## Моделирование начальной стадии твердения портландцемента в условиях градиентов температур

**Ю.А. Абзаев, С.В. Коробков, А.И. Гныря**

Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, Россия, г. Томск, пл. Соляная, 2

В работе проведено 2-D моделирование твердения портландцемента методом конечных элементов в течение 7 дней в условиях градиентов температур Т = +65– (-20)С. Твердение портландцементов на начальных стадиях относится к мультифизическим задачам взаимосвязи тепловых потоков и структурной механики. Перераспределение тепла в портландцементе на начальных стадиях определяется теплопроводностью с объемным источником тепла к которым относятся химические реакции, обусловленные гидратационными явлениями. Реакция гидратации носит экзотермический характер и приводит к заметному выделению тепла. Диффузия воды через слой гидратов является доминирующим механизмом, определяющим кинетику гидратации. В рамках диффузионных процессов формирование продуктов гидратации в результате химических реакций и массопереноса в цементах может быть описано с помощью степени гидратации, которая связана с массовым дисбалансом гидратированного цемента в момент времени, и которая является мерой тепла, выделившегося в процессе гидратации. В работе степень гидратации описана в рамках модели Wang [1]. В модели учтены гидратационные процессы в инкубационный период, диффузионной стадии, а также стадии затухания интенсивного тепловыделения. Рассмотрено накопление гидратов в результате растворения C3S, C2S, C3A. Рассматривался стержень портландцемента, размеры которого были выбраны равными 7×70 см, стержень окружен опалубкой из сосны – 2×70 см. Температура левой грани стержня равна +65 оС, а правой – (-20) оС. Правая сторона была зафиксирована. Предполагалось, что отсутствует теплообмен деревянной опалубки с окружающей средой. В начальный момент времени температура укладки цементного камня (цемент + вода) была равна 20 оC. Численные расчеты распределения температуры, напряжений Мизеса производились при следующих параметрах портландцемента: плотность 2300 кг/м2, теплопроводность λ =1,8 Вт/(м⋅оС), удельная теплоемкость *C* = 880 Дж/(кг⋅оС), модуль Юнга E = 25⋅109 Па, коэффициент термического расширения 10-6 К-1, энергия активации Ea = 38 кДж/моль. Для опалубки из сосны: плотность – 532 кг/м2, теплопроводность 1,8 Вт/(м⋅оС), удельная теплоемкость 2700 Дж/(кг⋅оС), модуль Юнга 12,1 ГПа. Моделирование выявило сложную картину распределения температуры и термических напряжений Мизеса. Показано, что в твердеющем цементном стержне в условиях градиентов температур распределение напряжений оказывается неоднородным. Работа тепловых источников, градиенты температур стимулируют формирование термических напряжений. Модельные расчеты напряжений Мизеса на 2D поверхности. Работа тепловых источников, градиенты температур стимулируют формирование термических напряжений. Модельные расчеты напряжений Мизеса на 2D поверхности получены в разные моменты времени твердения τ = 0,037; 0,5; 1; 2; 4 и 7 дней. С ростом времени твердения неоднородный характер напряжений, и их уровень возрастает. На границах разделов портландцемента и опалубки наблюдается существенный рост напряжений, в особенности на охлажденной грани, а также в местах фиксации стержня. Подобный характер распределения связан с генерацией потоков тепла, их суперпозицией с отраженными потоками тепла от границ раздела. Суперпозиция отрицательных тепловых потоков генерирует более высокий уровень напряжений на границах раздела, чем потоки в положительной области. Ограждения, фиксация границ раздела являются дополнительным факторами, повышающими уровень напряжений на границах. В работе были получены кривые напряжение – деформация портландцемента указанного состава после 4, 8, 12 часов твердения. Вследствие хрупкого разрушения в качестве оценки прочностных свойств портландцемента был выбран предел текучести. Значения предела текучести усреднялись по 3-м точкам. Анализ показал, что выполняется с высокой степенью достоверности (R~0,98) квадратичная связь между пределом текучести и модельными значениями модуля упругости в исследуемом интервале твердения. Корреляционная связь может быть основой прогноза прочности портландцемента после 28 дней твердения.

**Список литературы**

1. Wang X.-Y. Simulation of temperature rises in hardening Portland cement concrete and fly ash blended concrete /\ Magazine of Concrete Research. 2013. V. 65(15). P. 930–94.