

УДК 666.9.015.42.620.170

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

И. К. ШЕЛОМОВ, Э. И. ДИЗЕР, В. И. НИКИТИНСКИЙ

**О СВЯЗИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ТВЕРДЕЮЩЕГО ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ СО СТЕПЕНЬЮ
ГИДРАТАЦИИ ВЯЖУЩЕГО**

(Представлено академиком С. И. Вольфовичем 2 II 1972)

В настоящей работе устанавливаются функциональные зависимости между физико-механическими характеристиками твердеющего цементного камня и степенью гидратации вяжущего вещества.

Пусть к моменту времени t в единице объема системы портландцемент — вода образовалось x частиц гидрата*, суммарная сила взаимодействия между которыми равна F . Если за f_0 принять среднюю силу взаимодействия между двумя частицами, то для силы взаимодействия f рассматриваемой частицы с n другими, составляющими ее ближайшее окружение и занимающими объем φ , можно записать $f = x\varphi f_0$.

Сила взаимодействия f_1 рассматриваемой частицы с единицей объема φ равна $f_1 = f/\varphi = x f_0$.

Так как в единице объема φ содержится x частиц, а сила взаимодействия между ними учитывается дважды, то суммарная сила взаимодействия F всех частиц в единице объема системы определится из равенства

$$F = f_0 x^2 / 2. \quad (1)$$

Очевидно, предел прочности R системы должен быть прямо пропорционален величине F

$$R = kF = k f_0 x^2 = k_R x^2, \quad (2)$$

где k и k_R — константы.

При $t \rightarrow \infty$ $x \rightarrow a$, $R \rightarrow R_{\max}$ и $k_R = R_{\max}/a^2$, где a — максимальное количество частиц гидрата, которое может образоваться в системе при $t \rightarrow \infty$, пропорциональное количеству химически связанной воды; R_{\max} — максимальное значение прочности при $t \rightarrow \infty$.

Результаты экспериментальной проверки уравнения (2) представлены на рис. 1. Обозначая $R/R_{\max} = r$ и $x/a = \alpha$, уравнение (2) можно записать в критериальной форме

$$r = \alpha^2.$$

Работу A образования структуры можно рассчитать по формуле

$$A = \int F dl, \quad (3)$$

где dl — среднее изменение расстояния между частицами гидрата. Расстояние между частицами обратно пропорционально их числу

$$l = k_1/x, \quad dl = -k_1/x^2 dx, \quad (4)$$

где k_1 — константа.

* Величина x пропорциональна количеству химически связанной воды.

Подставляя значения F и dl из уравнений (1) и (4) в уравнение (3), получим

$$A = -\frac{k_1}{2} f_0 \int_0^x dx \text{ или } A = -k_1 f_0 x / 2.$$

Величина тепловыделения Q должна быть прямо пропорциональна величине A

$$Q = k_2 A = -k_1 k_2 f_0 x / 2 = -k_Q x, \quad (5)$$

где $k_Q = k_1 k_2 f_0 / 2$ — константа. Знак минус указывает на то, что построение структуры сопровождается выделением тепла. Из уравнения (5) следует

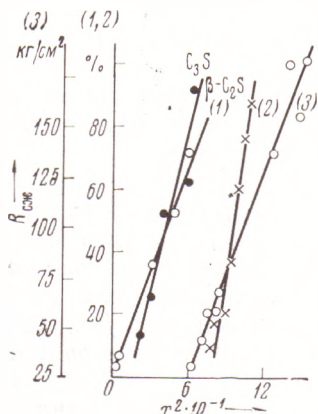


Рис. 1. Зависимость прочности при сжатии $R_{сж}$ от количества химически связанной воды x (%). Экспериментальные данные обработаны по уравнению (2) в линейных координатах. 1 — мономинералы (2), 2 — бетон (3), 3 — цементный камень (4). Точки здесь и на рис. 2 и 3 — экспериментальные значения

хорошо обоснованная экспериментально прямая пропорциональность между величинами гидратации и тепловыделения. В критериальной форме уравнение (5) имеет вид

$$q = \alpha,$$

где $q = Q/Q_{\max}$ — приведенное количество тепла; Q_{\max} — количество тепла, выделившегося к моменту времени $t = \infty$.

Рассматривая процесс деформации твердеющей системы, можно в первом приближении принять, что в области действия закона Гука относительная деформация ϵ прямо пропорциональна напряжению σ и обратно пропорциональна числу частиц гидрата x в единице объема.

$\epsilon = \sigma / k_E x$, но $\sigma / \epsilon = E$, откуда

$$E = k_E x, \quad (6)$$

где E — модуль упругих деформаций, k_E — константа.

При $t \rightarrow \infty$ $x \rightarrow a$, $E \rightarrow E_{\max}$ и $k_E = E_{\max} / a$, где E_{\max} — модуль упругости при $t \rightarrow \infty$. Обозначая $E / E_{\max} = e$, уравнение (6) можно записать в критериальной форме

$$e = \alpha.$$

Из уравнений (2) и (6) вытекает зависимость

$$R = \text{const } E^2.$$

Используя известную зависимость между динамическим модулем упругости E_g , скоростью прохождения ультразвукового импульса v и плотностью системы ρ

$$E_g = v^2 \rho k_s, \quad (7)$$

можно из уравнений (6) и (7) получить связь между v и x

$$v = k_v x^{1/2}, \quad (8)$$

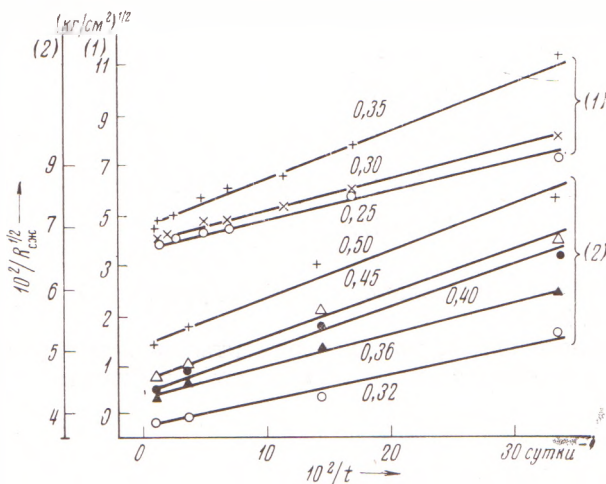


Рис. 2. Кинетика прочности $R_{сж}$ при нормальном твердении. Экспериментальные данные обработаны по уравнению (10) в линейных координатах. 1 — наши данные по цементному камню, 2 — данные по бетону (3). Здесь и на рис. 3 цифры при прямых — величины B/C

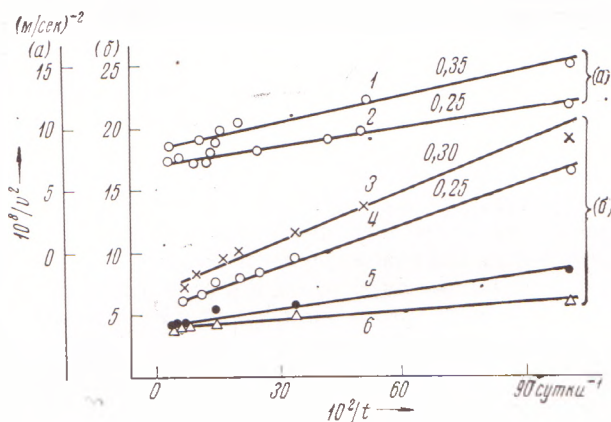


Рис. 3. Кинетика скорости ультразвука v при нормальном твердении. Экспериментальные данные обработаны по уравнению (13) в линейных координатах. 1–4 — наши данные по цементному камню, 5, 6 — данные по бетону (6)

где $k_0 = (k_E/k_3\rho)^{1/2}$ — константа; k_3 — коэффициент, учитывающий форму образца, изменение коэффициента Пуассона и пропорциональность между статическим и динамическим модулями упругости; ρ — плотность системы.

При $t \rightarrow \infty$ $x \rightarrow a$, $v \rightarrow v_{\max}$ и $k_0 = v_{\max}/a^{1/2}$, где v_{\max} — скорость ультразвука при $t \rightarrow \infty$. Обозначая $v/v_{\max} = c$ уравнение (8) запишем в критериальной форме

$$c = \alpha^{1/2}.$$

Как было показано (1), кинетика процесса гидратации портландцемента описывается уравнениями

$$1/x = 1/k_5 t + 1/a \quad \text{или} \quad t/x = 1/k_5 + t/a, \quad (9)$$

где k_5 — кажущаяся константа скорости процесса гидратации.

Используя зависимости (2), (5), (6), (8) и уравнения (9), можно получить соответствующие кинетические зависимости для величин R , Q , E и v в линейном виде

$$1/R^{1/2} = 1/k_R^{1/2} (1/k_s t + 1/a), \quad (10)$$

$$1/Q = 1/k_Q (1/k_s t + 1/a), \quad (11)$$

$$1/E = 1/k_E (1/k_s t + 1/a), \quad (12)$$

$$1/v^2 = 1/k_v^2 (1/k_s t + 1/a). \quad (13)$$

Результаты экспериментальной проверки уравнений (10) и (13) представлены на рис. 2 и 3.

Из приведенного видно, что экспериментальный материал хорошо согласуется с полученными теоретическими зависимостями.

Поступило
16 XII 1971

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ И. К. Шеломов, В. И. Никитинский, Э. И. Дизер, ДАН, т. 203, № 5, 1135 (1972).
² R. Vogie, W. Lerch, Ind. and Eng. Chem., v. 26, 837 (1934). ³ В. В. Дзенис, В. В. Пименов и др., Сборн. тр. Рижск. политехнич. инст., Рига, 1969. ⁴ С. А. Миронов, Ускорение твердения бетона, М., 1961. ⁵ В. Э. Лейрих, И. Б. Веприк, В. Х. Прохоров, Сообщ. к VI Всесоюзн. конфер. по бетону и железобетону, М., 1966. ⁶ С. И. Носкин, Применение ультразвука для контроля качества железобетонных конструкций, М., 1965.