



УДК 666.9.015:534.6

doi: 10.48612/dnitii/2023_49_89-93

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ПРОЦЕССА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ЦЕМЕНТНОГО ТЕСТА НА ЕГО АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В. Г. Васильев

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва

Аннотация

В работе исследуется взаимосвязь интенсивности физико-химических процессов в цементном тесте в период раннего структурообразования со скоростью распространения акустических волн. Показано, что скорость продольных волн в цементном тесте является чувствительной характеристикой, объективно отражающей изменения водоцементного отношения, температуры теста и активности цемента. Градиент скорости акустических волн при двух фиксированных температурах является функцией активности цемента и может использоваться для оперативного контроля качества цемента.

Ключевые слова

цементное тесто, раннее структурообразование, активность цемента, скорость продольных акустических волн

Дата поступления в редакцию

20.10.2023

Дата принятия к печати

26.10.2023

Твердеющее цементное тесто — это термодинамически неравновесная нелинейная система. Возникающие в рассматриваемой системе структуры (новообразования) оказывают значительное влияние на физико-механические параметры цементного теста [1, 2]. Рассмотрим связь скорости распространения акустических волн с интенсивностью физико-химических процессов в системе «цемент – вода» в ранний период структурообразования.

Цементное тесто удобно моделировать трехкомпонентной системой, состоящей из частиц цемента, воды и вовлеченного воздуха, равномерно распределенных по объему. Скорость распространения упругих волн C_i в такой среде можно представить [3]:

$$C_i^2 = 1/\rho_c(m_1/\rho_1 C_1^2 + m_2/\rho_2 C_2^2 + m_3/\rho_3 C_3^2)^{-1}, \quad (1)$$

где ρ_c — средняя плотность среды, определяемая выражением $\rho_c = m_1 \rho_1 + m_2 \rho_2 + m_3 \rho_3$; m_i , ρ_i , C_i ($i = 1, 2, 3$) — объемное содержание, плотность и скорость распространения упругих волн в i -ом компоненте. Индексы 1, 2, 3 относятся соответственно к твердому, жидкому и газообразному компонентам.

Из выражения (1) следует, что, во-первых, скорость упругих волн в цементном тесте зависит от содержания компонентов, плотностей и скоростей звука в них. Во-вторых, за счет наличия в среде газообразного компонента, скорость звука в смеси резко падает и может иметь значения меньшие, чем в каждом из компонентов в отдельности.

Для исследования влияния интенсивности физико-химических процессов, происходящих в цементном тесте на скорость распространения продольных акустических волн, были проведены эксперименты с цементами различной активности, при различных водоцементных отношениях цементного теста и температуре смеси.

Цементное тесто, приготовленное согласно ГОСТ 30744-2001, помещали в специальную измерительную форму и уплотняли вибрированием. Измерения скорости распространения акустических волн в пробах цементного теста осуществляли цифровым ультразвуковым прибором «Бетон-9КТ» в комплекте с пьезоэлектрическими преобразователями, смонтированными соосно в противоположные стенки измерительной формы [4].

На **рис. 1** приведены результаты измерений скорости распространения акустических волн в цементном тесте и смеси молотого кварцевого песка с удельной поверхностью $2500 \text{ см}^2/\text{г}$ при различных температурах. Как видно из приведенных графиков, реальное поведение химически активной дисперсной среды сильно отличается от реакции инертной дисперсной системы (кривые 5,6 — смесь молотого песка с водой, $V/T = 0,31$).

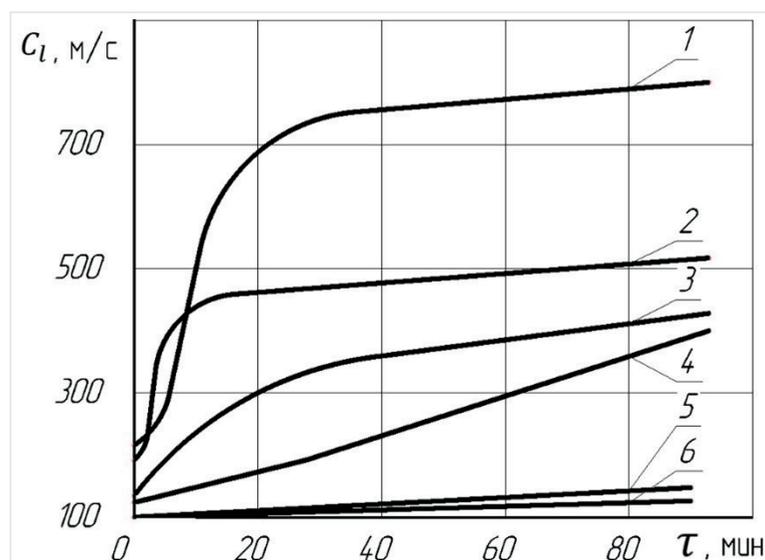


Рис. 1. Изменение скорости акустических волн C_l во времени в цементном тесте с $V/C = 0,3$ (1-4) и смеси молотого кварцевого песка с водой при $V/T = 0,3$ (5,6) при температурах: 1,6 — 7°C ; 2 — 20°C ; 3,5 — 25°C ; 4 — 27°C

Из результатов экспериментов (**рис. 1**) следует, что скорость акустических волн в цементном тесте с повышением температуры смеси существенно уменьшается, причем данная закономерность имеет место начиная с самого раннего возраста (с момента затворения цемента водой).

Учитывая, что в начальных период твердения цементного теста влиянием частиц новообразований (мелкодисперсных «вторичных» частиц твердой фазы) на акустические параметры системы можно пренебречь, так как, с одной стороны, их объем незначителен, а с другой стороны, они выделяются преимущественно на поверхности первичных частиц. Равновесные диффузионные потоки и флуктуа-

ции в квазиравновесных условиях также практически не влияют на величину скорости распространения упругих волн [5].

В период времени до начала схватывания в цементном тесте возникают макрофлуктуации — нелинейные периодические скачкообразные изменения концентрации и плотности в жидкой фазе — диссипативные структуры [1]. Интенсивность макрофлуктуаций является функцией интенсивности диффузионных потоков, определяемых, в свою очередь, водоцементным отношением, температурой смеси и активностью цемента.

Возникающие в системе макрофлуктуации можно уподобить частицам, упругие свойства которых сильно отличаются от свойств жидкой фазы. Плотность потока введенных таким образом квазичастиц или их относительный объем в жидкой фазе цементной пасты можно представить в виде функционала:

$$m_k = F(V/\Omega, T, M), \quad (2)$$

где m_k — объемное содержание квазичастиц в объеме жидкой фазы цементной пасты; T — температура; M — активность цемента.

Значительные флуктуации объема в локальной области, принадлежащей квазичастице, приводят к аномальному изменению адиабатической сжимаемости β , которая связана со скоростью распространения акустических волн C_l зависимостью [6]:

$$C_l = (\rho\beta)^{-1/2}. \quad (3)$$

На рис. 2 приведены результаты измерения скорости упругих волн в цементном тесте при двух фиксированных значениях температуры для цементов марок 400, 500 и предварительно частично гидратированного цемента с прочностью 2,0–2,5 МПа в возрасте 28 суток.

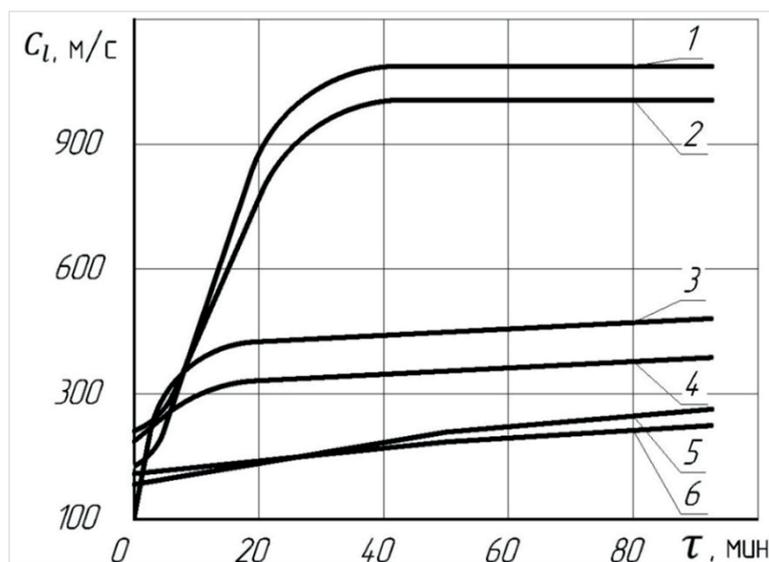


Рис. 2. Изменение скорости акустических волн C_l в процессе раннего структурообразования для портландцементов марок 500 (кривые 1, 4); 400 (кривые 2, 3) и частично гидратированного цемента (5, 6) при температурах: 5°C (кривые 1, 2, 6) и 20°C (кривые 3, 4, 5)

Как видно из приведенных графиков, характер изменения скорости упругих волн в цементном тесте не однозначен. В начальный период твердения количество квазичастиц больше в цементном тесте

с более активным цементом и при более высокой температуре, что приводит к уменьшению начальной скорости распространения продольных волн.

Следующий этап изменения скорости звука характеризуется уже не только количеством квазичастиц, но и увеличивающейся массой новообразований и их флокуляцией. В результате этого процесса скорость упругих волн растет, причем увеличение скорости пропорционально интенсивности нелинейного неравновесного процесса, т. е. количеству квазичастиц в принятой модели.

Анализ полученных результатов (**рис. 2**) показывает, что градиент скорости распространения акустических волн при двух фиксированных температурах является функцией активности цемента и постоянен в интервале времени от 0,2 до 0,7 τ_c , где τ_c — длительность периода от начала затворения до начала схватывания. Постоянство градиента сохраняется в температурном интервале 0–20°C, при дальнейшем увеличении температуры изменяется угол наклона кривых. В указанном температурном интервале градиент скорости акустических волн при изменении температуры на один градус составил для портландцемента Белгородского завода марок 500 и 400 соответственно 45 и 33 м/с; для портландцементов марки 400 Воскресенского и Михайловского заводов — 14 м/с и 18 м/с.

Таким образом, экспериментально показано, что скорость продольных волн в твердеющем цементном тесте в ранний период структурообразования является чувствительной характеристикой, объективно отражающей изменения интенсивности физико-химических процессов, происходящих в смеси «цемент – вода» при изменении водоцементного отношения и температуры, а также активности цемента. Градиент скорости акустических волн при двух фиксированных температурах является функцией активности цемента и может использоваться для оперативного контроля качества цемента.

Библиографический список

1. Дибров Г. Д., Мустафин Ю. И., Селезень В. А. Диссипативные структуры твердеющих цементных паст // Докл. АН УССР. Сер. А, 1983, №12, С. 66–68.
2. Пригожин И., Конденуди Д. Современная термодинамика, от тепловых двигателей до диссипативных структур. — М.: Мир, 2002. — 460 с.
3. Акустические методы контроля в технологии строительных материалов / В. В. Дзенис, В. Г. Васильев, И. Э. Зоммер и др. — Л.: Стройиздат, 1978. — 151 с.
4. Васильев В. Г. Метод контроля технологических свойств подвижных бетонных смесей по их акустическим характеристикам: диссерт... канд. техн. наук. НИИЖБ. — М., 1988. — 203 с.
5. Паташинский А. З., Покровский В. Л. Флуктуационная теория фазовых переходов. — М.: Наука, 1982. — 382 с.
6. Дзенис В. В., Ланса В. Х. Ультразвуковой контроль твердеющего бетона. — Л.: Стройиздат, 1971. — 112 с.

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF THE INTENSITY OF THE PROCESS OF STRUCTURE FORMATION OF CEMENT PASTE ON ITS ACOUSTIC CHARACTERISTICS

V. G. Vasiliev

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow

Abstract

The work examines the relationship between the intensity of physico-chemical processes in cement paste during the period of early structure formation and the speed of propagation of acoustic waves. It is shown that the speed of longitudinal waves in cement paste is a sensitive characteristic that objectively reflects changes in the water-cement ratio, dough temperature and cement activity. The velocity gradient of acoustic waves at two fixed temperatures is a function of cement activity and can be used for operational monitoring of cement quality.

The Keywords

cement paste, early structure formation, cement activity, velocity of longitudinal acoustic waves

Date of receipt in edition

20.10.2023

Date of acceptance for printing

26.10.2023

Ссылка для цитирования:

В. Г. Васильев. Исследование влияния интенсивности процесса структурообразования цементного теста на его акустические характеристики. — Системные технологии. — 2023. — № 4 (49). — С. 89–93.

