

скими зажимами. После достижения необходимой величины преднатяжения подвижные траверсы закреплялись стопорными гайками.

Первоначально производилось натяжение нижней арматуры, затем, после ее закрепления - верхней.

Контроль равномерности усилий в арматурных стержнях осуществлялся с помощью мессур на базе 30 см и индикаторов перемещений часового типа с ценой деления 0,001 мм. Кроме того, усилие натяжения контролировалось по образцовому манометру гидросистемы и по образцовому эталонному динамометру ДОС-50.

Для снятия релаксации стержни, до создания расчетного значения величины предварительного напряжения, подвергались вытяжке при уровне преднатяжения на ступень превышающем проектный. В таком состоянии стержни выдерживались не менее суток до бетонирования балок.

Величина рабочего натяжения арматуры (для достижения расчетного уровня) в каждом случае устанавливалась с учетом возможных потерь. В процессе выдержки образцов потери преднатяжения определялись с помощью мессур, закрепляемых на реперах, последние крепились на арматуре.

Снятие преднатяженной арматуры с упоров производилось через 28 суток после бетонирования образцов при достижении бетоном проектной прочности.

Выгиб балок в своей плоскости фиксировали индикаторами перемещений с ценой деления 0,01 мм, закрепленными на трубчатой штанге. Ножевые опоры штанги устанавливались на длине расчетного пролета балки. Величина выгиба представляет собой разность между показаниями индикатора до и после отпуска натяжения арматуры.

Испытание опытных образцов основной группы проводили по трехопорной статически неопределимой схеме при шарнирно-подвижных крайних опорах и шарнирно-неподвижной - средней. Опорами служили кольцевые динамометры. Размеры опорных и грузораспределительных пластин были 80x150x20 мм.

Перед началом испытаний балки в течение 10 минут подвергались пригрузу нагрузкой 10 кН в каждом пролете. После снятия прируза осуществлялось рабочее нагружение, которое проводилось этапами, составляющими примерно 1/10 от ожидаемой разрушающей нагрузки, с выдержкой на каждом из них 10-15 мин. За это время снимались показания индикаторов, прогибомеров, фиксировалось образование и развитие трещин, замерялась ширина их раскрытия. Показания приборов на каждом этапе снимались дважды - сразу же после приложения нагрузки и после выдержки.

Нагрузку создавали в силовых рамах гидравлическими домкратами ДГС-5. Величину прикладываемого усилия определяли по по-

казаниям манометра МТИ-400 и контролировали по значениям опорных реакций, измеренных с помощью предварительно проградуированных колец-динамометров. Общий вид балки на опытной установке показан на рис. 2.

Прогибы балок замерялись прогибомерами ПАО-7 в серединах пролетов, под грузами и над всеми опорами (для учета осадки опор).

Для определения возможного отклонения вертикальной оси (главной оси поперечного сечения) балки из силовой плоскости измерение вертикальных перемещений производили с двух сторон сечения над средней опорой.

Измерение деформаций верхней и нижней арматуры осуществлялось с помощью индикаторов перемещений часового типа с ценой деления 0,001 мм на базе 200 мм. Установка индикаторов производилась следующим образом. К ненапрягаемой арматуре приваривались металлические стерженьки диаметром 6 мм, длиной 20 мм с резьбой на конце. Перед бетонированием на стерженьки навинчивалась металлическая насадка, имеющая форму усеченного конуса, меньшим основанием плотно упирающаяся в арматурный стержень. После распалубки насадка вывинчивалась; в образовавшийся колодец устанавливались с помощью резьбового соединения держатели для индикатора и удлиняющей штанги.

Снятие показаний с приборов, как отмечалось, производилось на всех этапах нагружения. Непосредственно перед разрушением балок удавалось записать показания двух динамометров, что позволяло во всех случаях достоверно определить величину разрушающей нагрузки.

На каждом этапе нагружения, вплоть до разрушения, на боковой поверхности опытных балок отмечали появление и зарисовывали развитие нормальных и наклонных трещин.

Ширину раскрытия наиболее характерных трещин замеряли с помощью микроскопа МПБ-2 с ценой деления 0,05 мм.

После исчерпания несущей способности опытные балки разгружались, производили снятие показаний со всех приборов, фиксировали остаточную ширину раскрытия трещин.

Характерное разрушение неразрезной преднатяженной балки по наклонному сечению показано на рис. 3. Морфология трещинообразования и характер разрушения образцов показаны на рис. 4. Величины усилий при образовании трещин и исчерпании несущей способности опытных балок приведены в таблице 3.

Результаты экспериментов свидетельствуют о необходимости введения корректив в расчетные зависимости норм при оценке работы наклонных сечений неразрезных преднатяженных железобетонных изгибаемых элементов.

Материал поступил в редакцию 09.01.08

GASHKO V.I. Results of experimental researches of inclined sections of the not cut previously intense ferro-concrete beams

The results of experimental researches of inclined sections of the not cut previously intense ferro-concrete beams are given. The existing methods do not reflect to the full feature of their job.

УДК 666.972:693.542.4:620.17

Блещик Н.П., Котов Д.С.

ПРОЧНОСТЬ НА СЖАТИЕ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ, МОДИФИЦИРОВАННОГО РАЗЛИЧНЫМИ ХИМИЧЕСКИМИ МОДИФИКАТОРАМИ И ТОНКОДИСПЕРСНЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ

Введение. Интенсивное развитие строительной отрасли в Республике Беларусь и необходимость повышения производительности труда, сокращения материалоемкости и энергоемкости железобетонных конструкций требуют дальнейшего совершенствования основ бетоноведения с целью создания новых энерго- и ресурсосберегающих композиций бетона. Одним из наиболее перспективных направлений является разработка и применение так называемых самоуплотняющихся бетонов, т.е. бетонных смесей, не требующих применения вибрации при их укладке в конструкцию. Данный вид бетона характеризуется повышенным расходом цементного теста, модифицированного как химическими модификаторами, так и введением тонкодисперсных наполнителей.

Как известно, прочность на сжатие бетона при прочих равных условиях зависит от прочности и объемной концентрации цементного камня. В этой связи целью предлагаемой работы является исследование физико-механических свойств цементного камня, модифицированного различными пластификаторами и дисперсным наполнителем, и получение экспериментально-теоретических и аналитических зависимостей прочности цементного камня, позволяющих осуществлять достоверное прогнозирование прочности цементного камня и самоуплотняющегося бетона.

Исследования выполнялись по заданию Минстройархитектуры по теме: "Исследовать реологические, структурные, физико-механические и технологические свойства самоуплотняющихся бе-

Блещик Николай Павлович, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РБ.

Котов Дмитрий Святославович, аспирант, младший научный сотрудник.

Беларусь, РУП «Институт БелНИИС», 220131, г. Минск, пр. Ф.Скорины, 15Б.

тонов, обеспечивающие увеличение производительности труда при укладке бетонной смеси, снижение удельных затрат энергии и стоимости отделочных работ. Разработать и внедрить комплект нормативно-технической документации" (рег. № 20053268).

1. Краткий обзор математических моделей прочности цементного камня. В работах [1 и др.] показано, что на прочность цементного камня оказывают существенное влияние: характеристики цемента, такие как состав и микроструктура клинкера, содержание гипса и распределение частиц по размерам; водоцементное отношение и содержание воздуха и каких – либо других добавок; условия перемешивания; условия выдерживания, особенно температура и относительная влажность; возраст; способ испытания и влажность образцов.

Одной из первых зависимостей, устанавливающих взаимосвязь между перечисленными параметрами и прочностью цементного камня, можно считать зависимость Фере, имеющую вид:

$$\left[\frac{c}{c + \omega + a} \right]^2, \quad (1)$$

где c , ω , a – объем цемента, воды и воздуха соответственно.

Зависимость Фере может быть представлена в виде:

$$\left(\frac{1}{1 + \frac{V_{вод} + V_e}{V_c}} \right)^2 \quad (2)$$

$$f_{ц.к.} = 250\Phi^{2,9}\varphi_f \cdot \left[(1 - (1 - K_{св})m_{св}) + \frac{(1 - K_{св})m_{св}}{(1 - (1 - K_{св})m_{св})\lambda_1} \left(\frac{4,0 \cdot 10^4 \Phi^{1,8}}{E_{н.вкл.}} (1 - m_{св.}) \frac{K_{св} m_{св}}{\varphi_E} \right) \right], \quad (7)$$

из которой следует, что прочность цементного камня зависит лишь от отношения объемов воды ($V_{вод}$) и воздуха (V_e) к объему цемента $V_c = \frac{C}{\rho_c}$, где C и ρ_c – содержание и плотность цемента. Однако, очевидно, что данная зависимость не включает в себя все вышеперечисленные факторы.

Как показано в [2] наиболее удачной, с позиции описания связи структура – прочность, следует считать упрощенную модель Т. Пауэрса [3]. Согласно данной модели, затвердевший цементный камень включает в себя цементный гель, состоящий из продуктов гидратации цемента с их гелевыми порами, капиллярные поры и клинкерные частицы. Прочность цементного камня является функцией критерия X , характеризующего концентрацию продуктов гидратации цемента в доступном для них пространстве:

$$f_c = f_c^0 X^n, \quad (3)$$

где X – отношение объема геля к суммарному объему геля и капиллярных пор;

f_c^0 – характеризует прочность геля;

$n = 2,6...3$ – константа, зависящая от вида цемента.

Дальнейшее развитие данная теория получила в работах В.В. Бобкова [4]. Автор, указывая на условность пористости геля (~ 28 %), принятую Пауэрсом, выдвигает более эффективный критерий оценки прочности цементного камня – относительную концентрацию плотных продуктов гидратации (объем геля за вычетом гелевых пор) – Φ_0 :

$$\Phi_0 = \frac{V_0}{B/C \cdot 1/c\theta + 1}, \quad (4)$$

где V_0 – коэффициент увеличения объема твердой фазы при гидратации вяжущего;

C – отношение плотностей воды и цементного клинкера;

θ – степень гидратации цемента, определяемая экспериментально.

Приведенный автором диапазон значений V_0 (от $V_0 = 1,77$ в возрасте 1...2 суток до $V_0 = 1,58$ в возрасте 1...3 года), не подтвержден достаточным количеством экспериментальных данных.

Впервые предложенное В. Юнгом [5], а затем развитое в работах И.Н. Ахвердова [6], В.В. Тимашева [7] и др. понятие «микробетона» подразумевает цементный камень, состоящий из негидратированных клинкерных частиц ($m_{кл}$), образующих скелет (основу) пространственной решетки, внутренний объем которой заполнен гелем (m_e) с учетом его пористости, капиллярными порами ($m_{к.п.}$) и вовлеченным воздухом (m_a). При этом единичный объем цементного камня может быть записан в виде:

$$m_e + m_{к.п.} + m_{кл} + m_a = 1. \quad (5)$$

Основываясь на предпосылках, предложенных Росслером и Одлером, Х. Тейлор [1] предлагает математическую модель прочности цементного камня как функцию от его пористости, записанную в виде:

$$R = R_0 (1 - EP), \quad (6)$$

где R – прочность цементного камня на сжатие;

R_0 – прочность цементного камня при нулевой пористости;

P – пористость;

E – константа.

Значения параметров R_0 и E до сих пор являются предметом дискуссий.

В [8,9] предложена математическая модель прочности цементного камня в виде:

где Φ – структурный параметр, определяющий концентрацию твердой фазы в цементном камне;

$E_{н.вкл.}$ – модуль упругости негидратированных включений;

φ_f , φ_E , $K_{св}$, λ_1 – коэффициенты, зависящие от структуры цементного камня;

$m_{св.}$ – объемная концентрация связки (геля, капиллярных пор и вовлеченного воздуха).

Однако сами авторы показывают значительные расхождения между расчетными и опытными прочностями цементного камня на ранних сроках его твердения.

Принимая за основу уравнение (6), в работе [2] показана возможность описания прочности цементного камня следующей зависимостью:

$$f_{ц.к.т} = f_0 \cdot (1 - k \cdot m_{к.п.}^n), \quad (8)$$

где f_0 – прочность цементного камня при нулевой капиллярной пористости;

$m_{к.п.}$ – капиллярная пористость цементного камня;

k и n – константы.

Основываясь на опытных данных, приведенных в [9], и методике расчета капиллярной пористости цементного камня [10], уточненной в [11], в работе [2] были определены следующие значения параметров зависимости (8), которая записана в виде:

$$f_{ц.к.т} = 120 \cdot (1 - 1,34 m_{к.п.}^{0,406}). \quad (9)$$

Коэффициент корреляции значений прочности цементного камня, рассчитанных по (9), с опытными данными составляет 0, 835.

Возможность дальнейшего повышения значения коэффициента корреляции расчетных и опытных характеристик прочности на сжатие цементного камня, очевидно, связана с необходимостью учета влияния объемной концентрации новообразований. Это предположение основывается на представлениях структуры цементного камня в виде микробетона [5,6,7,12], в котором в качестве заполнителя служат негидратированные зерна цемента и микрозаполнителя, а вяжущим являются кристаллогидратные новообразования с гелевой пористостью. Капиллярную пористость образуют не вступившая в гидратацию свободная вода и вовлеченный воздух.

Таблица 1. Экспериментальные составы теста из вяжущего с рассчитанными согласно [14] структурными характеристиками и опытные значения прочности на сжатие цементного камня в возрасте 2 - 28-ми суток

№	B/G вяж.	Добавка, % от массы вяжущего	t, сут.														
			1			2			3			7			28		
			m_e	$m_{к.п.}$	$f_{ц.к.}^{оп}$, МПа	m_e	$m_{к.п.}$	$f_{ц.к.}^{оп}$, МПа	m_e	$m_{к.п.}$	$f_{ц.к.}^{оп}$, МПа	m_e	$m_{к.п.}$	$f_{ц.к.}^{оп}$, МПа	m_e	$m_{к.п.}$	$f_{ц.к.}^{оп}$, МПа
1	0,28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,742	0,061	67,4
2	0,33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,730	0,105	72,4
3	0,38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,703	0,154	61,5
4	0,43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,669	0,203	42,4
5	0,22	ГП-1 (0,2)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,773	0,026	108
6	0,24	ГП-1 (0,2)	0,246	0,317	39,8	0,289	0,294	51,5	0,472	0,199	89,7	0,585	0,140	98,9	0,792	0,034	99,8
7	0,19	ГП-1 (0,3)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,722	0,012	135
8	0,19	ГП-1 (0,3)	0,230	0,276	45,2	0,270	0,255	53,3	0,442	0,165	103	0,547	0,111	103	0,741	0,011	120
9	0,20	ГП-1 (0,3)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,757	0,012	117
10	0,16	ГП-1 (0,4)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,654	0,023	109
11	0,18	ГП-1 (0,4)	0,219	0,266	35,9	0,258	0,246	42	0,422	0,160	112	0,522	0,108	112	0,707	0,013	114
12	0,19	ГП-1 (0,4)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,728	0,012	123
13	0,3	СМ-1 (0,4)	0,213	0,383	23,5	0,316	0,328	36,4	0,396	0,285	51,7	0,578	0,188	74,5	0,758	0,093	100
14	0,33	СМ-1 (0,4)	0,210	0,408	10,9	0,311	0,354	33,2	0,390	0,311	41,1	0,570	0,215	67,2	0,746	0,122	75,9
15	0,36	СМ-1 (0,4)	0,205	0,431	7,87	0,304	0,378	31	0,382	0,337	36,7	0,557	0,243	58,5	0,730	0,152	66,7
16	0,23	СМ-1 (0,6)	0,202	0,329	33,5	0,299	0,277	62	0,376	0,236	67,7	0,548	0,144	75,7	0,718	0,054	92,7
17	0,26	СМ-1 (0,6)	0,206	0,354	21,3	0,305	0,301	53	0,383	0,259	64,4	0,559	0,165	82	0,733	0,074	72,7
18	0,29	СМ-1 (0,6)	0,206	0,380	17,4	0,306	0,327	51,5	0,383	0,285	49,5	0,560	0,191	82,4	0,733	0,099	84,8
19	0,22	СМ-1 (1)	0,185	0,331	39,8	0,274	0,283	65,3	0,289	0,275	65,8	0,501	0,162	86,9	0,657	0,080	93,1
20	0,24	СМ-1 (1)	0,189	0,348	23,4	0,280	0,299	49,4	0,296	0,290	50,2	0,513	0,174	79,3	0,672	0,090	89,3
21	0,26	СМ-1 (1)	0,191	0,365	13,7	0,283	0,315	45,5	0,299	0,307	51,1	0,518	0,190	75	0,679	0,105	93,5
22	0,2	СТ(0,3)	0,212	0,291	50,2	0,286	0,252	58,1	0,300	0,245	52,2	0,466	0,159	77,8	0,485	0,150	86,6
23	0,21	СТ(0,3)	0,217	0,299	55,8	0,292	0,259	59,6	0,306	0,252	60,1	0,476	0,164	84,6	0,495	0,156	95,5
24	0,22	СТ(0,3)	0,220	0,307	48,4	0,297	0,267	55,3	0,312	0,260	56,3	0,484	0,171	88,9	0,504	0,162	103
25	0,235	СТ(0,3) Дн(20)	0,181	0,337	23,1	0,244	0,303	52,5	0,296	0,276	80,5	0,398	0,224	82,3	0,414	0,217	88,2
26	0,217	СТ(0,3) Дн(20)	0,177	0,321	19,3	0,239	0,288	60,4	0,289	0,262	63,2	0,388	0,211	75,6	0,404	0,203	84,6
27	0,228	СТ(0,3) Дн(30)	0,158	0,338	12,5	0,213	0,309	52,3	0,259	0,285	50,7	0,347	0,239	66,3	0,361	0,233	81,5
28	0,21	СТ(0,3) Дн(30)	0,154	0,322	11,4	0,207	0,294	44,8	0,251	0,271	64,1	0,338	0,226	65,5	0,351	0,220	83,4
29	0,195	СТ(0,3) Дн(40)	0,128	0,316	23,7	0,173	0,293	57,7	0,181	0,289	57,4	0,281	0,237	72,1	0,292	0,232	92,5
30	0,177	СТ(0,3) Дн(40)	0,120	0,303	22,2	0,162	0,281	59,8	0,170	0,277	58,4	0,263	0,228	83,7	0,274	0,223	110
31	0,255	СМ-1(1) Дн(20)	0,154	0,372	21,9	0,229	0,332	49,1	0,242	0,325	47,7	0,419	0,230	61	0,549	0,162	80
32	0,236	СМ-1 (1) Дн(20)	0,153	0,356	16,6	0,226	0,317	51,6	0,283	0,286	56,3	0,414	0,216	62,7	0,542	0,148	73,9
33	0,243	СМ-1 (1) Дн(30)	0,135	0,367	26,3	0,200	0,332	45,4	0,251	0,305	38,5	0,366	0,243	52	0,480	0,183	84,4
34	0,225	СМ-1 (1) Дн(30)	0,133	0,351	22,7	0,196	0,317	45,8	0,246	0,290	61,2	0,359	0,230	69,2	0,471	0,171	77,4
35	0,236	СМ-1 (1) Дн(40)	0,116	0,367	11,2	0,171	0,337	32,7	0,215	0,314	42,5	0,314	0,261	55,6	0,411	0,209	62
36	0,218	СМ-1 (1) Дн(40)	0,113	0,351	15,1	0,168	0,322	39,2	0,210	0,299	53,4	0,307	0,248	55,5	0,402	0,197	77,1
37	0,167	ГП-1(0,3) Дн(20)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,559	0,067	82,9
38	0,175	ГП-1(0,3) Дн(20)	0,180	0,272	24,8	0,212	0,255	37,1	0,347	0,185	80,2	0,429	0,142	95,5	0,581	0,064	86,9
39	0,160	ГП-1(0,3) Дн(30)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,498	0,087	90,9
40	0,167	ГП-1(0,3) Дн(30)	0,161	0,270	20,9	0,190	0,255	27,8	0,310	0,193	71,9	0,384	0,155	73,1	0,519	0,086	106
41	0,158	ГП-1(0,3) Дн(40)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,459	0,103	90
42	0,166	ГП-1(0,3) Дн(40)	0,149	0,272	12,1	0,175	0,259	18,3	0,286	0,201	62,2	0,354	0,165	78,6	0,480	0,101	86,5

Гель, в зависимости от объемного содержания в цементном камне, может оказывать различное влияние на его прочностные показатели, которое обуславливается сложным напряженным состоянием геля. При увеличении содержания геля до некоторого предела прочность цементного камня при прочих равных условиях будет возрастать. Дальнейшее увеличение содержания геля будет сопровождаться при неизменной капиллярной пористости снижением прочности на сжатие цементного камня. Эта взаимосвязь действительна при условии, что прочность и модуль упругости непрогидратированных зерен выше соответствующих характеристик геля.

Следовательно, для уточнения корреляционных зависимостей прочности цементного камня следует установить влияние прочности геля. Как было указано в [3], прочность цементного камня при нулевой капиллярной пористости находится в пределах 90 – 130 МПа. Факторы, определяющие количественное изменение прочности геля, нам неизвестны. Между тем, можно утверждать, что кроме минералогического состава вяжущего на прочность геля будет оказывать влияние толщина прослойки адсорбционной физически связанной воды между кристаллами геля. Причем пористость геля, по уточненным данным Х. Тейлора [1], является постоянной и составляет 30 %. Количество адсорбционно связанной воды зависит от удельной поверхности геля и влажности окружающей среды. По данным [13], обобщенным Х. Тейлором [1], это количество для насыщенного состояния можно принять равным 0, 211 от массы новообразований. Эта величина установлена для гидратирующихся масс в отсутствии пластифицирующих химических добавок. Введение в цементное тесто химических добавок, в особенности, поверхностно-активных веществ – супер - и гиперпластификаторов, очевидно, изменит толщину межслоевой воды и, соответственно, относительное количество адсорбционно связанной воды. Это соответственно повлечет изменение прочности геля.

На основе отмеченных предпосылок и целенаправленных экспериментальных исследований представляется возможным получить структурные экспериментально-теоретические модели прочности цементного камня, необходимые для описания зависимостей физико-механических свойств, как цементного камня, так и бетона.

2. Характеристика свойств материалов, методика и результаты экспериментальных исследований. Экспериментальные исследования проводились с использованием следующих материалов:

- цемент – ПЦ 500-Д0 производства ОАО «Красносельскстройматериалы», $K_{нз}=0,268$;
- пластификатор-суперпластификатор СМ-1 (ТУ ВУ100138369.466-2006), гиперпластификаторы ГП-1 (ТУ ВУ 100230600.447-2006), Stachement -2000;
- минеральная добавка – тонкодисперсный доломит, выпускаемый ОАО «Доломит» по ГОСТ 16557-78 «Минеральный порошок для асфальтобетонных смесей. Технические условия», $S_{уд.д}=250 \text{ м}^2/\text{кг}$;
- питьевая вода, соответствующая требованиям СТБ 1114.

В качестве варьируемых факторов при проведении экспериментальных исследований принимались: водовязущее отношение, содержание дисперсного наполнителя, вид и содержание химических добавок.

Водовязущее отношение варьировалось в пределах 0,164-0,43.

Содержание тонкодисперсного наполнителя принималось в количестве 20, 30 и 40% от общей массы цемента и наполнителя.

Относительное содержание и вид пластификаторов, принимались следующими: 0,2, 0,3 и 0,4% для ГП-1; 0,4, 0,6 и 1% - для СМ-1 и 0,3% - для St-2000 от массы вяжущего (цемент + наполнитель), в расчете на сухое вещество.

При определении прочности цементного камня использовались образцы-кубы с размерами 20×20×20 мм.

Образцы размерами 20×20×20 мм изготавливались в металлических формах по 6 образцов. Уплотнение цементных композиций в формах не осуществлялось для составов с РК=15...35%, а для составов с РК менее 15см осуществлялось посредством легкого постукивания о стол 5...10раз. Заформованные образцы до распалубки выдерживались 1 сутки в формах при температуре 20±2°C. После распалубки, но не позднее 2 часов со времени распалубки, образцы устанавливались в камеру нормально-влажностного твердения с температурой 20±2°C и влажностью 95±5%.

Определение прочности осуществлялось в соответствии с ГОСТ 10180-90, скорость загрузки образцов составляла 0,4-0,6МПа/с.

Каждая серия образцов, испытываемых в возрасте 1,2,3,7 и 28суток, содержала от 4 до 6 кубов.

Принятые составы теста из вяжущего с рассчитанными согласно [14] структурными характеристиками и опытными прочностями цементного камня в возрасте 2 - 28-ми суток приведены в таблице 1.

Полученные данные по прочности цементного камня на сжатие в различном возрасте свидетельствуют о высокой эффективности применения пластификаторов нового поколения – гиперпластификатора ГП-1 и Stachement-2000 по сравнению с пластификаторами первой группы эффективности по СТБ 1112, в частности, с СМ-1. Так, например, при водовязущем отношении 0,24 и содержании ГП-1 0,2%, а СМ-1 1% прочность цементного камня в возрасте 28-ми суток составляет 99,8 и 89,3МПа соответственно для добавок ГП-1 и СМ-1, т.е. прочность цементного камня с добавкой ГП-1 на 12% выше прочности с добавкой СМ-1. Этот показатель еще более существенен в раннем возрасте: прочность цементного камня, модифицированного ГП-1 в суточном возрасте превышает аналогичную прочность с СМ-1 на 70%. Этот показатель имеет весьма важное значение для конструкций, возводимых из монолитного бетона, для которых необходимо в короткие сроки достичь распалубочной прочности.

Сравнение показателей прочности цементного камня, модифицированного добавками ГП-1 и Stachement-2000, показывает, что при равных водовязущих отношениях пластификатор ГП-1 обеспечивает увеличение прочности в 28-суточном возрасте на 5...35% при водовязущих отношениях соответственно 0,2 и 0,22. В то же время применение гиперпластификатора Stachement-2000 позволяет увеличить прочность цементного камня в суточном возрасте на 10...15% по сравнению с прочностью цементного камня, модифицированного ГП-1 при равных их относительных содержаниях.

Введение дисперсного наполнителя дополнительно к гиперпластификаторам вызывает при равных водовязущих отношениях, как правило, снижение прочности во все сроки выдерживания цементного камня. Например, при содержании гиперпластификатора ГП-1 0,3% и доломитового дисперсного наполнителя 20% от массы вяжущего прочность цементного камня в суточном и 28-суточном возрасте снижается соответственно на 45 и 31%. Аналогичные показатели при сочетаниях Stachement-2000 и дисперсного наполнителя составляют 150 и 22%. При увеличении дисперсного наполнителя до 30% показатели снижения прочности увеличиваются до 2 раз.

Вместе с тем следует отметить, что совместный ввод ГП-1 и дисперсного наполнителя в количестве, соответственно, 0, и 20% позволяет снизить водопотребность цементного теста на 6% и соответственно уменьшить водовязущее отношение для получения равноподвижных бетонных смесей.

Приведенные выше данные свидетельствуют о том, что водовязущее отношение не может служить единственным критерием прочности цементного камня в различном возрасте при применении различных химических модификаторов и тонкодисперсных минеральных наполнителей. Для ее оценки необходимо дополнительно учитывать влияние структурных характеристик цементного камня, изменяющихся одновременно с введением различных модификаторов цементного камня.

3. Структурная модель прочности на сжатие цементного камня, модифицированного химическими модификаторами и тонкодисперсными наполнителями. На основании принятых предпосылок правомерно записать корреляционную зависимость прочности на сжатие цементного камня в следующем общем виде:

$$f_{ц.к.} = \Phi(m_{к.п.}) \cdot \Phi(m_e), \quad (10)$$

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

$\Phi(m_e)$ – функция, отражающая влияние содержания геля (m_e) в цементном камне.

Функция $\Phi(m_e)$ кроме того должна отражать влияние химических модификаторов и дисперсного наполнителя.

Получение математических выражений двух функций, отражающих влияние основных структурных характеристик цементного камня, представляло определенные трудности, так как невозможно бы-

ло выполнить экспериментальные исследования прочности на сжатие цементного камня, в результате которых представилась бы возможность получить экспериментальные данные при постоянном значении одного из факторов и переменных значениях других факторов. В этой связи был использован метод итерации при графическом и математическом описании искомых функций. В соответствии с ним по экспериментальным данным, полученным при исследовании прочности бездобавочного цементного камня в работе [2], находилась функция $\Phi_{к.п.}$ в виде (9), т.е.:

$$\Phi_{к.п.} = 120 \cdot (1 - 1,34 \cdot m_{к.п.}^{0,406})$$

После чего находилось первое приближение функции $\Phi(m_э)$. Значения функции $\Phi(m_э)$ определялись по следующей зависимости:

$$\Phi_i(m_э) = \frac{f_{ц.к.i}^{оп}}{120 \cdot (1 - 1,34 \cdot m_{к.п.i}^{0,406})}$$

где $f_{ц.к.i}^{оп}$ – опытные значения прочности на сжатие цементного камня конкретного состава при конкретных значениях объемной концентрации геля ($m_э$);

$m_{к.п.i}$ – объемная концентрация капиллярных пор в цементном камне при соответствующих значениях $m_э$.

По графической зависимости функции $\Phi(m_э)$ находились ее математические выражения для ее восходящей и нисходящей ветвей в виде:

$$\Phi_1(m_э) = k_1 \cdot m_э^n, \quad (11)$$

$$\Phi_2(m_э) = 1 + k_2(1 - m_э)^m. \quad (12)$$

Значения экстремума функции находились из равенства

$$\Phi_1(m_э) = \Phi_2(m_э).$$

Второй этап итерации начинался из построения графической зависимости функции $\Phi_{к.п.}$, конкретные значения которой определялись по формулам:

$$\Phi_{к.п.i} = \frac{f_{ц.к.i}^{оп}}{\Phi_{1i}(m_э)}, \text{ при } m_э \leq 0,4;$$

$$\Phi_{к.п.i} = \frac{f_{ц.к.i}^{оп}}{\Phi_{2i}(m_э)}, \text{ при } m_э > 0,4.$$

При этом было установлено, что в наибольшей степени отражает экспериментальные данные функция в виде:

$$\Phi_{2к.п.}(1 - k_2 m_{к.п.}^n). \quad (13)$$

После нескольких этапов итерации было установлено, что функцию $\Phi(m_{к.п.})$ следует находить не в виде (9), которая не позволяет найти значения параметров “ k ” и “ n ”, обеспечивающие получение условия: $f_{ц.к.} = 0$ при $\Phi(m_{к.п.}) = 0$. Более достоверные расчетные значения прочности цементного камня могут быть получены при использовании функции вида:

$$\Phi(m_{к.п.}) = (1 - k m_{к.п.})^n. \quad (14)$$

При этом указанное выше условие $f_{ц.к.} = 0$ при $\Phi(m_{к.п.}) = 0$ может быть обеспечено при следующем равенстве:

$$k \cdot m_{к.п.о} = 1, \quad (15)$$

где $m_{к.п.о}$ – капиллярная пористость свежезатворенного цементного камня, которая зависит от начального водовяжущего отношения и может определяться из зависимости:

$$m_{к.п.о} = \frac{V_э}{V_T} = \frac{\frac{B}{\rho_э}}{\frac{G_{вяж}}{\rho_{вяж}} + \frac{B}{\rho_э}} = \frac{1}{\frac{G_{вяж}}{B} \cdot \frac{\rho_э}{\rho_{вяж}} + 1}, \quad (16)$$

где V_T – объем теста (пасты);

$G_{вяж}$ – масса вяжущего;

B – масса воды;

$\rho_{вяж}, \rho_э$ – соответственно плотность композиционного вяжущего и воды.

При этом содержание воздуха в цементном тесте пренебрегалось.

Масса вяжущего определяется суммой чистоклинкерного (бездобавочного) цемента и минеральных добавок, включая добавки, находящиеся в цементах с минеральными добавками.

Плотность вяжущего должна определяться по формуле:

$$\rho_{вяж} = \frac{\sum_{i=1}^n G_i}{\sum_{i=1}^n \frac{G_i}{\rho_i}}, \quad (17)$$

где G_i – масса отдельных компонентов композиционного вяжущего (клинкерного цемента, минеральных добавок);

ρ_i – их истинные плотности.

Зависимость “ K ”, обозначенная как функция начального водовяжущего отношения Φ_w , записана в виде:

$$\Phi_w = \frac{G_{вяж} \cdot \rho_э}{B \cdot \rho_{вяж}} + 1, \quad (18)$$

где индекс “ W ” означает водовяжущее отношение без учета воды, поглощаемой заполнителем.

В результате последовательных приближений функция $\Phi(m_{к.п.})$ записана в виде:

$$\Phi(m_{к.п.}) = (1 - \Phi_w m_{к.п.})^n, \quad (19)$$

где

$$n = 0,46(3,5 - \Phi_w)^{1,87}. \quad (20)$$

С использованием полученной функции $\Phi(m_{к.п.})$ находились зависимости $\Phi(m_э)$ по значениям, определяемым по формуле:

$$\Phi_{э.i}(m_э) = \frac{f_{ц.к.i}^{оп}}{\Phi_i(m_{к.п.})}. \quad (21)$$

График зависимости $\Phi(m_э)$ с экспериментальными данными, рассчитанными по (21) для цементного камня без дисперсного наполнителя, представлен на рисунке 1. Из приведенных данных следует, что $\Phi(m_э)$ возрастает до максимума, равного в среднем 115 МПа, при значениях $m_{э.экс} = 0,3$. При дальнейшем увеличении относительного содержания геля в цементном камне до 0,8 значение функции может быть принято постоянными, т.е. 115 МПа. Это значение, по-видимому, может характеризовать прочность геля сложившейся структуры после начального этапа гидратации цемента в течение первых двух суток твердения в нормально влажностных условиях.

Обработка полученных данных с использованием математико-статистических методов позволила описать восходящую ветвь функции $\Phi_1(m_э)$ в виде:

$$\Phi_1(m_э) = 626 \cdot m_э^{1,41} \text{ МПа; при } m_э \leq 0,3; \quad (22)$$

$$\Phi_2(m_э) = 115 \text{ МПа, при } 0,8 > m_э > 0,3. \quad (23)$$

Для выявления влияния дисперсного доломитового наполнителя находились значения функции $\Phi(m_э)$ по опытным данным прочности цементного камня, модифицированного различными химическими добавками в сочетании с дисперсным наполнителем. Количество дисперсного наполнителя варьировалось в пределах 0,20...0,40 относительного содержания по массе $r_{д.н.}$, определяемого по формуле:

$$r_{д.н.} = \frac{G_{д.н.}}{G_{д.н.} + U_{д.о}}, \quad (24)$$

где $G_{д.н.}$ – масса дисперсного наполнителя;

$U_{д.о}$ – масса бездобавочного цемента.

Значение функций для различного содержания геля находились по зависимости (21) с использованием функций (18), (19) и (20). Полученные графические зависимости представлены на рисунках 2-4.

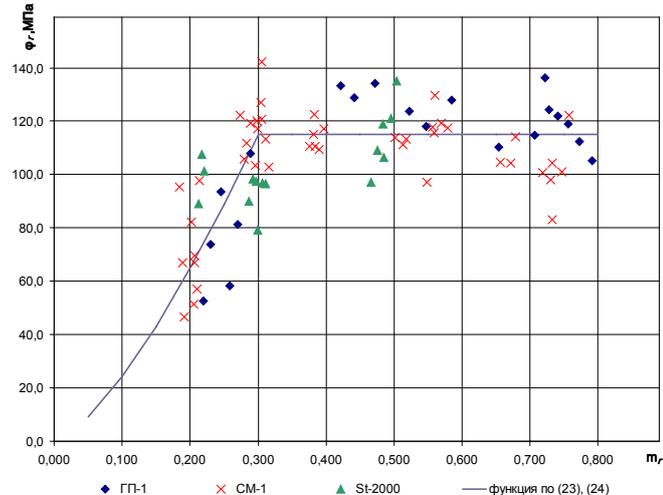


Рис. 1. Графическая зависимость функции $\varphi(m_e)$ для цементного камня, модифицированного химическими добавками без дисперсного наполнителя

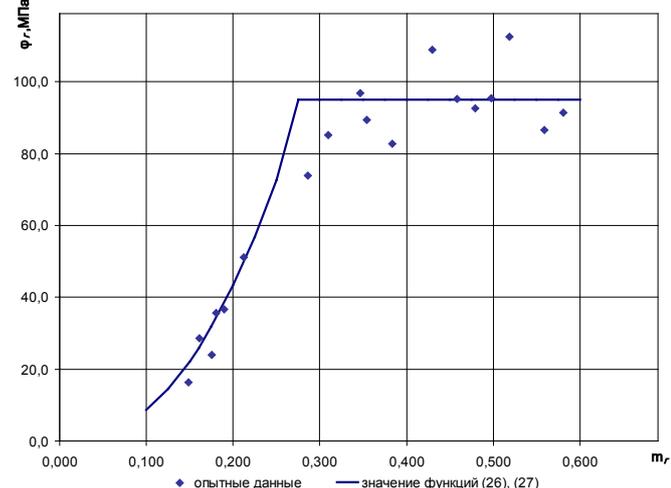


Рис. 2. Графическая зависимость функции $\varphi(m_e)$ для цементного камня, модифицированного добавкой ГП-1 и дисперсным наполнителем

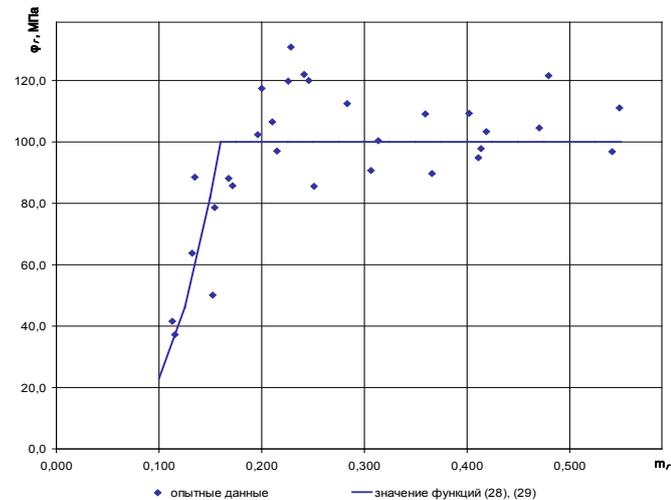


Рис. 3. Графическая зависимость функции $\varphi(m_e)$ для цементного камня, модифицированного добавкой СМ-1 и дисперсным наполнителем

Как следует из рисунков, все графические зависимости по общему виду аналогичны зависимости, полученной для цементного камня, не имеющего дисперсного наполнителя. Они отличаются лишь значениями экстремумов ($m_{e, экс}$, $\varphi_{экс}(m_e)$). Используя математико-статистические методы, были получены искомые функции в следующем виде:

$$\varphi_1^{(ГП-1)+ДН}(m_e) = 1,81 \cdot 10^3 m_e^{2,32}, \text{ МПа; } m_e \leq 0,28; \quad (25)$$

$$\varphi_2^{(ГП-1)+ДН}(m_e) = 95 \text{ МПа, } m_e > 0,28; \quad (26)$$

$$\varphi_1^{(СМ-1)+ДН}(m_e) = 31 \cdot 10^3 m_e^{3,13}, \text{ МПа; } m_e \leq 0,16; \quad (27)$$

$$\varphi_2^{(СМ-1)+ДН}(m_e) = 100 \text{ МПа, } m_e > 0,16; \quad (28)$$

$$\varphi_1^{St+ДН}(m_e) = 16,3 \cdot 10^3 m_e^{3,1}, \text{ МПа; } m_e \leq 0,2; \quad (29)$$

$$\varphi_2^{St+ДН}(m_e) = 110 \text{ МПа, } m_e > 0,2. \quad (30)$$

Соотношения расчетных и опытных значений прочности цементного камня, модифицированного химическими добавками ГП-1, СМ-1 и St-2000 и дисперсным наполнителем, рассчитанные с использованием функций (18), (19), (20), (25)...(30) представлены на рисунке 5. Как следует из приведенных данных, абсолютное большинство отклонений не выходит за пределы $\pm 25\%$, что является вполне удовлетворительным для прогнозирования прочности цементного камня.

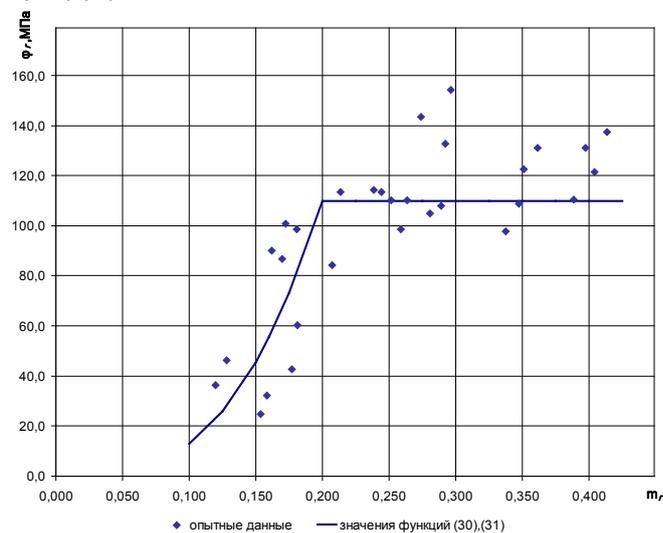


Рис. 4. Графическая зависимость функции $\Phi(m_e)$ для цементного камня, модифицированного добавкой Stachement-2000 и дисперсным наполнителем

Полученные математические модели применяются для определения прогнозируемой прочности цементного камня, твердеющего в нормально-влажностных условиях, в зависимости от наличия исследуемых химических добавок и содержания тонкодисперсного доломитового порошка. Структурные характеристики цементного камня φ_w , m_c , m_e рассчитываются в зависимости от минералогического состава цемента, его плотности и удельной поверхности, начального водовяжущего отношения, вида и содержания химических модификаторов. Следовательно, полученные структурно-механические модели прогнозирования прочности цементного камня учитывают влияние практически всех физико-химических факторов.

Заключение

1. Представлены результаты комплекса экспериментально-теоретических исследований, позволивших установить основные закономерности прочности на сжатие цементного камня, модифицированного химическими модификаторами и тонкодисперсным доломитовым наполнителем.
2. Результаты исследований прочности на сжатие цементного камня в возрасте 1-28-ми суток, модифицированного химическими модификаторами и тонкодисперсным наполнителем, позволили установить, что она зависит от минералогического состава цементного камня.

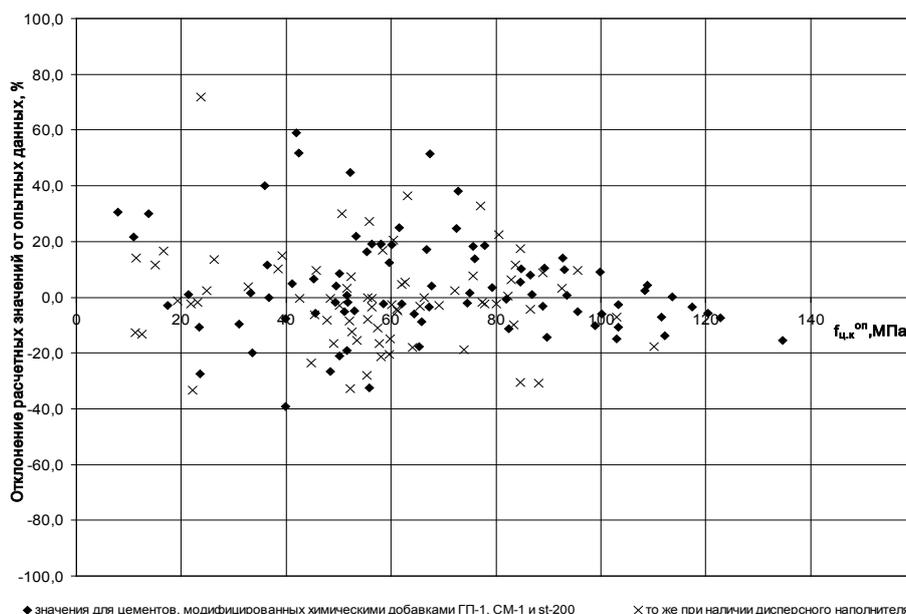


Рис. 5. Отклонения в процентах расчетных значений прочности на сжатие цементного камня от опытных

та, его плотности и удельной поверхности, начального водовязущего отношения, вида и содержания пластификатора и тонкодисперсного наполнителя. Математическая модель прочности цементного камня представлена в виде произведения функций содержания продуктов гидратации вяжущего и капиллярной пористости, которые учитывают влияние вышеперечисленных факторов. Статистические характеристики адекватности расчетных и фактических значений прочности цементного камня свидетельствуют об их удовлетворительной сходимости и о возможности применения полученной модели при прогнозировании прочности цементного камня в возрасте от 1 до 28-ми суток.

- Полученные структурные экспериментально-теоретические модели прочности на сжатие цементного камня, модифицированного химическими добавками - пластификаторами и тонкодисперсными наполнителями, могут быть использованы для определения рациональных композиций бетона, в том числе и самоуплотняющегося, а также для получения инженерных формул для прогнозирования прочности бетона и его деформативных характеристик.
- Результаты экспериментально-теоретических исследований могут быть также использованы при дальнейшем развитии основных положений технологии модифицированного бетона, являющегося наиболее перспективным для современных конструктивных систем зданий и сооружений.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Тейлор Х. Химия цемента / Х.Тейлор. – М.: Мир, 1966. – 560 с.
- Блещик Н.П., Кинетика формирования структуры и прочности самоуплотняющегося бетона / Н.П. Блещик, А.Н. Рак // Строительная наука и техника. – 2006. – №6 (9). – С. 30–41.

- Пауэрс Т.К. Физические свойства цементного теста и камня / Т.К. Пауэрс // Четвертый международный конгресс по химии цемента. – М., 1964. – С. 402–438.
- Бабков В.В. Физико-механические аспекты оптимизации структуры цементных бетонов: автореферат. дис. докт. техн. наук / В.В. Бабков – Л., 1990. – 35 с.
- Юнг В.Н. Микробетон / В.Н. Юнг // Цемент. - 1934. - №7. – С 6–17.
- Ахвердов И.Н. Основы физики бетона / И.Н. Ахвердов. – М.: Стройиздат, 1981. – 461 с.
- Тимашев В.В. Структура цементного камня многолетнего твердения / В.В. Тимашев [и др.] // Избранные труды. Синтез гидратации вяжущих материалов. – М.: Наука, 1986.
- Блещик Н.П. Структурно-механическая модель и прочность цементного камня на сжатие / Н.П. Блещик, М.Н. Рыскин // Проблемы технологии производства строительных материалов, изделий и конструкций, строительства зданий и сооружений. Сборник статей Межвузовской научно-технической конференции. – Ч. 1. – 1998. – С. 44–50.

- Рыскин М.Н. Структурно-механические свойства и технология высокопрочного бетона: дис. канд. техн. наук / М.Н. Рыскин. – Минск, 2002. – 305 с.
- Блещик Н.П., Лазаренко О.В. Структура, температурные деформации и методика ускоренного определения морозостойкости бетона // Инженерные проблемы строительства и эксплуатации сооружений: Сб. трудов под редакцией Д.Н. Лазовского.-Мн.: Технопринт, 2001.-30-35 с.
- Блещик Н.П. К построению расчетной модели усадки цементного камня с позиций физико-химической механики дисперсных систем / Н.П. Блещик, А.Н. Рак, М.Н. Рыскин // Вестник БГТУ, Строительство и архитектура. – 2004. – С. 81–93.
- Юнг В.Н. Основы технологии вяжущих веществ. М.: 1951.
- Powers T.C. and Brownard T.L. Studies of the Physical Properties of Hartland Cement Paste (Bull. 22), 999 pp., Portland Cement Association, Chicago (1948); reprinted from J.Am. Coner. Inst. (proc.) 43, 101, 249, 469, 549, 669, 845, 993, 1947.
- Исследовать реологические, структурные, физико-механические и технологические свойства самоуплотняющихся бетонов, обеспечивающие увеличение производительности труда при укладке бетонной смеси, снижение удельных затрат энергии и стоимости отделочных работ. Разработать и внедрить комплект нормативно-технической документации. Этап 7.06.02. Исследовать физико-механические свойства самоуплотняющихся бетонов./ отчет о НИР. Руководитель Н.П. Блещик. (промежуточный), - 2006. - 120 с.

Материал поступил в редакцию 31.03.08

BLESHCHIK N.P., KOTOV D.S. The durability on compression cement of a stone modified by various chemical modifiers also is thin dispersion on compression

In clause the influence of various chemical modifiers and dispersion on compression on durability on compression of the stone, modified cement is considered(examined). The results of experimental researches of influence of the contents and kind various plastification are given, is thin dispersion on compression and water on kinetics of a set of durability on compression of the stone, modified cement. The analysis and generalization of results of researches were spent with use of the structural approach to an estimation of properties cement of compositions developed the doctor of engineering science, professor N.P. Bleshchik. The mathematical models of durability on compression volumetric of a stone in the age of from 1 about 28 day submitted. Durability of property cement of a stone are described in interrelation with volumetric concentration capillary и products hydration.