

**ВОПРОСЫ ВНЕДРЕНИЯ НОРМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И  
СТАНДАРТОВ ЕВРОПЕЙСКОГО СОЮЗА  
В ОБЛАСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА**

(г. Минск, БНТУ — 22–23.05.2013)

УДК 691.54

**КИНЕТИКА ТВЕРДЕНИЯ ЦЕМЕНТНОГО ТЕСТА  
ПОД ВОДОЙ**

*ЯКИМОВИЧ В.Д., ФЕДОРОВИЧ П.Л.*

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь

**Введение**

Необходимость в разработке единой теории твердения минеральных вяжущих веществ, на наш взгляд, уже давно переросла из категории настоящей в категорию первостепенной важности.

И связано это отнюдь не с удовлетворением личных научных амбиций кого-либо, а с тем, что невозможно без такой теории на сегодняшний день предложить принципиально новые направления как в разработке новых технологий, так и в получении на их основе материалов с новыми или кардинально лучшими свойствами.

До сих пор технологи годами накапливали (и на сегодняшний день накопили) богатейший экспериментальный материал по разработке новых технологий с использованием портландцемента и его разновидностей. Попытки при этом объяснить поведение цементного бетона на основе теории были. Эти попытки увенчались появлением двух основных теорий: кристаллизационного и топохимического твердения с различными вариациями. Однако стройности, под которой подразумевается возможность объяснения поведения цемента от момента затворения его водой до получения камня, ни од-

на из существующих теорий не имеет. Чаще всего испытатели берут для объяснения конкретного явления ту теорию, которая больше для объяснения данного явления подходит. Но это, конечно, лучше, чем “принципиальное” отстаивание позиций одной из существующих теорий, несмотря на ее полное несоответствие вновь открывшемуся явлению. В этом случае появляются загадочные для обывателя и совершенно бессмысленные для специалистов словосочетания и понятия вроде ван-дер-ваальсовых сил “ближнего и дальнего действия”, “центров кристаллизации” (это в среде с огромными насыщениями и значениями РН при крошечных дозировках указанных центров), “перезарядки поверхности”, “образованием или отравлением энергетически активных центров” (причем без ссылки на конкретный “яд”, который в одном месте подразумевается как яд, а в другом так совсем уже наоборот, причем без указания причин), упоительными ссылками на двойной электрический слой, который с удовольствием регистрируют, но ... никуда не “приделяют”, рассуждения о “растворении” в стесненнейших условиях гелевой пористости и т.д.

Не так давно раскрыт детальный механизм гипертонической болезни, который позволил быстро разработать лекарства, воздействующие на процесс развития болезни на не менее чем пяти его стадиях и участках. В данном случае медицина, как пример, подходит лучше всего – как лечить, не зная диагнозов?

Поэтому повторимся: разработка детальной единой теории твердения минеральных вяжущих, детально описывающая весь процесс твердения – настоящая, жизненная необходимость.

Нам представляется, что твердение цемента – это пошаговое упрочнение структуры, переход от меньших по значению сил к большим.

Рассмотрим их на самых ранних стадиях – от момента приливания воды.

Согласно широко распространенным представлениям [1,2], формирование коагуляционной структуры цементного теста происходит в следующей последовательности:

- растворение минералов цемента и гипса;
- пересыщение жидкой фазы;

– выпадение из раствора кристаллов коллоидного размера и их группирование на поверхности непрореагировавших цементных зерен;

– образование за счет коллоидных связей коагуляционной структуры, упрочняющейся во времени при непрерывном увеличении числа частиц и контактов их сцепления.

Такое объяснение представляется нам поверхностным. У него много недостатков. Остановимся на двух:

– не упоминается образование и роль двойного электрического слоя (ДЭС), хотя его наличие на определенном этапе признано всеми;

– трудно объяснить наличие индукционного периода – временного отрезка, когда твердение происходит, а структурная прочность цементного теста не растет.

Предложен иной механизм структурообразования цементного камня вообще и формирования коагуляционной структуры цементного теста в частности [3].

При перемешивании цемента с водой идет процесс обводнения цементных агрегатов: естественным и принудительным путем происходит перераспределение воды на смачивание внешней и доступной внутренней поверхности агрегатов, на диспергирование цементных флюкул. Кроме того, процесс перемешивания дает возможность цементным агрегатам различного размера и конфигурации найти свое место в системе, упорядочить взаимное расположение и приобрести при этом наиболее плотную структуру с минимумом потенциальной энергии.

Какова при этом роль ДЭС?

Сразу после приливания воды начинается процесс растворения, который обусловлен, с одной стороны, дипольным строением молекулы воды, а с другой – броуновским характером ее движения. Адсорбция молекул воды (физическая и химическая) на поверхности минералов цемента ослабляет силу сцепления их компонентов, а свободные молекулы воды, бомбардируя поверхность благодаря своему хаотическому движению, “выбивают” прогидротировавшие ионы и их комплексы из решетки минерала – идет растворение. В этот период процесс крайне хаотичен и напоминает бурлящий суп.

Подобная ситуация наблюдается и в эксперименте, когда мы смешиваем цемент с водой, количество которой значительно пре-

восходит необходимое для достижения нормальной густоты, либо когда большим количеством воды затворяем очень тонко помолотый цемент, и он полностью растворяется.

Все эти случаи объединяет то, что нет силы, скрепляющей цементные частицы между собой, нет коагуляционной структуры с прочностью на сдвиг.

Вернемся к обычным цементам и обычным В/Ц. По мере растворения все больше молекул воды связывается с образующимися ионами, все меньше остается свободной воды, движение в системе замедляется. Созданы условия для образования ДЭС. Он состоит из плотного и стационарного гельмгольцевского монослоя одного знака и “размытого” штерновского с противоположным знаком.

В отношении цемента это и есть “сольватная” оболочка. И хотя в значительной своей части она и состоит из молекул воды, но, тем не менее, по своей структуре отличается от воды свободной. В связи с этим необходимо признать появление границы раздела фаз “сольватный слой – свободная вода”. Сольватированные частички цемента, коснувшись друг друга этими границами, тут же пойдут на сближение, влекомые силой, стремящейся сократить площадь этой границы. Сближение будет продолжаться до момента, когда силу сближения уравнивает сила отталкивания электростатической составляющей ДЭС. Таким образом, созданы типичные условия существования относительно стабильной структуры – структуры, существующей благодаря наличию двух взаимно уравновешивающих сил.

Разница в структурной прочности цементного теста с В/Ц=НГ и В/Ц=0,876•НГ, объясняется лишь тем, что во втором случае, при недостатке воды и образовании в тесте воздушной прослойки, мы получаем границу раздела фаз “сольватный слой – воздух”, мера свободной энергии которого (поверхностное натяжение) намного выше границы “сольватный слой – свободная вода”.

Задачами настоящих исследований являлись:

1. изучение влияния условий твердения на сроки схватывания цементного теста нормальной густоты;
2. изучение влияния условий твердения на изменение пластической прочности цементного теста нормальной густоты.

## 1. Методика проведения исследований

Испытания проводились на ПЦ 500 Д0, изготовленном ОАО «Красносельскстройматериалы».

Характеристики:  $K_{нт}=0,2725$ ; I группа эффективности при пропаривании; средняя активность при пропаривании 38,2 МПа.

Порядок проведения эксперимента: цемент затворяли водой в количестве, соответствующем нормальной густоте, полученное цементное тесто помещали в четыре кольца с поддонами так, чтобы поверхность цементного теста в уплотненном состоянии не доходила до верхней части кольца на 5-7 мм. Тесто уплотняли встряхиванием 5-6 раз, постукивая поддонами о твердое основание. В двух кольцах на поверхности теста делали прослойку воды, т.е. доливали воду до верхней части кольца. Два кольца, одно из которых с прослойкой воды, предназначены для определения сроков схватывания, а два других для определения пластической прочности. После этого определяли сроки схватывания при помощи прибора Вика [4] и пластическую прочность твердеющего цементного теста при помощи рычажно-конического пластометра (МГУ) в каждом из колец.

## 2. Результаты экспериментальных исследований

### 2.1. Сроки схватывания цементного теста.

Результаты испытаний по определению сроков схватывания цементного теста приведены в таблице 1.

**Таблица 1. Сроки схватывания цементного теста**

	в воздушной среде	под водой
$H_{сх}$	3ч 08мин	3ч 08мин
$K_{сх}$	4ч 38мин	5ч 14мин

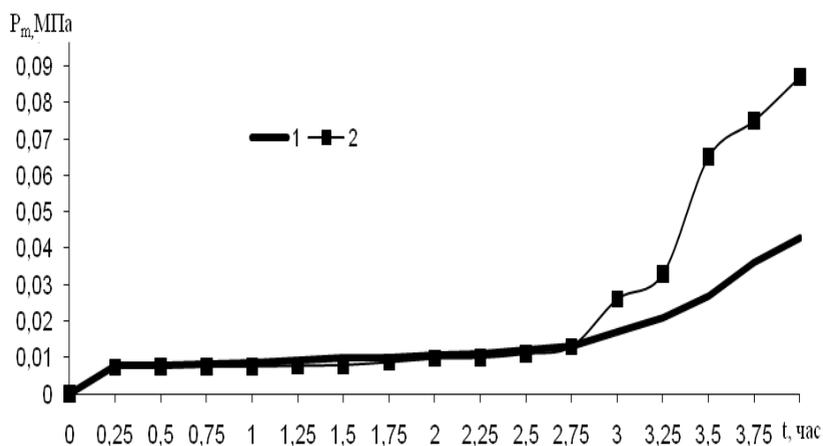
### 2.2. Пластическая прочность.

Результаты испытаний по определению пластической прочности приведены в таблице 2 и на рисунке 1.

**Таблица 2. Пластическая прочность цементного теста**

Время, ч	Пластическая прочность цементного теста в воздушной среде, МПа	Пластическая прочность цементного теста с прослойкой воды над ним, МПа
0,25	0,0073	0,0078
0,50	0,0075	0,0078
0,75	0,0075	0,0083
1,00	0,0075	0,0086
1,25	0,0077	0,0094

1,50	0,0079	0,0098
1,75	0,0087	0,0100
2,00	0,0097	0,0108
2,25	0,0099	0,0110
2,50	0,0110	0,0120
2,75	0,0130	0,0130
3,00	0,0260	0,0170
3,25	0,0330	0,0210
3,50	0,0650	0,0270
3,75	0,0750	0,0360
4,00	0,0870	0,0430



1—твердение цемента под водой, 2—твердение цемента в воздушной среде  
Рисунок 1. Пластическая прочность цементного теста

### 3. Выводы

3.1. При проведении испытаний установлено, что начало схватывания цементного теста в различных условиях твердения не изменяется, а конец схватывания теста, твердевшего в воде, увеличивается на 38 мин по сравнению с тестом, твердевшим в воздушной среде.

3.2. Из полученных данных видно, что процессы структурообразования цементного теста в воде и в воздушной среде незначительно отличаются в начальные сроки ( $\approx 2$ ч 45мин), однако затем наблюдается резкое опережение роста пластической прочности цементного теста, твердевшего в воздушной среде.

### Заключение

Таким образом, мы предполагаем, что в цементном тесте вместо границы “сольватный слой – вода” на определенном этапе твердения, совпадающем с началом схватывания, образуется граница “сольватный слой – воздух”, что резко увеличивает значение свободной энергии ( $\sigma$ ) на границе раздела. И наоборот: цементное тесто, находящееся под водой, несмотря на продолжающуюся гидратацию, имеет постоянную подпитку водой, что поддерживает наличие раздела “сольватный слой – вода” и занижает значение пластической прочности системы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ахвердов И.Н. Высокопрочный бетон.-М., 1961. 163 стр.
2. Методы исследования цементного камня и бетона./под редакцией Ларионовой З.М.-М.:Стройиздат., 1970. 159 стр.
3. Якимович В.Д. Аэротермоактивация цемента и наполнителей в бетонах: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук:1979/ Якимович В.Д.-Минск.,1990.-173 л.
4. Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема: ГОСТ 310.3-76.- Введ. 01.01.78.-Москва: Министерство промышленности строительных материалов СССР, государственный комитет СССР по делам строительства Министерством энергетики и электрификации СССР,1978.- 9 с.