

## КЛЮЧЕВАЯ ПРОБЛЕМА СТРОИТЕЛЬНОГО БЕТОНОВЕДЕНИЯ

**Г.Н. ПШЕНИЧНЫЙ, В.Ф. ЧЕРНЫХ**

*Кубанский государственный технологический университет,  
350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2*

Отмечены недостатки существующей трехстадийной схемы твердения портландцемента и ряд до сих пор не решенных аспектов, делающих сомнительным возможность организации направленной технологии бетона и железобетона. Показана необходимость учета основополагающих поверхностных явлений, протекающих на границе раздела фаз «цементное зерно – вода». Взаимодействие гетерогенной цементной системы осуществляется путем стадийного формирования в межфазной зоне переходного энергетического комплекса с его развитием (аккумуляцией собственной энергии), достижением критического уровня, распадом (появлением активных частиц) и химизмом процесса. Представлена «движущая сила» структурообразования – вакуум, развивающийся в межзерновых пустотах системы, за счет периодического потребления цементными минералами порций диполей. Уточнена морфология микробетона – продукта, состоящего из соединенного аморфным гидросиликатом в монолит поверхностно гидратированных цементных зерен, отличительной особенностью которых является наличие локально рассредоточенных поверхностно-активных зон, требующих учета в строительной практике.

**Ключевые слова:** гидратация цемента, стадийно-поверхностный процесс, бетон и микробетон, остаточные поверхностно-активные зоны, прочность, долговечность и надежность бетонов.

### Состояние вопроса

Казалось бы, очевиден отрицательный ответ на вопрос: «Возможно ли производство строительного материала с требуемыми свойствами при отсутствии достаточной ясности в механизме явления?». Конечно же, не обладая требуемыми сведениями об особенностях и закономерностях этого явления проблематично осмысленно и целенаправленно обосновать технологические режимы для получения требуемых физико-механических параметров, долговечности и эксплуатационной надежности продукции.

Реальность же опровергает эту логику – бурно развивающееся строительство, возведение высотных, большепролетных и специальных объектов осуществляется (и это далеко не секрет) при отсутствии необходимого объема знаний о физической сущности превращения пластичной цементной массы в камень, бетонной смеси в бетон. В этом легко убедиться,

спросив у руководителей технологического процесса о механизме гидратации цемента, структурообразовании и твердении бетонов. В подавляющем большинстве случаев ответом будет мнение типа: «Зачем нам знать все тонкости о твердении цемента? Ведь он и так твердеет, и нужную прочность обеспечим общеизвестными приемами. Знания о цементе – сфера науки, а мы занимаемся делом – изготовлением железобетонных конструкций (зданий, сооружений)». Так уж и сложилось, что научный аспект занимает особую, мало связанную с практикой, строительную нишу.

В отечественном бетоноведении принята, так называемая, трехстадийная схема твердения, предусматривающая при смешивании вяжущего с водой немедленный гидролиз силикатов кальция с насыщением жидкой фазы известью, а также небольшим количеством кремнезема, глинозема и железа. В течение нескольких минут из раствора выделяются первые новообразования - гидроксида кальция и эттрингит (первая стадия). Приблизительно через час появляющийся в жидкой среде мелкий гидросиликат осаждается на поверхности, экранирует цементные зерна, препятствует проникновению воды к негидратированным массивам, замедляет процесс, определяет «скрытый или индукционный период» гидратации цемента (вторая стадия). Возникающее и развивающееся в экранных гидратных оболочках осмотическое давление разрушает последние, частично обнажает цементные зерна, вызывая наступление третьей стадии – интенсивного взаимодействия реагентов, бурного насыщения поровой жидкости новообразованиями, пересыщения среды, кристаллизации системы, упрочнения цементного камня и бетона.

Однако, данная «теория твердения» имеет ряд существенных недоработок:

1) «формуле жизни», полимолекулярному чрезвычайно чувствительному к внешним факторам, в том числе, к активной поверхности твердой фазы объекту, отводится скромная роль средства для проявления гидролизных, растворительных и т.п. действий;

2) непонятна «движущая сила» и энергетика немедленного после соприкосновения реагентов гидролиза силикатов кальция, которая, к тому же, в начальные 1,5...2,0 часа твердения невероятна, ввиду отсутствия экзотермического эффекта;

3) считается, что количество воды затворения влияет на «сроки схватывания» цемента, но тогда чем пояснить независимость времени наступления характерных переломных точек кинетических кривых ряда (прочностных, термохимических и др.) свойств?

4) затвердевший цементный камень представляется «кристаллическим сростком», что не подтверждается многочисленными микроскопическими испытаниями, свидетельствующими об отсутствии этого «сростка»; локальное скопление в порах разрозненных кристаллов (рис. 1), вряд ли, играет принципиальную роль в процессе;

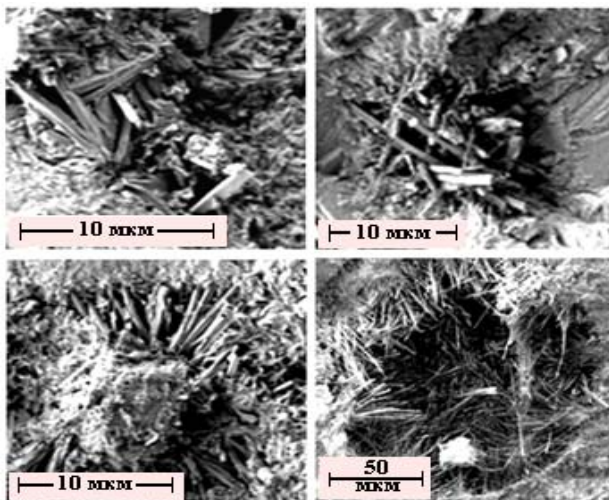


Рисунок 1. Общий вид цементного камня ( $V/C=0,40$ ) водного твердения

5) пределом технологического совершенства декларируется полное превращение цементных зерен в гидратированные соединения, что противоречит эксперименту, свидетельствующему о неизменности размера зерен любых сроков и условий твердения;

6) не упоминается обнаруженный В.А. Киндом и В.Ф. Журавлевым в 30-х годах прошлого столетия весьма важный аспект – «скачкообразность»

отвердевания, которая легко фиксируется, например, пластометрическим методом;

7) не рассматриваются и, зачастую, относятся к аномалиям «пилообразный» (по Л.А. Малининой) рост прочности бетонов, периодические сбросы прочности спустя годы и десятилетия (по С.А. Миронову, Е.Н. Малинскому, Т.Л. Пылаевой и мн. др.);

8) нет ясности в сущности действия добавок-электролитов, многие из которых (например, поташ) отнесены к ускорителям схватывания, несмотря на их явно замедляющий эффект, сопровождаемый к тому же ухудшением свойств и долговечности бетонов;

9) нередко вводимым в состав бетона высокодисперсным минеральным добавкам и наноразмерным компонентам наделяют кристаллозатравочные функции, что выглядит малореальным и даже архаичным в свете представленных в п. 4 сведений;

10) до сих пор не понятен механизм ползучести бетонов под нагрузкой; если это – следствие ослабления межзерновых связей (что не вызывает сомнений), то почему же в подавляющем большинстве случаев прочность бетона после испытаний выше исходной?

11) если цементный камень (бетон) – механическое, данное «на века» соединение компонентов, то чем пояснить его высокую чувствительность и адаптационную способность к вибрационным, температурным, электромагнитным и прочим воздействиям?

12) критерием качества несущих бетонов считается прочность, что, вряд ли, можно считать справедливым, учитывая приведенные в пп. 7,10,11 данные; несравненно более высокая ценность структурной стабильности и эксплуатационной надежности бетона.

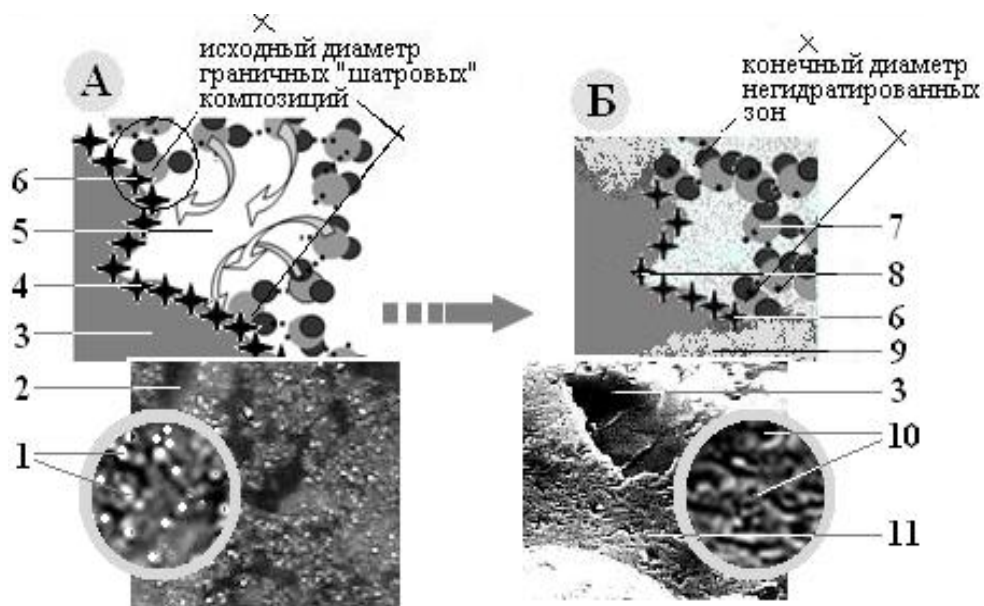
Эта неопределенность приводит не столько к теоретическим изъяснам (с чем еще можно было бы мириться), сколько к огромным материальным потерям. Сложно подсчитать, сколько за все эти десятилетия изготовлено (и изготавливается!) заведомо ущербных железобетонных конструкций и

сооружений, которые с завидным постоянством разрушаются с нередко трагичными последствиями, сколько «выброшено на ветер» дорогостоящего цемента и энергоносителей.

### Решение проблемы

Между тем, гидратационная проблема поясняется достаточно просто с учетом определяющей роли не вторичных и зависимых (гидролизных, растворительных и т.п.) явлений, а электроповерхностных преобразований, которые неизбежны, учитывая огромную энергетическую активность дисперсной твердой фазы и полярность, ассоциированность жидкой среды. Взаимодействие реагентов протекает в условиях интенсивной электрической поляризации поверхностных слоев цементных частиц, на что указывает их положительный заряд (А.Е. Шейкин, И.А. Лобанова), величина которого «не остается постоянной...неоднократно она увеличивается и понижается» (Г.Р. Вагнер и др.). При соприкосновении портландцемента с водой на границе раздела фаз мгновенно формируется пространственный полимолекулярный слой диполей, уточнение «конструктивного устройства» и метастабильности которого имеет принципиальное значение для представления сценария развития гидратационного процесса.

Анализ исследований в области структуры и свойств граничных слоев воды гетерогенных систем (Б.В. Дерягин, Ф.Д. Овчаренко, Ю.И. Тарасевич, Н.В. Чураев, Е.Д. Щукин и др.) и особенностей адсорбционных явлений в вяжущих материалах (И.Н. Ахвердов, В.В. Капранов, Л.Б. Сватовская, Г.Н. Сиверцев, и др.) позволил заключить о пористом (шатровом) строении граничных кластеров (диаметром до 0,5 мкм), что косвенно подтверждается выполненными автором микроскопическими испытаниями (рис. 2, А). Причина неравновесности энергетических комплексов очевидна – наличие под дипольными сводами ненасыщенных зарядов (связей ионов кальция в структуре минералов) и динамизм полимолекулярной системы (колебательное и вращательное движение диполей, постоянное разрушение и возобновление структуры кластеров).



1- переходные энергетические комплексы; 2-поверхность клинкерного зерна; 3-массив зерна; 4-активный центр; 5-дипольный свод; 6-адсорбционный центр; 7-молекулы воды; 8-остаточный активный центр; 9-гидратный продукт; 10-гидратная оболочка; 11-остаточные поверхностно-активные зоны

Рисунок 2. Схема и общий вид начального (А) и конечного (Б) состояния взаимодействующей цементной системы

Развитие комплекса идет по пути эстафетного ослабления и разрушения водородных связей, «скатывания» по внутренней поверхности сводов и концентрации диполей у адсорбционных центров (показано стрелками на рис. 2, А). Протекает относительно продолжительный начальный подготовительный (индукционный) период – «период накопления на клинкерных зернах свободных носителей заряда» (М.М. Сычев), достигающий критического уровня, с последующим быстротечным (взрывообразным) разрушением водородных и химических связей системы. Часть ионов кальция из структуры минералов выталкивается в поровую жидкость (начало основной экзотермии); образовавшиеся высокорреакционные продукты распада молекул воды (гидроксоний, модификации гидратов протона) взаимодействуют с кремнекислородными гидролизными остатками твердой фазы. Появившийся гидратный продукт в виде рыхлых локально рассредоточенных аморфных

скопления покрывает поверхность цементных частиц. Нейтрализованные зерна интенсивно потребляют порцию диполей для формирования очередного переходного энергетического комплекса, в межзерновых пустотах равняется вакуум (обнаруженным Б.Г. Скрамтаевым в 40-х годах прошлого столетия), стягивающий частицы, формирующий будущий цементный камень, что внешне проявляется начальным скачком пластической прочности ( $P_m$ , «I») цементных составов (рис. 3).

Твердение цементных материалов, таким образом, заключается в чередовании индукционных (подготовительных) периодов и моментов химического взаимодействия цементных минералов с водой затворения (I, II, III, ..., рис. 3), что полностью согласуется с фундаментальным положением химической кинетики гетерогенных реакций, предусматривающей переход системы из исходного в конечный вид посредством формирующегося на границе раздела фаз переходного активированного комплекса (Т.В. Кузнецова, И.В. Кудряшев, В.В. Тимашев). В пластичной стадии (до максимума экзотермии) индукционные интервалы при нормальной температуре твердения бездобавочного цемента обычного минералогического состава составляют  $90 \pm 10$  минут. По мере уменьшения количества активных диполей, снижения диаметра переходных шатровых композиций, повышения вследствие этого энергии межмолекулярных водородных связей «шатровых» структур, указанные десятки минут превращаются в часы, сутки, месяцы...

Взаимодействие цементных минералов с водой затворения осуществляется в плотной области двойного электрического слоя (обведено на рис. 2, А), в связи с чем, водоцементный фактор и присутствие заполнителей не оказывают влияния на качественную сторону процесса. Определенные моменты, свидетельствующие о качественно новом этапе твердения (начало экзотермии, скачки структурной прочности, переломные точки кинетических кривых электрофизических, акустических, динамических и др. свойств), наблюдаются в твердеющем материале в одно время вне зависимости от консистенции, являются константой конкретного цемента.

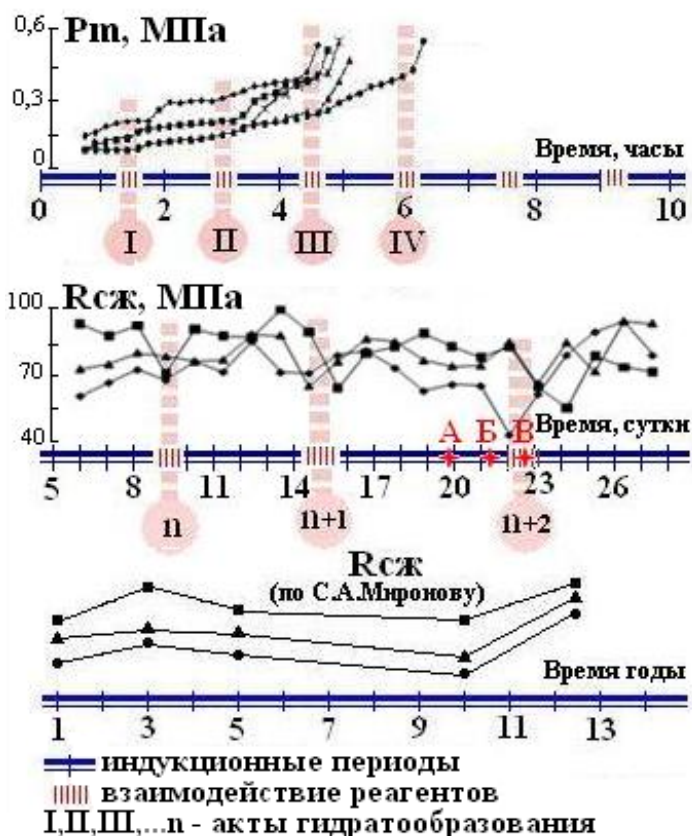


Рисунок 3. Схема твердения цементных систем при обычных температурно-влажностных условиях

Следует отметить исключительно поверхностный характер гидратационного процесса. В жидкую среду из структуры цементных минералов выбрасывается преимущественно ион кальция; кремнекислородные анионы, удерживаемые молекулярными силами, остаются в массиве твердой фазы, гидратируются продуктами распада диполей, образуя водонепроницаемый экраный барьер. Толщина гидратной оболочки постоянна, не превышает 1,5...2,0 мкм, соответственно глубина химического использования плотного тела цементного зерна составляет конкретную и конечную величину, оцениваемую считанными долями микрона. Данный аспект подтверждается отсутствием заметных «габаритных метаморфоз» цементных зерен при любых временных и температурно-влажностных условиях твердения. Следовательно, такое понятие, как «предельное



использование клинкерного фонда» должно включать не глубинный, а поверхностный смысл.

Пульсирующий характер развития и распада переходных энергетических комплексов, стадийность химизма явления приводят к последовательному заполнению аморфным клеевым гидратом поверхности клинкерных частиц. Логическое завершение процесса – образование в гидратной массе остаточных поверхностно-активных зон, обнаруживаемых электронной микроскопией в виде рассредоточенных сферических пор и каналов в гидросиликатной массе диаметром 0,1...0,3 мкм (рис. 2, Б; рис. 4). Относительная стабильность этих зон определяется энергией водородных связей адсорбированных кластеров, повышающихся по мере снижения количества ассоциированных диполей. Тем не менее, не прекращающееся ни на мгновение развитие комплексов приводит к очередным гидратационным преобразованиям, появлению продукта с увеличением объема твердой фазы, возникновению внутренних структурных напряжений с неизбежным сбросом прочности, что и является причиной «пилообразного» характера отвердевания.

Поверхностно-активные зоны без преувеличения можно назвать «минами замедленного действия». Непрекращающийся естественный процесс приводит к срабатыванию «мин» на любом, сложно прогнозируемом на данный момент, этапе существования микробетона (бетона и железобетона в целом) с непременным деструктивным сопровождением (рис. 3). Отсутствие повсеместных и массовых аварийных ситуаций и катастроф – отнюдь, не опровержение данной позиции, а подтверждение асинхронности гидратационного «срабатывания» клинкерных частиц в массиве композита.

Эта «асинхронность» вызвана масштабно-временным фактором и температурно-влажностным разбросом по объему твердеющего бетона, градиентом скорости гидратационного процесса, соответственно, формированием в различных микрообъемах бетона остаточных поверхностно-активных зон с отличной степенью энергетического развития. Однако, вряд ли, стоит обольщаться данным «асинхронным» обстоятельством. При

определенных условиях отмеченные аспекты могут «сойтись в одной точке» и привести к весьма нежелательным результатам, что давно отмечалось в виде внезапного разрушения бетона «без видимых на то причин».

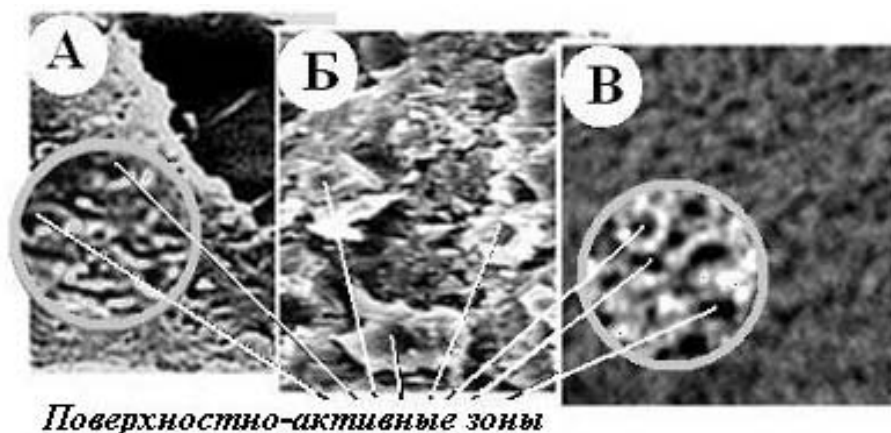


Рисунок 4. Фрагменты поверхности гидратированных цементных зерен трехмесячного (А, Б) и 105-летнего (В) возраста

Таким образом, периодические сбросы прочности, безусловно, связанные с гидратационными преобразованиями – объективная и неизбежная реальность, сопровождающая всю стадию существования бетона (железобетона) как строительного материала. Периоды сброса прочности чередуются с ее ростом, вследствие залечивания образующихся микротрещин новыми порциями гидросиликатного продукта. При этом сбросы прочности, как отмечал В.А. Кинд, падают «на определенные сроки твердения», что нашло полное подтверждение – как видно (рис. 3), в исследованном временном интервале твердения (6...28 суток) сбросы прочности в цементном камне с различным В/Ц имели место в районе 9, 14...15 и 21...22,5 суток.

С точки зрения надежности опасны инициирующие гидратационный процесс внешние (силовые, вибрационные, температурные, электромагнитные и др.) воздействия, приводящие к активации адсорбционно-связанной воды и химическому взаимодействию компонентов на значительном количестве цементных частиц, что может иметь серьезные последствия. При этом установлено значительное влияние временного фактора осуществления указанных инициирующих воздействий. Их приложение в индукционных структурно-стабильных периодах (точки «А», «Б», рис. 3) менее опасно, <http://ntk.kubstu.ru/file/494>

нежели наложение в момент собственных структурных преобразований микробетона и сбросов прочности («В»).

С позиций представленной стадийно-поверхностной схемы твердения цемента очевиден путь повышения эксплуатационной надежности несущих бетонов – не противодействие реально протекающему процессу и обеспечение благоприятных условий для полноты и завершенности поверхностных преобразований, получения тем самым структурно-стабильного микробетона. Это достигается обоснованным выбором гранулометрии и морфологии крупного и мелкого заполнителей, достаточным количеством воды затворения, осторожным применением пластификаторов (тем более, современных, отличающихся повышенным водоредуцирующим действием) и противоморозных добавок-электролитов (характеризующихся «положительной» по О.Я. Самойлову гидратацией), термохимической активацией воды, обеспечением исключительно влажностных условий твердения и др. Эффективно незаслуженно забытое активное силовое сопровождение твердения бетона и железобетона (оптимальное время укладки и уплотнения бетонной смеси, повторное и циклическое вибрирование твердеющих изделий, раннее нагружение бетонных и железобетонных, в том числе, предварительно напряженных конструкций).

Особого внимания заслуживает набирающее обороты высотное монолитное строительство. Стало распространенной порочной практикой усиление растрескивающихся железобетонных колонн обоями из силового проката, которые, вряд ли, окажут свою защитную функцию в форс-мажорных ситуациях (при пожаре на нижних этажах). Замена воды гиперпластификатором, повсеместное обезвоживание конструкций, естественное твердение и прочие выше отмеченные внешне привлекательные, но по своей сути совершенно противоречащие формированию структурно-стабильного бетона, могут сыграть свою зловещую роль в эксплуатационный период.

Очевидна срочная корректировка нормативно-технологической документации (ГОСТов, СНиПов, ТУ и пр.), касающихся диагностики и характеристики портландцемента и его разновидностей, классификации и области рационального применения высокодисперсных минеральных модификаторов, пластификаторов, добавок-электролитов. Целесообразна более четкая и однозначная формулировка таких критериев, как прочность, долговечность и надежность бетонов, внешних силовых и особых воздействий, с непременным учетом естественных и спровоцированных этими воздействиями гидратационных и деструктивных процессов. Проще говоря, давно назрела необходимость кардинальной чистки многострадального отечественного строительного бетоноведения, до предела засоренного умозрительными, условными и сомнительными понятиями и рекомендациями.

#### Заключение

Отечественная строительная индустрия, несмотря на кажущиеся успехи и благополучие, находится в весьма удручающем состоянии. Развитие отрасли, к сожалению, идет по пути слепого копирования не всегда безупречных зарубежных аналогов. В качестве примера можно привести повсеместно тиражируемые самоуплотняющиеся гиперпластифицированные бетоны, позволяющие за счет непрерывной гранулометрии компонентов и значительного (до 50 %) снижения расхода воды получать заоблачные марки бетона. А как же все это согласуется с высказыванием авторитетов с мировым именем В.В. Бабкова, А.Ф. Полака, П.Г. Комохова: «Необходима осторожность при использовании бетонов высоких классов прочности в несущих конструкциях в том случае, если эта прочность достигается сочетанием низких В/Ц и добавок суперпластификаторов»?

Основная проблема – отсутствие теоретического сопровождения бетонного производства. Теория твердения повсеместно заменена банальным кубико-прочностным подходом. Мало проблемная прочность (достигаемая широко известными, простыми и отработанными методами), приобрела статус основного критерия качества несущего бетона (железобетона), в то время как

существуют еще такие понятия, как долговечность (стойкость в агрессивных средах) и эксплуатационная надежность (сохранение функциональных свойств при воздействии особых нагрузок). И какой же из этих категорий является определяющим, требующим особо трепетного и внимательного подхода? Наверное, все-таки, надежность. А как управлять этой надежностью в сложившемся теоретическом вакууме?

Взаимодействие двухфазной цементной системы должно сводиться к теории активированного комплекса, предусматривающего возникновение в межфазном пространстве некоторого промежуточного энергетического состояния при переходе от исходных веществ к конечным продуктам, что является фундаментальным принципом гетерогенных реакций. Следовательно, исходным актом гидратационного процесса должны быть не гидролизные, химические и подобные преобразования, а формирование переходного комплекса, включающего активные центры цементных зерен и упорядоченные построения диполей. Образование, развитие и распад комплексов протекает стадийно, что и является причиной давно известного, но часто игнорируемого, скачкообразного отвердевания портландцемента и материалов на его основе. Уточненное «конструктивное устройство» переходного комплекса, представляющего собой динамичную шатровую композицию, позволило описать исключительно поверхностный характер гидратации клинкерных частиц, конкретизировать «движущую силу» структурообразования, определить морфологию и свойства конечного продукта – микробетона и бетона в целом.

Как видно, необходимо кардинальное решение гидратационного вопроса. Из разрозненных фактов и собственного экспериментального багажа авторы обосновали стадийно-поверхностный подход к этой «навязшей в зубы» проблеме. Удачен он или не очень, но многие до сих пор существующие и не решенные вопросы нашли свою логическую трактовку и экспериментальное подтверждение. Хочется надеяться, что развитие и уточнение предлагаемого направления позволит усовершенствовать теоретическую базу, создать

надежный теоретический фундамент, реализовать действительно осмысленное производство сборной и монолитной железобетонной продукции с повышенной эксплуатационной надежностью, поднять отечественную строительную практику на принципиально новый, научно обоснованный уровень.

### *KEY ISSUES CONSTRUCTION BETONOVEDENIYA*

**G.N. PSHENICHNYY, V.F. CHERNYKH**

*Kuban State Technological University,  
2, Moskovskaya st., Krasnodar, Russian Federation, 350072*

Marked shortcomings of the existing three-stage scheme of hardening Portland cement and some still unresolved issues, making doubtful opportunity cart-directed organization and reinforced concrete technology. Shown optionally-divergence accounting fundamental surface phenomena occurring at the interface "cement grain - water." The interaction of heterogeneous cement system is accomplished by the stepwise formation in the interfacial transition zone of the energy-matic complex with its development (own accumulation of energy), achievements-tion critical level decay (the appearance of active particles) and the chemistry of processes-sa. Presented "driving force" of structure - a vacuum developing in intergranular voids system by periodic consumption of cement mine-ralami servings dipoles. Refined morphology microconcrete - product consisting of amorphous silicate in the United monolith surface hydrated tse-grain-element, the distinctive feature of which is the presence of locally-rassre dotochennyh surfactants areas requiring accounting construction practice.

**Key words:** hydration of cement, stage-surface process, concrete microconcrete residual surfactants zone, strength, durability and reliability-concrete.