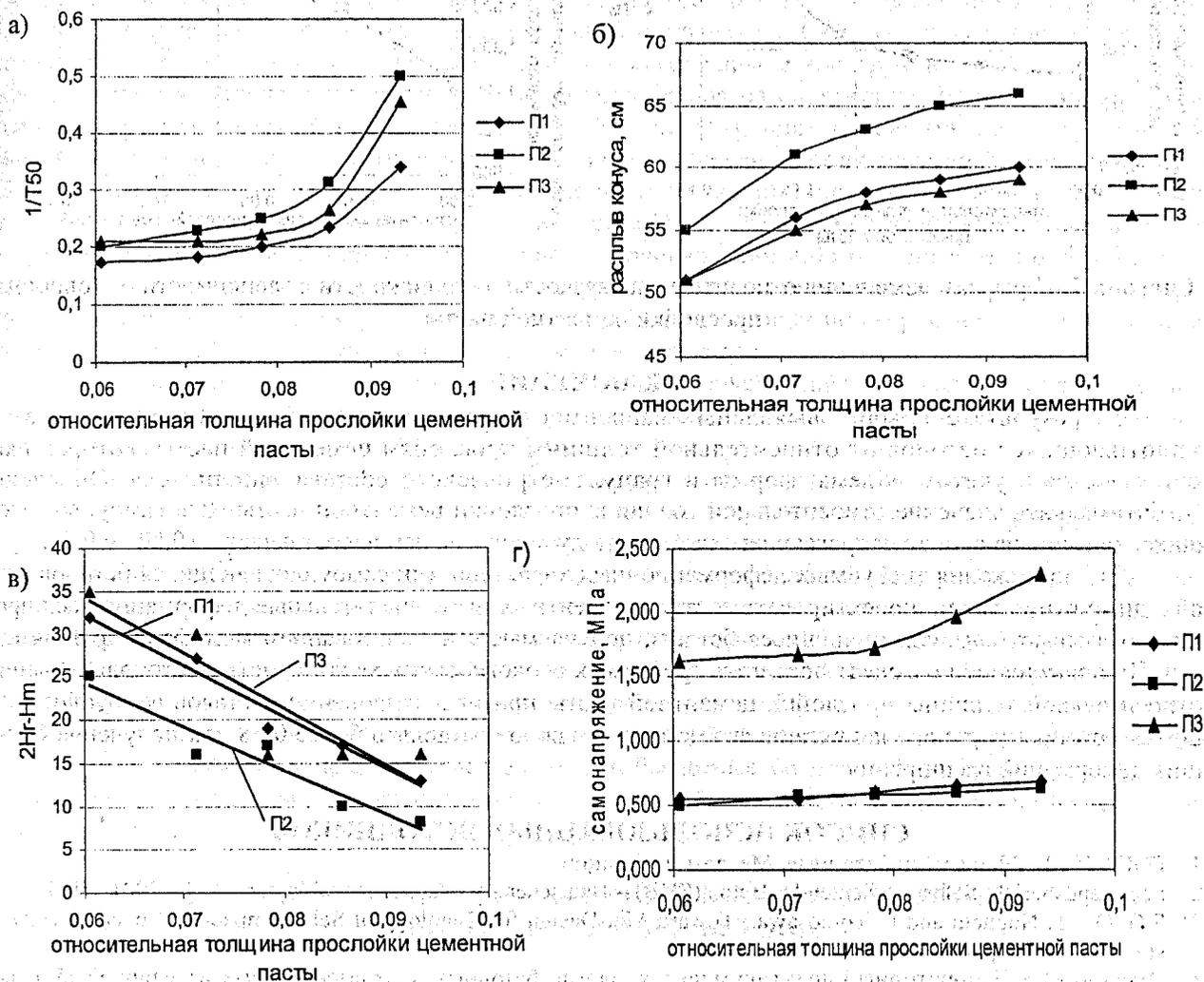


Рисунок 6 – Графики изменения реологических и деформационных характеристик самоуплотняющихся бетонов в зависимости от относительной толщины прослойки цементной пасты

Как видно из рисунка 6, реологические характеристики составов бетонов на основе паст П1 и П2 сильно отличаются, но в то же время имеют примерно равные деформации расширения. Это объясняется изменением соотношений компонентов в составах. Объемное отношение напрягающего цемента к наполнителю составов П1 равно 1,7, что меньше чем у составов П2, для которых равно 2 (см. табл. 1), а дозировка суперпластификатора увеличивается. Способность самоуплотняющихся бетонов проходить сквозь препятствия (см. рис. 6в) линейно зависит от относительной толщины прослойки цементной пасты и реологических характеристик самоуплотняющихся бетонов.

На рисунке 6г показан график изменения самонапряжения бетонов в зависимости от относительной толщины прослойки цементной пасты. С увеличением относительной величины прослойки цементной пасты возрастает самонапряжение самоуплотняющихся бетонов. Составы П3 показали наибольшие значения деформаций расширения. Это объясняется тем, что вместо мелкодисперсного

наполнителя применен модификатор вязкости жидкости Vinnopas RE 5044N, что позволило уменьшить водо-цементное отношение и дозировку суперпластификатора в самоуплотняющихся бетонах с одной стороны, и увеличить расход напрягающего цемента с другой. Применение модификатора вязкости позволило избежать расслоение бетонных смесей и сделало бетонные смеси менее чувствительными к изменению количества воды.

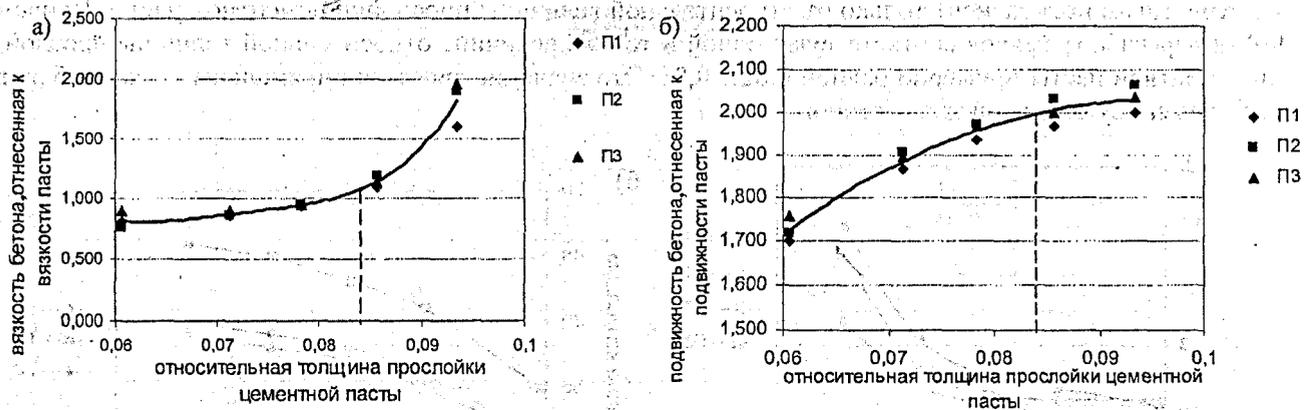


Рисунок 7 – Графики изменения относительных вязкости и подвижности в зависимости от толщины прослойки цементной пасты

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате были выявлены зависимости реологических характеристик самоуплотняющихся бетонов от относительной толщины прослойки цементной пасты, которая рассчитывается с учетом объема, формы и гранулометрического состава заполнителя. Определено оптимальное значение относительной толщины прослойки цементной пасты. Для самоуплотняющихся бетонов на основе напрягающего цемента полученное значение составляет от 0,82 до 0,85.

Для достижения требуемых деформационных характеристик самоуплотняющихся бетонов необходимо рационально проектировать составы цементных паст. Значительные деформации расширения показывают самоуплотняющиеся бетоны, получаемые с использованием модификаторов вязкости. Их применение позволяет достигать требуемых реологических характеристик бетонов. Значение относительной толщины прослойки цементной пасты при проектировании составов самоуплотняющихся бетонов на основе напрягающего цемента должно составлять более 0,78 для получения больших деформаций расширения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- ГОСТ 10181-2000 Смесей бетонные. Методы испытаний
- Sachstandsbericht Selbstverdichtender Beton (SVB) – Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Berlin 2001, s.107
- S.G. Oh, T. Noguchi and F. Tomosawa.: Toward Mix Design for Rheology of Self-Compacting Concrete. University of Tokyo, Japan
- Шалимо М.А. Лабораторный практикум по технологии бетонных и железобетонных изделий: Учеб. пособие. – Мн.: Выш. шк., 1987. – 196 с.: ил
- Selbstverdichtender Beton (SVB) mit EFA-Füller® als Betonzusatzstoff Bindemittelkomponente (Berechnungs- und Prüfverfahren zur Betonzusammensetzung selbstverdichtender Betone (SVB)) - BauMineral GmbH Information, URL: www.bauminerall.de. 2000
- СТБ 1335-2002 Цемент напрягающий. Технические условия
- Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete - EFNARC, URL: www.efnarc.org. 2002