

ВЫСОКОПЛОТНЫЙ БЕТОН ИЗ СУХИХ СМЕСЕЙ С ПОВТОРНЫМ ВИБРИРОВАНИЕМ

При производстве изделий, к которым предъявляют повышенные требования по плотности бетона, может быть использован способ, согласно которому предварительно уплотненную сухую бетонную смесь насыщают водой под давлением, а затем повторно виброуплотняют [1].

Пористой средой, через которую жидкость проникает в сухую бетонную смесь, является цемент, а зерна заполнителей оказывают дополнительное сопротивление продвижению жидкости. Если $p_{\text{нас}}$ - давление, при котором происходит фильтрация жидкости сквозь пористую среду, Па; η_d - динамическая вязкость жидкости, Па·с; $\rho_{\text{ж}}$ - плотность жидкости, кг/м³; $m_{\text{э}}$ - эффективная пористость среды и $d_{\text{э}}$ - эффективный диаметр частиц, составляющих полидисперсную среду (в м), то время пропитки $t_{\text{нас}}$ (в мин) слоя сухой бетонной смеси толщиной h выражается зависимостью

$$t_{\text{нас}} = K \frac{h^2 \eta_d}{p_{\text{нас}}} \left(\frac{1 - m_{\text{э}}}{m_{\text{э}}} \right)^2,$$

где $K = \frac{\rho_{\text{ж}}}{60\beta d_{\text{э}}^2}$, β - эмпирический коэффициент, измеряемый в кг/м³. Установлено, что для цемента и сухих смесей на его основе $\beta = 2,85$ кг/м³.

Приняв плотность воды за величину постоянную и приравняв $d_{\text{э}}$ эффективный диаметр частиц цемента 23 мкм [2], после подстановки получим, что $K = 10,87 \times 10^{10}$. При насыщении сухой бетонной смеси растворами химических добавок следует учитывать изменение η_d и $\rho_{\text{ж}}$.

Эффективная пористость $m_{\text{э}}$ характеризует поровое пространство уплотненного цемента, через которое фильтрует жидкость. При смачивании зерен твердой фазы водой и образовании адсорбционных слоев жидкости со свойствами, присущими псевдотвердым телам, сечения поровых каналов уменьшаются [3]. При истинной пористости $m_{\text{и}}$, определяемой в зависимости от состава сухой бетонной смеси по формуле

$$m_{\text{и}} = 1 - \frac{\Pi}{\left[1 - \left(\frac{\Pi}{\delta_{\text{э.п}}} + \frac{\text{Ш}}{\gamma_{\text{э.щ}}} \right) \right] \rho_{\text{ц}}},$$

эффективная пористость может быть определена по зависимости

$$m_{\text{э}} = 1,0456(m_{\text{и}} - 0,0456),$$

где Ц, П, Щ – расходы цемента, песка и щебня в кг; $\rho_{\text{ц}}$, $\gamma_{\text{з.п}}$, $\gamma_{\text{з.щ}}$ – плотность цемента, объемные массы зерен песка и щебня в кг/м³.

Степень уплотнения сухой бетонной смеси зависит от соотношения составляющих, режима вибровоздействия, толщины уплотняемого слоя. Зависимость уплотняемости сухой смеси от содержания цемента (а), песка (б) и щебня (в) показана на рис. 1. По этим данным можно выделить оптимальные расходы: цемента – 330–370 кг, песка – 770–860 кг и щебня – 1150–1250 кг, что соответствует объемному содержанию его 0,7–0,75 м³ в единице объема бетона.

Изменяя время вибрирования $t_{\text{в}}$ и величину пригруза $P_{\text{пр}}$, определяем, что оптимальный режим вибровоздействия зависит от крупности зерен заполнителя и составляет для цементно-песчаной смеси: $t_{\text{в}} = 30$ с и $P_{\text{пр}} = 0,01$ МПа, что коррелируется с данными [4], для смеси со щебнем крупностью 3–10 мм: $t_{\text{в}} = 40$ –45 с и $P_{\text{пр}} = 0,015$ МПа и для смеси со щебнем крупностью 5–20 мм: $t_{\text{в}} = 50$ –60 с и $P_{\text{пр}} = 0,02$ МПа.

Влияние толщины уплотняемого слоя сухой смеси на однородность бетона определяли путем укладки смеси в один прием и послойно в форму с размерами в плане 10х10 см и вы-

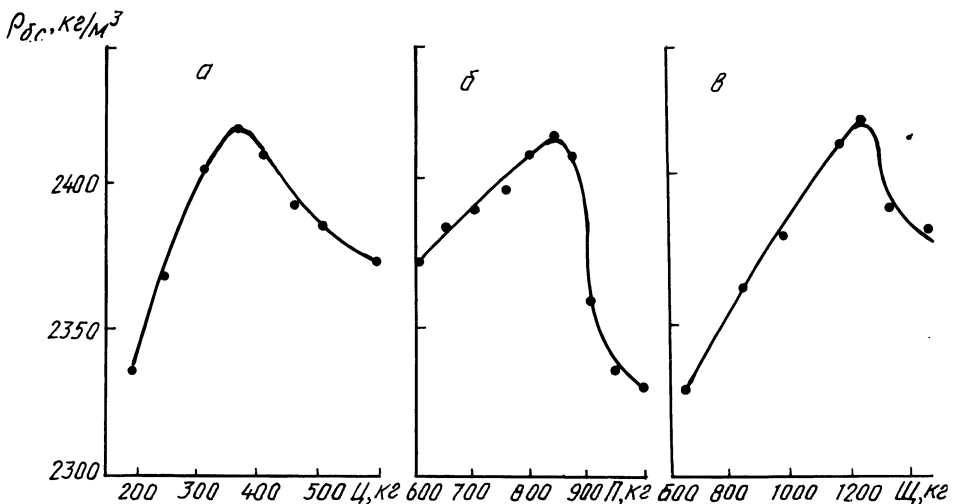


Рис. 1. Влияние расхода составляющих на уплотняемость сухой бетонной смеси.

сотой 40 см. Оценка однородности бетона по изменению скорости распространения ультразвукового импульса, общей плотности, прочности на растяжение и сжатие показала, что сухую смесь следует укладывать слоями толщиной не более 10 см. В этом случае разброс значений скорости ультразвука не превышает 3%, а прочности – 5%; при толщине слоя сухой смеси 20 и 40 см разброс данных составляет соответственно 6 и 10%; 10 и 28%.

Кинетику водонасыщения уплотненной сухой бетонной смеси исследовали по следующей методике. Сухую смесь, составы которой приведены в табл. 1, послойно укладывали в форму размерами 10х10х40 см; на одной стенке формы через 5 см располагали датчики с контактами, обращенными к центру образца. Датчики подключали к потенциометру и по изменению электросопротивления бетонной смеси фиксировали кинетику пропитки. Воду под давлением подавали в смесь сверху; давление контролировали по манометру, поддерживая его при помощи насоса.

На рис. 2 сплошными линиями показаны значения $t_{\text{нас}}$, вычисленные по формуле (1), а точками нанесены экспериментальные данные, согласно которым при $P_{\text{нас}} = \text{const}$ и увеличении h в 2 раза $t_{\text{нас}}$ возрастает в 4 раза; при $h = \text{const}$ время $t_{\text{нас}}$ сокращается во столько раз, во сколько раз увеличивается $P_{\text{нас}}$.

Известно, что с увеличением температуры жидкой фазы $\eta_{\text{д}}$ снижается, вследствие чего ускоряется пропитка водой сухой бетонной смеси. При устранении теплообмена между ними – соблюдении условия: $t_{\text{смеси}}^{\circ} = t_{\text{ж}}^{\circ}$ и постоянном $P_{\text{нас}}$ – достигается линейная зависимость между $t_{\text{нас}}$ и $\eta_{\text{д}}$. Например:

$$\frac{\eta_{\text{д}}(t^{\circ} = 10^{\circ}\text{C})}{\eta_{\text{д}}(t^{\circ} = 40^{\circ}\text{C})} = \frac{0,0013252}{0,0006643} \approx 2,$$

в связи с этим (при $h = \text{const}$) время $t_{\text{нас}}$ возрастает при $t^{\circ} = 10^{\circ}\text{C}$ в 2 раза по сравнению с $t^{\circ} = 40^{\circ}\text{C}$.

Согласно экспериментальным данным (рис. 1), при $h = \text{const}$ и $P_{\text{нас}} = \text{const}$ приведенные в табл. 1 составы бетона располагаются в порядке возрастания $t_{\text{нас}}$ следующим образом: № 2, 4, 1 и затем № 3, что соотносится с порядком снижения значений эффективной пористости смеси $m_{\text{э}}$: 0,473; 0,460; 0,388 и 0,379. Такая взаимосвязь характерна для всей гаммы значений h и $P_{\text{нас}}$ независимо от состава сухой бетонной смеси.

Насыщение водой без избыточного давления способствует разрыхлению уплотненной сухой бетонной смеси вследствие

Таблица 1

Характеристики составов сухой бетонной смеси

Шифр со- ста- ва	Расход материалов на 1 м ³ бетона, кг			Средняя плотность сухой смеси $\gamma_{\text{кг/м}^3}$	Пористость уплотнен- ной сухой смеси	
	Цемент волковьевский $R_{\text{ц}} = 35,0$ МПа $K_{\text{нг}} = 0,28$ $\rho_{\text{ц}} = 3100$ кг/м ³	Песок заславльский $M_{\text{к}} = 2,61$ $\gamma_{\text{з.п}} = 2650$ кг/м ³	Щебень микашевичский фр. 5-20 мм $\gamma_{\text{з.щ}} = 2700$ кг/м ³		истинная $m_{\text{и}}$	эффективная $m_{\text{э}}$
	1	1812	-	-		
2	504	1792	-	2296	0,495	0,473
3	508	662	1270	2440	0,406	0,379
4	364	808	1262	2434	0,488	0,460

Таблица 2

Действие химических добавок на прочность бетона

Расход добав- ки, %	Прочность бетона при сжатии, МПа											
	1 сут			3 сут			7 сут			28 сут		
	CaCl ₂	ННХК	Na ₂ SO ₄	CaCl ₂	ННХК	Na ₂ SO ₄	CaCl ₂	ННХК	Na ₂ SO ₄	CaCl ₂	ННХК	Na ₂ SO ₄
0		26,0			53,0			66,0			75,5	
0,5	33,6	32,0	29,0	54,5	54,0	53,4	69,8	68,5	67,1	79,5	77,6	76,0
1,0	37,0	35,0	33,8	56,6	56,2	55,5	72,5	70,2	67,7	83,5	81,4	78,5
2,0	38,5	36,6	35,0	59,2	57,8	57,2	73,0	71,8	69,8	78,4	78,0	80,6
3,0	39,5	38,3	37,4	62,8	61,6	60,0	71,0	70,0	69,2	74,0	73,3	76,0
5,0	43,3	42,0	39,6	58,4	58,5	62,4	66,7	67,5	67,1	69,7	70,4	71,5

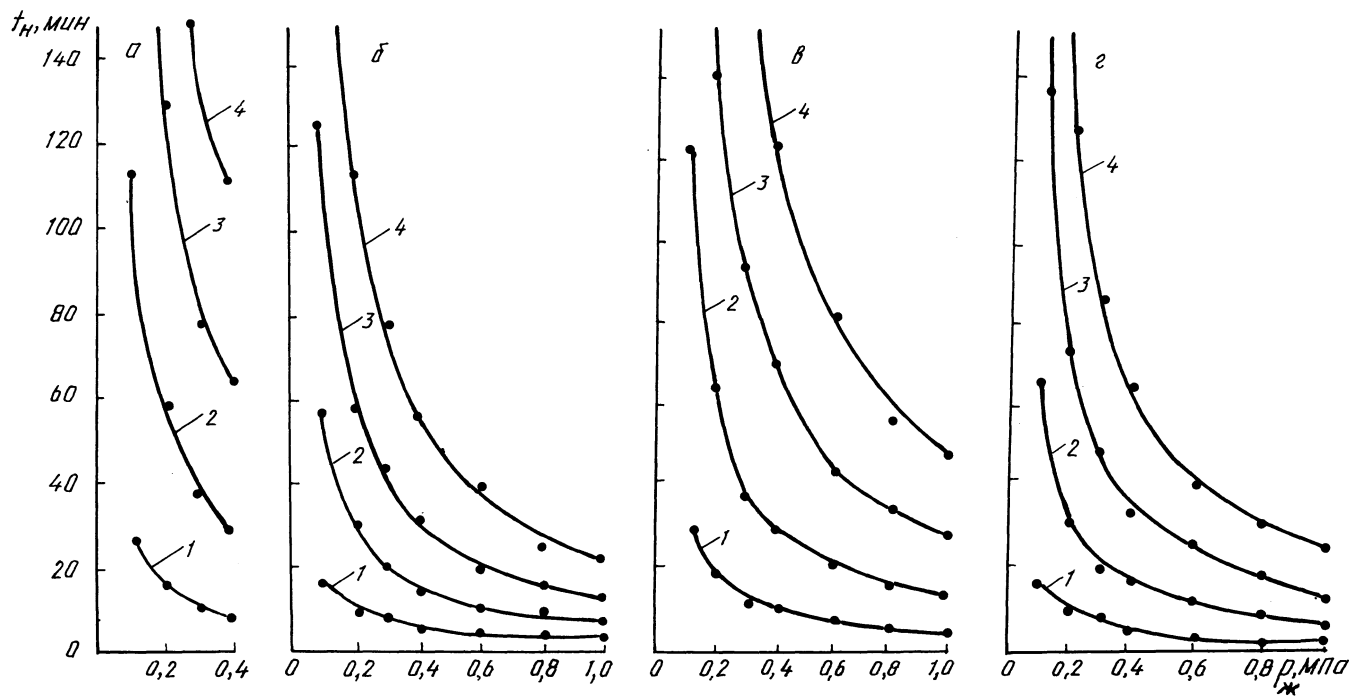


Рис. 2. Влияние давления $p_{\text{ж}}$ на время водонасыщения t_H :
 а — цемента; б, в, г — сухой бетонной смеси составов № 2,3,4 при толщине слоя: 1 — 10 см; 2 — 20 см; 3 — 30 см; 4 — 40 см.

расклинивающего действия тонких пленок жидкости [5]. Подаваемая под давлением вода образует в цементе фильтрационные каналы и этим ослабляет зоны контактов цементного камня с зернами заполнителя. Устранить эти структурные дефекты позволяет повторное виброуплотнение после водонасыщения сухой бетонной смеси. Вызываемое им разжижение цементного геля способствует также более равномерному распределению жидкости, дезагрегации цементных флюкул и отжатию из бетонной смеси 3–5% поглощенной воды. В результате существенно повышается плотность и прочность бетона. Например, водонепроницаемость бетона возрастает с 0,4 до 2 МПа, водопоглощение по массе снижается с 2,6 до 1,4%, а по объему – с 6,4 до 3,5%, скорость прохождения ультразвукового импульса увеличивается с 4,6 до 5,15 км/с и на 25–30% возрастает прочность бетона.

При испытании на морозостойкость по стандартной методике бетон, который подвергали повторной вибрации, выдержал 700 циклов попеременного замораживания и оттаивания при снижении прочности на 3–4%. Прочность же бетона одноразового уплотнения снизилась на 15% через 400 циклов.

При испытании на коррозионную стойкость бетона путем попеременного его насыщения в растворе Na_2SO_4 (плотность $\rho = 1,143 \text{ т/м}^3$) и высушивания при $t = 80\text{--}85^\circ\text{C}$ образцы, подвергнутые повторному вибрированию, снизили прочность на 25% через 65 циклов, а не вибрированные повторно – через 30 циклов. Контрольные образцы бетона насыщали водой и высушивали при той же температуре.

С целью ускорения процесса твердения сухие образцы бетона насыщали водными растворами CaCl_2 , NH_4Cl и Na_2SO_4 , концентрация которых соответствовала 0,5, 1, 2, 3 и 5% от массы цемента; температура раствора была 18–20°C.

Полученные результаты (табл. 2) свидетельствуют о том, что прочность бетона в различные сроки твердения неоднородно зависит от расхода химической добавки. Например, в суточном возрасте она тем выше, чем больше введено добавки, но уже к 3-м сут твердения образцы бетона при 5% добавки, содержащей ионы хлора, показали меньшую прочность, чем при расходе 3% добавки. В более поздние сроки твердения бетона оптимум расхода добавки снижается и к 28-м сут составляет 1% от массы цемента. В случае использования Na_2SO_4 эта тенденция сохраняется.

При сухом бетонировании заполнителя необходимо предварительно высушивать. В связи с этим тепло, которое они ак-

кумулятивуют, может быть использовано для разогрева бетонной смеси. Достижимая при этом эффективность иллюстрируется экспериментальными данными, приведенными в табл. 3. Над чертой показана прочность бетона без химической добавки, под чертой – с добавкой 1% CaCl_2 . Свежеотформованные образцы из разогретой смеси укрывали влагоизолирующей пленкой и оставляли в помещении при $t^0 = 20^0\text{C}$ до момента испытаний.

С увеличением температуры разогрева смеси до 80^0C темп набора прочности бетона возрастает, при этом относительный прирост прочности у бетона, содержащего химическую добавку, выше, чем без нее. Прочность бетона с добавкой к 12 ч твердения достигает более 20 МПа, а в суточном возрасте – близка к 40 МПа. Это позволяет исключить тепловлажностную обработку, так как структурная прочность свежеотформованной

Таблица 3

Влияние разогрева сухой смеси на прочность бетона в раннем возрасте

Возраст бетона, ч	Прочность бетона (в МПа) при температуре разогрева смеси, ^0C			
	20	40	60	80
0*	1,8/1,9	1,8/1,8	1,9/1,9	1,9/2,0
1	2,2/2,2	2,3/2,6	2,5/2,8	2,5/2,8
3	2,6/3,1	2,8/5,8	2,9/6,3	3,2/6,6
6	4,0/7,5	5,1/9,4	5,8/11,0	6,0/12,4
8	6,5/10,2	7,2/12,7	7,7/15,6	7,9/15,9
12	11,0/24,0	13,5/25,6	14,0/28,8	15,2/29,0
16	16,2/28,5	16,9/32,3	18,0/34,1	19,4/33,5
20	23,0/34,0	24,2/35,0	25,5/37,6	26,8/38,4
24	26,0/37,0	28,6/38,3	29,2/39,5	32,4/42,7

* Немедленно после повторного виброуплотнения.

Таблица 4

Изменение прочности бетона при разогреве сухой смеси

Температура разогрева, ^0C	Прочность бетона при сжатии, МПа			
	1 сут	3 сут	7 сут	28 сут
20	26,7/26,0	52,2/53,0	66,7/66,0	76,2/75,5
40	28,0/28,6	54,0/54,8	65,5/67,1	75,6/76,4
60	28,6/29,3	55,0/56,2	63,5/68,2	72,4/77,8
80	24,8/32,4	51,7/56,0	56,8/66,9	60,7/74,0

бетонной смеси составляет $\sim 1,8$ МПа, изделия можно немедленно распалубивать.

Предварительный разогрев сухой смеси позволяет ускорить набор прочности в раннем возрасте, однако в 28 сут разница в прочности "холодного" и "горячего" бетона незначительна. В табл. 4 над чертой показана прочность бетона при немедленной распалубке образцов, под чертой—при распалубке через 24 ч твердения под влагоизолирующей пленкой. При начальной температуре смеси до 40°C немедленная распалубка не влияет на конечную прочность бетона; при разогреве до 60°C намечается снижение прочности бетона, прогрессирующее с дальнейшим повышением температуры разогрева. Из приведенного следует, что степень предварительного разогрева сухой смеси определяют условия твердения бетона: при немедленной распалубке изделий температура разогрева не должна превышать 50°C ; при обеспечении влагоизоляции поверхности бетона можно использовать разогрев до 80°C .

При разогреве сухой бетонной смеси возрастает водопотребность цемента [6] и снижается количество отжимаемой воды в процессе повторного виброуплотнения. Однако в этом случае интенсифицируется процесс гидратации цемента и прочность "горячего" бетона не снижается.

Таким образом, предварительный разогрев сухой бетонной смеси и введение в нее ускорителей твердения решает проблему беспропарочной технологии производства бетонных и железобетонных изделий при сопутствующем экономическом эффекте.

Л и т е р а т у р а

1. А.с. 846271 (СССР). Способ изготовления бетонных и железобетонных изделий / И.Н. Ахвердов, Э.И. Батяновский. — Опул. в Б.И., 1981, № 26. 2. Ахвердов И.Н. Железобетонные напорные центрифугированные трубы. — М.: Стройиздат, 1967, с. 65. 3. Лейбензон Л.С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. — М. — Л.: Гостехиздат, 1947, с. 11–69. 4. Хуторцов Г.М. Песчаный бетон, изготовленный методом сухого бетоноирования. — В сб.: Технология переработки, физико-химические и структурно-механические свойства дисперсных материалов. — М.: Стройиздат, 1973, с. 252–262. 5. Хуторцов Г.М., Михайлов Н.В., Ребиндер П.А. Оптимальной структуре бетона и условиях ее формирования. — Докл. АН СССР, 1965, т. 170, № 3, с. 648–651. 6. Серова Л.П., Михановский Д.С., Шварцман П.И. Влияние водопотребности горячих смесей на прочность бетона. — Бетон и железобетон, 1978, № 1, с. 35–37.