



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВПО «МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Библиотека научных разработок и проектов НИУ МГСУ

Н.И. Макридин, Е.В. Королев, И.Н. Максимова

**СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ
И КОНСТРУКЦИОННАЯ
ПРОЧНОСТЬ ЦЕМЕНТНЫХ
КОМПОЗИТОВ**

Москва 2013

УДК 691.3:663.94.972:620.18:539

ББК 65.9(2)304.19

М 15

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор *В.И. Калашиников*,
зав. кафедрой технологии бетонов, керамики и вяжущих,
заслуженный деятель науки (ПГУАС);

доктор технических наук, профессор *В.Т. Ерофеев*,
зав. кафедрой строительных материалов и технологий,
чл.-корр. РААСН (МГУ им. Н.П. Огарева)

Макридин, Н.И.

М 15 Структурообразование и конструкционная прочность цементных композитов : монография / Н.И. Макридин, Е.В. Королев, И.Н. Максимова ; М-во образования и науки Росс. Федерации, ФГБОУ ВПО «Моск. гос. строит. ун-т». — Москва : МГСУ, 2013. — 152 с.

ISBN 978-5-7264-0762-3

Проведен анализ структурообразования цементного камня, модифицированного водоредуцирующими добавками, развиты представления о его реальной структуре с учетом размеров блоков мозаики. Установлены электрохимические особенности процессов гидратации, структурообразования и твердения модифицированного цементного камня. Определены характеристики качества дисперсно-кристаллитной структуры и фазового состава цементного камня. Выявлены силовые и энергетические критерии разрушения цементного камня и песчаного бетона, обоснована сущность кинетических процессов, происходящих при деформировании и разрушении цементных композитов, по амплитудно-энергетическому распределению импульсов сигнала акустической эмиссии на диаграмме нагружения.

Для студентов и магистрантов, обучающихся по направлению «Строительство», аспирантов, научных работников, занимающихся вопросами повышения качества цементных строительных композитов и разработкой новых методов анализа процессов их структурообразования и исследования свойств.

УДК 691.3:663.94.972:620.18:539

ББК 65.9(2)304.19

ISBN 978-5-7264-0762-3

© ФГБОУ ВПО «МГСУ», 2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
Глава 1. СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ПРОЦЕССАХ СИНТЕЗА КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ЦЕМЕНТНЫХ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ	8
1.1. Гидратация, схватывание, твердение и структурообразование цементных дисперсных систем	8
1.2. Влияние модифицирующих добавок на формирование дисперсно-кристаллитной структуры цементного камня и бетона	15
1.3. Фазовый состав и дисперсно-кристаллитная структура цементного камня.....	21
1.4. Собственные деформации и напряжения структур цементного камня.....	29
1.5. Конструкционная прочность и основные положения механики разрушения цементного камня и бетона	33
Глава 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОЦЕССОВ ГИДРАТАЦИИ, СХВАТЫВАНИЯ, СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ И ТВЕРДЕНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОГО ЦЕМЕНТНОГО ТЕСТА	45
2.1. Гидратация минералов цемента C_3S и $\beta-C_2S$	45
2.2. Кинетика гидратации цемента.....	52
2.3. Явление самоорганизации в цементной системе	59
2.3.1. Кинетика поглощения катионов кальция поликремниевой кислотой	59
2.3.2. Кинетика изменения ΔpH цементной пасты	61
2.4. Влияние химических добавок на модифицирование структуры ГСК.....	63
Глава 3. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИИ ЦЕМЕНТНОГО ТЕСТА, ФАЗОВОГО СОСТАВА И ХАРАКТЕРИСТИК КАЧЕСТВА ДИСПЕРСНО-КРИСТАЛЛИТНОЙ СТРУКТУРЫ МОДИФИЦИРОВАННОГО ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ	70
3.1. Влияние последовательности дозирования и концентрации СП С-3 на реологию цементного теста и фазовый состав цементного камня	70
3.2. Исследование дисперсно-кристаллитной структуры цементного камня.....	82

3.3. Влияние добавок модифицированных ГСК как затравок кристаллизации и структурообразования на синтез прочности цементного камня.....	89
Глава 4. ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ МОДИФИЦИРОВАНИЯ, СИНТЕЗ ПРОЧНОСТИ И КРИТЕРИИ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ СТРУКТУР ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ	98
4.1. Исследование зависимости параметров разрушения цементного камня от процедуры модифицирования его структуры	98
4.2. Влияние дисперсной фазы на параметры разрушения цементных композитов	112
4.3. Исследование деформационных и прочностных параметров качества модифицированных структур бетонов повышенной прочности	120
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	132
Библиографический список	134

ВВЕДЕНИЕ

Основной задачей современного материаловедения является создание материала с заданными эксплуатационными свойствами при минимальных затратах ресурсов. Для строительных материалов конструкционного назначения, к которым относятся прежде всего бетон и железобетон, таким свойством становится прочность, так как прочность цементного камня и бетона — это важнейший показатель качества их структуры, определяющий практически все остальные свойства этих материалов и, следовательно, область их применения.

В основе развития науки о материалах, технологии их производства, расчета и конструирования лежат методы испытаний. Основной целью испытания материалов является описание их свойств по характерным признакам и выражение этих признаков в количественной форме в виде определенных параметров, которые лежат в основе выбора, в частности, конструкционных материалов для какой-либо определенной цели. В этой связи мера достоверности теории полностью зависит от идейной полноценности и точности эксперимента, положенного в ее основу, и от адекватного отображения результатов этого эксперимента в математическом аппарате теории через определяющее уравнение [16].

Полная и действенная программа оценки материалов должна давать информацию, необходимую для прогнозирования с достаточной точностью срока службы и вероятности его разрушения с учетом всех факторов, влияющих на возможное поведение материала при эксплуатации [207].

Распространенная в настоящее время оценка качества бетона и цементного камня, в том числе надежности, основана на измерении механической прочности по методикам соответствующих ГОСТ. Вместе с тем известно, что механические характеристики являются малоэффективными параметрами состояния при диагностике конструкционных материалов, так как не учитывают изменения прочностных и деформативных свойств бетонов под влиянием временных процессов микротрещинообразования при нагружении [125].

Повышение качества бетона и эффективности конструкций на его основе можно достичь как оптимизацией его структуры, так и уточнением уже имеющихся или введением новых характеристик материала, позволяющих совершенствовать как методы проекти-

рования и расчета конструкций, так и технологию производства последних, и тем самым более полно использовать конструкционные возможности бетона.

Проблема качества бетонов приобретает особую остроту и актуальность в современных экономических условиях, характеризующихся, с одной стороны, увеличением стоимости энергетических и материальных ресурсов, а с другой, в связи с интенсивной разработкой и практическим внедрением в строительную практику так называемых высококачественных бетонов, — высокой и особо высокой прочности, для которых оценка действительных предельных состояний структуры приобретает особую научную и практическую значимость, так как из механики материалов известно, что высокопрочные материалы обладают малой трещиностойкостью (вязкостью разрушения) и остаточной прочностью при наличии дефектов структуры.

Существенные достижения последних десятилетий в технологии бетона обусловлены значительным ростом эффективности модифицирующих добавок различной природы и прежде всего химических добавок ПАВ — супер- и гиперпластификаторов. Поэтому изучение и разработка процесса структурообразования цементного камня, бетонов на его основе и новых методов исследования их структуры и физико-механических свойств имеет большое значение и будет способствовать развитию бетоноведения.

Одним из путей дальнейшего выяснения природы механического поведения бетона под нагрузкой может служить новый подход к проблеме прочности, в основе которого лежит детальное изучение самого процесса разрушения с позиций физики и механики разрушения, так как истинная природа этого хорошо известного явления выяснена далеко не полностью.

Концепция механики разрушения заключается в том, что разрушение твердого тела под нагрузкой происходит в результате развития в нем реальных дефектов.

Поскольку между структурой и параметрами механики разрушения существует тесная физическая связь, то можно найти новые более дифференцированные и очень эффективные характеристики поведения материалов под нагрузкой, поэтому методы механики разрушения все шире начинают применять для оценки качества конструкционных материалов и оптимизации их механических свойств.

Таким образом, в работе представлены результаты исследований по актуальному направлению современного строительного материаловедения — проблеме прочности и разрушения модифицированной добавками гидратационной структуры цементного камня и конструкционных бетонов, и в частности по вопросам формирования важнейших параметров долговременной механической прочности — силовым, деформационным и энергетическим характеристикам трещиностойкости (вязкости разрушения), изучению самого процесса разрушения в реальном масштабе времени, оптимизации структуры и механических свойств с целью повышения сопротивления модифицированной структуры цементного камня и бетона стабильному и нестабильному развитию трещиноподобных дефектов под нагрузкой.

Углубление физических представлений по данным вопросам позволит реализовать материаловедческое обеспечение повышения качества конструкционного бетона и тем самым — повышения надежности, долговечности и экономической эффективности конструкций и сооружений на его основе, что является весьма актуальной задачей современного строительного материаловедения.

Глава 1

СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ПРОЦЕССАХ СИНТЕЗА КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ЦЕМЕНТНЫХ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ

1.1. Гидратация, схватывание, твердение и структурообразование цементных дисперсных систем

По современным представлениям схватывание и твердение цементно-водных систем — это совокупность последовательных процессов, связанных с образованием гидратов и возникновением структуры.

Более ста лет назад (1887 г.) Ле Шателье положил начало как систематическому изучению строения минеральных вяжущих, так и вопросам их взаимодействия с водой, т.е. гидратации и твердения.

К началу XX в. четко оформились две физико-химические теории схватывания и твердения, связанные с именами Ле Шателье и Михаэлиса [96]. В их основу были положены представления о том, что всякое вяжущее вещество растворяется в воде, образуя насыщенный раствор. Вследствие его пересыщения возникающие продукты гидратации, которые, по Ле Шателье, выделяются в виде кристаллов новообразований, во взаимодействии и создают структуру твердения. Не отрицая указанного пути создания прочного кристаллического сростка, Михаэлис (1893 г.) считал, что гораздо более важным обстоятельством для объяснения водостойкости цементов является гелеобразование при твердении цемента.

Противоречивость физико-химических воззрений по вопросу схватывания и твердения вяжущих пытался сблизить А.А. Байков. В работе [210] он высказал соображение о том, что первоначальное растворение после пересыщения смещается переходом системы в коллоидное состояние. А.А. Байков [10] рассматривал процесс твердения как единый кристаллохимический процесс, имеющий несколько стадий: растворение, образование коллоидных продуктов за счет топохимической реакции и, наконец, период кристаллизации.

Отмеченные воззрения легли в основу кристаллизационной теории Ле Шателье и так называемой «коллоидной» теории Михаэлиса.

Спор сторонников противоборствующих теорий, подтверждающих в деталях ту или другую теории твердения, продолжался до тех пор, когда был установлен научный факт, что кристаллы могут иметь коллоидные размеры. Затем, как отмечено в работе [132], вопрос о процессах твердения приобрел другой аспект: является ли процесс твердения кристаллизационным (сквозьрастворным) или топомхимическим?

Последующее развитие теории отмечено повышенным вниманием к сопровождающим процесс твердения физическим явлениям. Можно отметить, что влияние физических факторов на свойства и структуру цементного теста и камня впервые строго научно было рассмотрено в работах [143, 144, 226].

Новые представления о процессах гидратационного твердения вяжущих веществ были созданы в работах П.А. Ребиндера и его школы. С точки зрения физико-химической механики, разработанной П.А. Ребиндером, в основу теории твердения положен принцип структурообразования.

Здесь уместно отметить, что образование структуры твердеющих систем на основе портландцемента является центральным вопросом физико-химической механики [165]. В самом обобщенном виде структура означает совокупность связей, обеспечивающих формирование свойств материала, обуславливающих его способность сопротивляться воздействию внешних сил вплоть до разрушения. В более узком смысле она дифференцируется по трем признакам: 1) структура вещества, определяющаяся химическим и минералогическим составом и не зависящая от геометрических свойств системы; 2) структура системы (порового пространства), характеризующаяся совокупностью геометрических свойств; 3) структура связей, обуславливающаяся как структурой вещества, так и структурой порового пространства [147].

Обычный цементный клинкер содержит 70...80 % безводных силикатов кальция, гидролиз и гидратация которых сопровождаются появлением свободного гидроксида кальция, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, взаимодействующего с SiO_2 и определяющего вяжущие свойства цемента. Образующиеся при этом синтетические *гидросиликаты кальция* (ГСК) являются главным связующим компонентом и носителем механической прочности композитных материалов на основе цементной дисперсной системы.

Процессы гидратации и твердения клинкерных минералов очень сложны. Под гидратацией принято понимать взаимодействие ча-

стиц исходного цемента с водой. Гидратация складывается из элементарных стадий — смачивания, адсорбции, растворения, диффузии, собственно химической реакции зародышеобразования и образования гидратов, осложненной для полиминеральных вяжущих практическими условиями протекания процессов за счет взаимного влияния минералов друг на друга и создания структуры с определенными физико-механическими свойствами.

Твердение цементного камня — сложное явление, связанное с комплексом процессов химического и физического характера. Физико-химические процессы, протекающие при твердении вяжущих, приводят к образованию прочного кристаллического сростка. Возникновение такого сростка закономерно сопровождается деструктивными явлениями, вызванными нарушениями контактов сростания в процессе развития отдельных составляющих структуры [211].

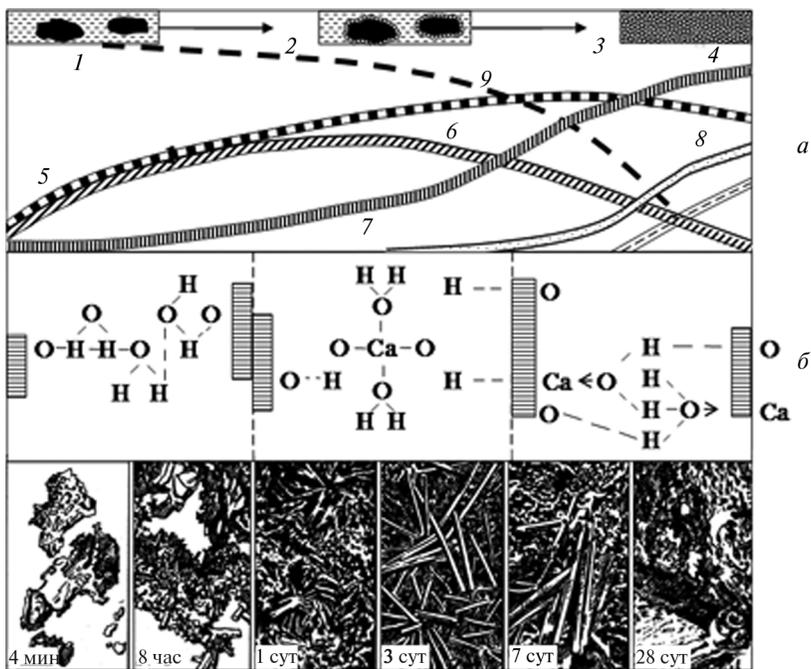
Современные исследования процессов гидратации и твердения отличаются глубоким проникновением в механизм элементарных стадий названных выше процессов, а исследование реакции гидратации вяжущих веществ на ионном уровне является наиболее плодотворным и актуальным направлением [30].

Вопрос о взаимодействии вяжущего с водой получил освещение в многочисленных трудах отечественных и зарубежных исследователей, в которых показано, что с момента затворения водой компонентов бетонной смеси в ней параллельно протекает ряд сложных химических, физико-химических и физико-механических превращений, тесно связанных друг с другом и оказывающих непосредственное влияние на формирование фазового состава и структуры бетона [3, 4, 7, 9, 49, 52, 95, 133, 202, 209].

Итак, процесс твердения — это совокупность сложных и многообразных физико-химических превращений, результатом которых является существенное изменение структурно-механического состояния цементной дисперсной системы. Изучение химической гидратации чистого цемента (без заполнителя) почти всегда более целесообразно, отмечает Х. Тейлор [180].

На рис. 1.1 представлена схема процесса гидратации цемента и развитие структуры цементного теста по данным работ [97, 133, 176].

Из схематизации механизма твердения следует, что химическая реакция является первопричиной развития последующих физических изменений и превращений твердеющего материала: продукты



ПОРТЛАНДЦЕМЕНТ

МПа $C_3S = 64,6\%$; $C_2S = 13,92\%$; $C_3A = 6,17\%$
 $C_4AF = 12,22\%$ *гипс* = 4 %
 $S = 3000 \text{ см}^2/\text{г}$ (по товару)

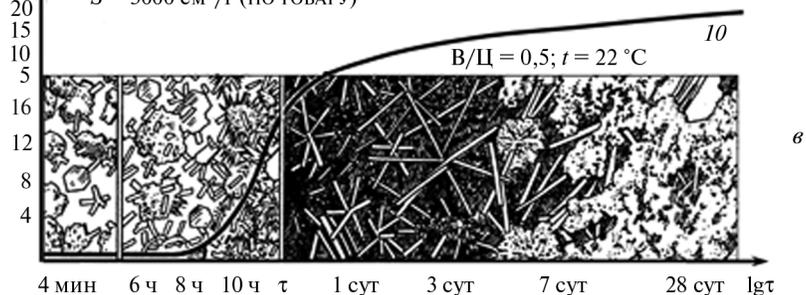


Рис. 1.1 Схема механизма твердения минеральных вяжущих материалов и электронно-микроскопические снимки по данным работ [97] (а); [176] (б); [133] (в):

1 — неустойчивая структура; 2 — формирование основной структуры;
 3 — уплотнение структуры; 4 — стабильная структура; 5 — образование длинных кристаллов; 6 — этtringит; 7 — образование коротких волокон; 8 — моносульфат;
 9 — пористость; 10 — прочность

гидратации и гидролиза являются как бы «полуфабрикатами», способными к последующему структурообразованию [205].

Между дисперсной частицей и окружающей ее сольватной оболочкой развиваются диффузные процессы, которые на определенной стадии развития приводят к образованию вокруг непрореагировавшей части цементного зерна гелеобразных оболочек, которые со временем способны стареть, загустевать [61, 143, 200].

При дальнейшем взаимодействии химически активных дисперсной фазы и дисперсионной среды продолжается химическое и физическое связывание влаги — накопление продуктов реакции (рис. 1.1, в), которое отождествляют с ростом прочности твердеющей системы. Однако главная причина роста прочности, по мнению [60, 61, 175, 176], — это замещение адгезионных и когезионных контактов электростатической и электромагнитной природы (силы дальнего действия) кристаллизационными контактами (силы короткого действия), которые образуются вследствие наличия ненасыщенных поверхностных валентных сил (рис. 1.1, б).

Итак, структурообразование портландцемента при твердении является сложным, многообразным процессом, определяемым комплексом изменений различных свойств системы (рис. 1.1, а), в котором развитие кристаллизационной структуры сопровождается деструктивными явлениями, проявляющимися как нарушение контактов срастания, особенно в условиях кристаллизации новообразований в малых объемах при недостаточном количестве воды. В результате одни кристаллы препятствуют росту других, что приводит к развитию отрицательных напряжений [11, 27, 200].

Обобщение результатов исследований закономерностей структурообразования и твердения приводит к выводу, что собственно твердение как процесс образования и развития капиллярно-пористой структуры материала может протекать только по достижении системой «минеральное вяжущее — вода» определенных специфических условий, которые различными исследователями трактуется по-разному. Например, по Ле Шателье, это степень пересыщения раствора, по А.Ф. Полаку и В.Б. Ратинову [148, 152, 156, 158], — это порог коагуляции, по М.М. Сычеву [175, 176], — «условия стеснения» и др.

Из анализа результатов исследований закономерностей структурообразования и твердения минеральных вяжущих веществ, полученных как отечественными, так и зарубежными исследователями, можно выделить два основных направления в трактовке рас-

смаатриваемой проблемы. Одно направление посвящено изучению названных закономерностей и рассмотрению поведения вяжущих в прочностном аспекте (т.е. с точки зрения процесса твердения); другое — представлено более скромно работами, связанными с изучением химической природы вяжущих веществ и химических процессов, обуславливающих твердение (химический аспект), несмотря на то, что на первых порах становления науки о вяжущих веществах было выдвинуто несколько теорий, базирующихся в основном только на химических представлениях. Вероятно, это обусловлено тем, что химия в те времена не имела еще необходимой теоретической базы, позволяющей объяснять с позиций химии механические свойства системы (процессы схватывания и твердения) [194].

Вместе с тем, как отмечено в работах [30, 194], коллоидная теория твердения Михаэлиса не может решить, а кристаллизационная теория Ле Шателье не ставит задачу глубокого изучения процесса химического превращения, происходящего с неорганическими вяжущими веществами. Рассмотрение химических превращений также не является прямой задачей физико-химической механики.

Из работ отечественных исследователей, отражающих химический аспект процессов схватывания и твердения, следует отметить [30, 62, 130, 175, 194].

Так, по мнению [194], процесс твердения при всех условиях сводится к основным химическим реакциям: сорбции катионов кальция по механизму ионного обмена полисилоксаном и молекулярным реакциям поликонденсации и деполимеризации полисилоксана в присутствии ионов кальция в растворе. Реакция гидролитической деполимеризации проявляется в разрыве связей $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ под влиянием раствора гидроксида кальция. Образующаяся ортокремниевая кислота неустойчива и, конденсируясь в водной среде, в присутствии ионов кальция превращается в полисилоксанат кальция, т.е. реакции деполимеризации и поликонденсации идут одновременно, но с приматом реакции деполимеризации.

В.Ф. Журавлев [62] показал, что вяжущие вещества — это обширный класс соединений, в которых свойства «вязать» проявляются периодически в согласии с периодическим законом Д.И. Менделеева. Идеи В.Ф. Журавлева получили развитие в работе Н.А. Мощанского [130], который показал, что вяжущие свойства определяются не только размерами ионов, но также их зарядами, степенью поляризации, координацией и геометрическими факторами.

М.М. Сычев [175] рассматривает возникновение структуры при твердении как образование твердого тела путем конденсации дисперсных частиц, связывая этот процесс при малом количестве воды с наличием полярных групп и «стесненным» состоянием, когда могут проявляться межмолекулярные силы дальнего действия. Дальнейшее упрочнение результируется как переход части адгезионных контактов электромагнитной и электростатической природы в кристаллизационные валентной природы, что и определяет химический аспект твердения.

По И.Н. Ахвердову [3], кинетика упрочнения цементного камня может быть представлена в виде процесса, обусловленного увеличением количества и сближением субмикрочастиц, что сопровождается «постепенным» утоньшением прослоек жидкости между ними и возрастанием сил связи (преимущественно ионных), при этом интенсивность сил притяжения (связей) между отдельными кристаллическими агрегатами и кристаллогидратами зависит от химического потенциала минералов цемента, составляющих субмикрочастицы и взаимодействующие с ними жидкости.

Автор работы [75] полагает, что кинетика роста прочности цементного камня представляется как постепенный переход по мере сближения кристаллических образований от диполь-дипольной к ион-дипольной и ион-ионной связи. При этом существенное влияние на процесс твердения оказывают также внешние факторы: водоцементное отношение, температура, влажность среды, внешнее давление, что получило отражение в многочисленных работах.

Обстоятельный обзор химических представлений по кинетике образования ГСК и механизму схватывания и твердения портландцемента представлен в работе [30]. В.Н. Вернигорова отмечает, что взаимодействие кремнезема с СаО в системе СаО—SiO₂—H₂O подробно исследовал еще Ле Шателье, который показал, что известь поглощается коллоидным кремнеземом с образованием ГСК в осадках переменного состава, а еще раньше в 1892 г. Михаэлис высказал мнение, что образующиеся при гидратации ГСК не обладают точным стехиометрическим составом, а являются смешанными гелями, которые содержат гидраты кремнезема, глинозема, Fe(OH)₃ и адсорбирующие СаО.

ГСК — это продукт взаимодействия дальтонионов: молекул H₂O, катионов Ca²⁺, анионов SiO₄⁴⁻, ионов OH⁻, молекул или ионов добавок с бертоллидами, какими являются силикаты кальция в портландцементе. Образование ГСК — это подлинно химический про-

цесс, который, как и все химические процессы, является процессом активированным, т.е. требующим для своего протекания определенной энергии активации. Таким источником энергии активации, по [30], является самопроизвольно протекающая необратимая реакция диссоциации воды на поверхности частиц бертоллида. При замешивании портландцемента с водой полярные молекулы воды атакуют кислотные и основные центры минералов вяжущего. Происходит расслабление и разрыв химических связей и диссоциация воды с образованием активных частиц, свободных атомов водорода H и свободных радикалов OH, а также ионов H⁺ и OH⁻. Реакция диссоциации воды является базисной экзотермической реакцией, питающей энергией все процессы, что соответствует концепции П.Г. Комохова [81] о роли воды как энергетически активно действующего силового источника в процессах гидратации и синтеза прочности цементного камня.

По мнению [194], в большинстве работ, посвященных химии и физико-химии цементов, говорится о механизме твердения (о механизме гидратационного твердения) неорганического вяжущего вещества. При таком рассмотрении химизм процессов взаимодействия вяжущего с водой отодвигается на второй план. В этой связи следует отметить слова Г. Кюля [26], сказанные им восемьдесят лет назад: «Внимание неискушенного наблюдателя в процессе твердения вяжущих веществ привлекают не столько химические реакции, вызывающие этот процесс, сколько физическое их следствие — превращение в камневидное тело».

В работе будут рассмотрены некоторые химические превращения, определяющие процесс твердения портландцемента.

1.2. Влияние модифицирующих добавок на формирование дисперсно-кристаллитной структуры цементного камня и бетона

Применение различного рода добавок при изготовлении бетонов и других силикатных строительных материалов имеет достаточно большую историю.

По мнению [203], различного рода добавки, вводимые в цементные дисперсные системы, можно рассматривать как примеси, которые изменяют ход кристаллизации новообразований, фазовый состав и структуру цементного камня.