

УДК 666.97.033.16

И. Н. АХВЕРДОВ, д-р техн. наук, проф., Э. И. БАТЯНОВСКИЙ, инж.  
(Белорусский политехнический ин-т)

## Особенности изготовления изделий из водонасыщенных сухих смесей с повторным виброуплотнением

Для производства бетонных и железобетонных изделий может быть применен способ, при котором предварительно уплотненную вибрированием сухую смесь цемента и заполнителей насыщают под давлением водой, а затем повторно виброуплотняют\*. В результате достигается высокая плотность и прочность бетона.

Определяющим технологическим параметром формирования изделий из сухой смеси является скорость водонасыщения, от которой зависит производительность способа. Водонасыщение сухой бетонной смеси, являющейся капиллярно-пористой средой, можно интерпретировать известными закономерностями из теории фильтрации жидкостей и газов через пористые среды. Наиболее типичная среда — глина, для которой предложены эмпирические зависимости, отличающиеся от линейного закона Дарси [1].

Поскольку эффективные сечения пор сухой бетонной смеси зависят от степени ее уплотнения, провели исследования для оценки режимов вибровоздействия и величины пригруза, а также состава смеси на ее фильтрационные свойства. В экспериментах использовали портландцемент  $R_{ц} = 35$  МПа,  $K_{н.г} = 0,28$ ,  $\rho_{ц} = 3100$  кг/м<sup>3</sup>; щебень гранитный прочностью 80 МПа, крупностью 5—20 мм; песок с удельной поверхностью 5100 м<sup>2</sup>/т.

Сухую смесь в формах размером 10×10×10 см уплотняли в течение

60 с вибрированием с частотой 50 Гц и амплитудой 0,5 мм при величине пригруза 0,01 МПа. В качестве критерия уплотняемости служила величина объемной массы смеси. Методика эксперимента заключалась в определении влияния составляющих на изменение объемной массы бетонной смеси. В первой серии опытов изменяли расход цемента и песка таким образом, чтобы их суммарный объем оставался постоянным, расход щебня при этом составлял 1250 кг. Во второй серии изменяли соотношение между песком и щебнем при  $C = \text{const}$ . В третьей серии варьировали расход всех составляющих при постоянном соотношении в сухой бетонной смеси цемента и песка. На рис. 1 показано влияние расхода составляющих на уплотняемость сухой бетонной смеси. Оптимальный расход цемента составлял 330—370 кг, песка 800—860 кг, щебня 1150—1250 кг, что при объемной массе в виброуплотненном состоянии ( $\gamma_{щ}^в = 1640$  кг/м<sup>3</sup>) соответствует объемному содержанию 0,7—0,75 м<sup>3</sup> в 1 м<sup>3</sup> сухой смеси.

Кинетику водонасыщения исследовали на оптимальных составах бетона, который уплотняли послойным вибрированием в формах размером 10×10×40 см. И в этом случае критерием уплотнения служила объемная масса смеси, равная для цементно-песчаной композиции 2300 кг/м<sup>3</sup>, а со щебнем крупностью 5—20 мм — 2430 кг/м<sup>3</sup>. Перфорированное днище формы допускало отвод воздуха из смеси при ее водонасыщении сверху. На одну из стенок формы через 5 см наклеивали датчики с контактами, выпущенными внутрь формы. Датчики

подключали к потенциометру, что позволило по изменению электрического сопротивления фиксировать насыщение смеси водой. Полученные при температуре воды 18—20°C результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Давление жидкости, МПа	Время водонасыщения сухой бетонной смеси, мин, при высоте слоя, см			
	10	20	30	40
0,1	15/13*	64,5/55	135,5/127	252/227
0,2	7/6,7	31,5/29,5	72,5/60	128,5/115
0,3	5/4,5	18/17,5	48/43,5	86,5/75
0,4	3,6/3,3	15/12,5	33,5/31,5	65/57
0,6	2,5/2,2	11/8,5	23,5/18,5	38,5/38
0,8	1,8/1,6	7/7	16,5/14,5	29,5/26,5
1	1,25/1	5,5/5	12,5/11,8	22/21

\* Перед чертой — время водонасыщения трехкомпонентной сухой смеси состава, кг:  $C=360$ ,  $Щ=1262$ ,  $П=808$ ; после черты — цементно-песчаной смеси состава, кг:  $C=504$ ,  $П=1796$ .

Из табл. 1 следует, что жидкость при насыщении сухой бетонной смеси фильтрует через поровые каналы, образованные цементными частицами, при этом время  $t_{нас}$ , в течение которого сухая бетонная смесь с эффективной пористостью  $m_3$  и высотой слоя  $h$  насыщается водой под давлением  $P_{нас}$ , выражается зависимостью:

$$t_{нас} = K \frac{h^2 \mu_d}{P_{нас}} \left( \frac{1 - m_3}{m_3} \right)^2; \quad (1)$$

$$K = \frac{\rho_{ж}}{60 \beta d_3^2}; \quad (2)$$

где

$\rho_{ж}$  — плотность воды, Н/м<sup>3</sup>;  $\beta$  — коэффициент, Н/м<sup>3</sup>;  $d_3$  — эффективный диаметр зерен цемента;  $d_3 = 23$  мкм [2]. По формуле (2)  $K = 10,87 \cdot 10^{10}$ . При насыщении сухой бетонной смеси водными растворами химических добавок следует учитывать изменение  $\rho_{ж}$  и  $\mu_d$ .

Графическое изображение фильтрационных закономерностей, определенных по формуле (1) и экспериментально, приведено на рис. 2. При постоянной температуре жидкой фазы ( $t_{ж} = 20^\circ\text{C}$ ) время закономерно убывает с увеличением  $P_{нас}$ . Температура жидкой фазы оказывает существенное влияние на скорость насыщения сухой смеси —

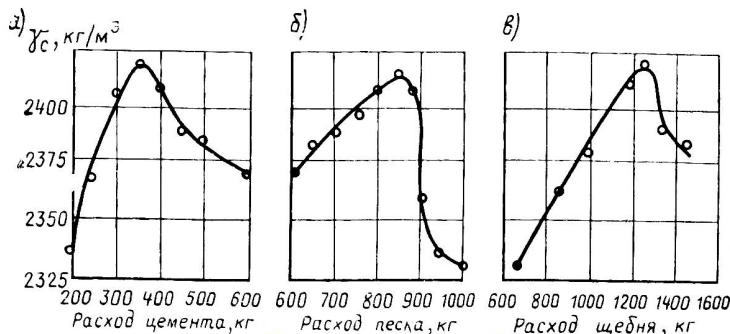


Рис. 1. Влияние расхода цемента (а), песка (б) и щебня (в) на уплотняемость сухой бетонной смеси

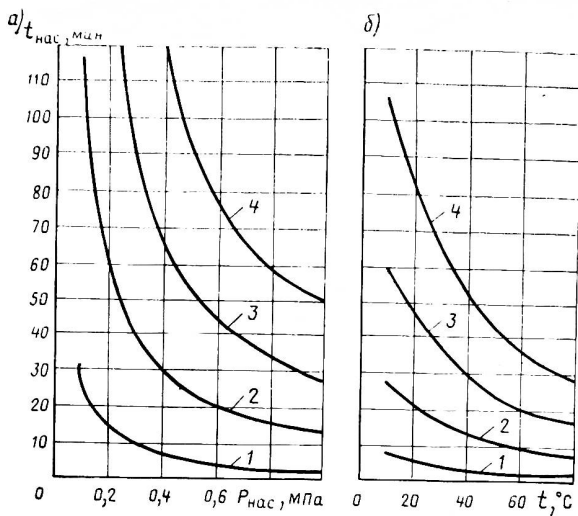


Рис. 2. Влияние давления (а) и температуры (б) на продолжительность водонасыщения смеси

Состав бетона, кг: Ц=508, П=662, Ш=1270 (а); Ц=360, П=808, Ш=1262 (б); 1—h=10 см; 2—h=20 см; 3—h=30 см; 4—h=40 см

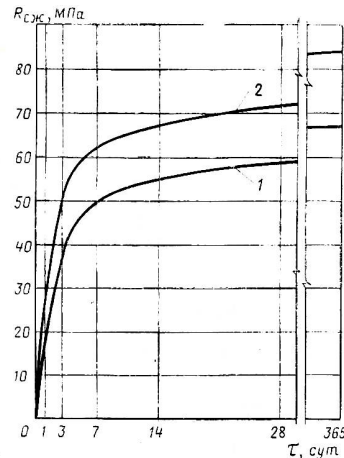


Рис. 3. Влияние повторного виброуплотнения на прочность бетона при сжатии

1 — однократное; 2 — повторное

при  $P_{нас} = 0,3$  МПа с возрастанием  $t_{ж}$  снижается вязкость жидкости и значительно уменьшается  $t_{нас}$ . Следует отметить, что при  $t_{см} = t_{ж}$  между  $\mu_d$  и  $t_{нас}$  устанавливается зависимость:

$$\frac{\mu_d^{10^\circ\text{C}}}{\mu_d^{40^\circ\text{C}}} = \frac{0,0013252}{0,0006643} \approx 2,$$

и при прочих равных условиях по сравнению с  $t_{ж} = 40^\circ\text{C}$  жидкая фаза с температурой  $10^\circ\text{C}$  в 2 раза медленнее насыщает сухую смесь.

Эффективная пористость  $m_3$  соответствует поровому пространству, через которое проникает жидкая фаза в объем, занимаемый цементом в бетонной смеси. При истинной пористости  $m_n$ , определяемой в зависимости от состава сухой бетонной смеси по формуле

$$m_n = 1 - \frac{C}{\left[ 1 - \left( \frac{P}{\gamma_p^3} + \frac{Ш}{\gamma_{ш}^3} \right) \right] \rho_c}, \quad (3)$$

эффективную пористость  $m_3$  подсчитывают из выражения

$$m_3 = 1,456 (m_n - 0,456),$$

где  $\gamma_p^3$  и  $\gamma_{ш}^3$  — объемная масса зерен песка и щебня, кг/м<sup>3</sup>.

Исследованиями [3] установлено, что в процессе насыщения водой происходит разрыхление первоначально виброуплотненной сухой бетонной смеси пленками жидкости, образующимися на поверхности зерен твердой фазы. При нагнетании воды под давлением в цементе возникает сеть поровых каналов и ослабляется сцепление цементного камня с заполнителем. Для устранения этих структурных дефектов целесообразно повторное виброуплотнение после водонасыщения сухой бетонной смеси (табл. 2, рис. 3).

Водонепроницаемость и скорость рас-

Таблица 2

В/Ц	Виброуплотнение смеси	Характеристики бетона		
		водонепроницаемость при давлении, МПа	скорость ультразвука, км/с	водопоглощение, %
0,29	Однократное	0,2	4,1	2,6/6,4*
0,275	Повторное	1	4,7	1,4/3,5

\* Перед чертой по массе; после черты — по объему. Состав бетона, кг: Ц=360, П=810, Ш=1260.

пространения ультразвука определяли на образцах-цилиндрах диаметром и высотой 15 см. Водопоглощение и прочность бетона получены на образцах-кубах с ребром 10 см, изготовленных по следующей методике: сухую смесь уплотняли вибрированием с частотой 50 Гц и амплитудой 0,5 мм под пригрузом 0,025 МПа в течение 60 с. Затем ее насыщали водой под давлением 0,3 МПа без фиксации объема смеси в форме прижимной крышкой и повторно вибрировали еще 60 с под таким же пригрузом, так как при его отсутствии структура бетона может разуплотниться.

Повторное виброуплотнение способствует проявлению качественных изменений в структуре цементного камня — водопоглощение снижается более чем на 45%, скорость ультразвука увеличивается на 15% и скачкообразно возрастает водонепроницаемость бетона. Из рис. 3 видно, что прирост прочности бетона составил в возрасте 1 сут — 7, 3 сут — 11, 28 сут — 13, 1 года — 17 МПа, что составляет 38, 28, 22 и 25% прочности образцов при однократном виброуплотнении.

При повторном вибрировании возникает эффект тиксотропии, устраняю-

щий структурные дефекты от фильтрации насыщающей жидкости, способствует дезагрегации цементных флюкул, образующихся при хранении вяжущего и уплотнении сухой смеси, и перераспределению жидкой фазы. При этом отжимается 3—5% поглощенной воды, что вызывает дополнительное уплотнение цементного камня и бетона. Низкое начальное водосодержание и высокая плотность упаковки зерен твердой фазы позволяют получать бетон прочностью 70—80 МПа на рядовых портландцементях при расходе вяжущего значительно меньше нормативного.

Метод сухого бетонирования весьма перспективен для производства железобетонных изделий. В настоящее время на Случком сельском строительном комбинате проводятся подготовительные работы для внедрения предложенного способа при изготовлении железобетонных решеток полов животноводческих помещений. При этом достигается некоторое снижение расхода цемента и устранение ТВО.

## Выводы

Установлен оптимальный расход составляющих бетона. Повторное виброуплотнение способствует существенному увеличению прочности и структурной плотности бетона. Получена общая зависимость, по которой для каждого состава сухого бетона можно рассчитать глубину и время насыщения его жидкой фазой (водой или растворами химических добавок).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лейбензон Л. С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. М.—Л. Гостехиздат, 1947.
2. Волженский А. В., Бузов Ю. С., Колокольников В. С. Минеральные вяжущие вещества. М., Стройиздат, 1979.
3. Хуторцов Г. М. Новый способ получения высокоплотных бетонов. — Бетон и железобетон, 1971, № 4.