

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СОБЫТИЯ В СТРУКТУРНОМ РАЗВИТИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОМПОЗИТОВ

**Выровой В.Н.**, д.т.н., профессор,  
**Суханов В.Г.**, д.т.н., профессор,  
**Виноградский В.М.**, к.т.н., доцент

*Одесская государственная академия строительства и архитектуры*  
vyrovoy@ukr.net

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы формирования структуры твердеющих минеральных вяжущих в результате реализации базовых событий и возникающих сопутствующих процессов. Показано, что самосогласованность событий и вызванных ими явлений создают динамический структурный портрет развивающейся системы. Подчеркивается, что изменения температуры и объемных деформаций являются «тенью» событий и не позволяют идентифицировать само технологическое событие. Указывается, что развитие фоновых процессов предопределяет кинетику саморазвития структур развивающихся систем

**Ключевые слова:** структура, экзотермия, эндодеформации, температура, объем, градиенты.

## ТЕХНОЛОГІЧНІ ПОДІЇ В СТРУКТУРНОМУ РОЗВИТКУ БУДІВЕЛЬНИХ КОМПОЗИТІВ

**Вировой В.М.**, д.т.н., професор,  
**Суханов В.Г.**, д.т.н., професор,  
**Виноградський В.М.**, к.т.н., доцент

*Одеська державна академія будівництва та архітектури*  
vyrovoy@ukr.net

**Анотація.** Розглянуто питання формування структури мінеральних в'язучих, що твердіють, в результаті реалізації базових подій та виникаючих супутніх процесів. Показано, що самоузгодженість подій і викликаних ними явищ створюють динамічний структурний портрет розвиваючої системи. Підкреслюється, що зміни температури та об'ємних деформацій є «тінню» подій та не дозволяють ідентифікувати саму технологічну подію. Вказується, що розвиток фонових процесів визначає кінетику саморозвитку структур систем, що розвиваються.

**Ключові слова:** структура, екзотермія, ендодеформації, температура, об'єм, градієнти.

## TECHNOLOGICAL EVENTS IN STRUCTURAL EVOLUTION OF BUILDING COMPOSITES

**Vyrovoy V.N.**, Doctor of Engineering, Professor,  
**Sukhanov V.G.**, Doctor of Engineering, Professor,  
**Vynohradskyi V.M.**, PhD., Assistant Professor  
*Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*  
vyrovoy@ukr.net

**Abstract.** The technology is considered in the form of realization of a particular cycle of

events. Each event defines the energy condition of the system, which is expressed through change of the average value of temperature. At the same time the temperature is a response to the event has already occurred and it can not identify the cause and nature of evolution of a basic event. Therefore, the qualitative description of interrelation of events of the different nature with processes that accompany them has been defined in the form of a task of the analysis. The analysis has shown that temperature gradients arise in local volumes of system and initiate self-moving processes of its organization. Average values of temperature changes don't give possible to objectively evaluate the nature and features of evolution of initial event and its role in formation of multi-scale structure of objects-systems. Deformations that are initiated by events and temperature changes are actively participate in structural transformations of the system local areas. It is emphasized that the evolution of background events predetermines the progress of the structural changes of complex systems-objects. It was concluded that it is necessary to consider the phenomenon of self-activation of mutual influence of events and processes caused by them for the predicted evolution of the multi-scale structures providing the required properties of building composites.

**Keywords:** structure, exotherm, endodeformations, temperature, volume, gradients.

**Введение.** Представление строительных конструкций в виде систем априорно предполагает их определенное структурное оформление. Организация структуры зависит от качественного состава и количественных соотношений исходных компонентов, геометрических характеристик изделия и технологических условий и режимов приготовления бетонной смеси и ее переработки в конструкцию-систему. Таким образом, технология является одним из основных факторов управления структурой и, следовательно, свойствами композиционных строительных материалов и конструкций.

В общем случае понятие *технология* (от греч. *techne* – искусство, мастерство, умение и *logos* – слово, учение) включает в себя как технологию-практику – совокупность методов и производственных процессов в определенной отрасли производства, так и технологию-науку – научное описание способов производства и процессов и явлений, которые происходят при переработке исходного сырья в потребительский продукт. Сахал Д. [1] предлагает использовать идеи и методы системного подхода для более полного раскрытия понятия технологии. Общим для технологии-практики, технологии-науки и технологии-системы следует считать обязательное наличие определенного комплекса событий, реализация которых позволяет получать из исходного сырья конечный продукт – в нашем случае конструкцию-систему. К событиям можно отнести химические, физические, физико-химические, механические и многие другие процессы и явления, связанные с взаимодействием веществ и организацией структуры материалов. Реализация каждого события в системе происходит, как правило, с изменением энергетического состояния взаимодействующих веществ, которое вызывает изменение температуры и объема систем.

**Цели и задачи.** Исторически так сложилось и методологически закрепилось, что явления, которые возникают в результате протекания базового неизбежного события, трактуются как информационно насыщенные процессы, изучив которые можно ретроспективно описать само событие. На самом деле изменение температуры и объема являются своеобразными тенями, которые отбрасывают базовые события. Эти тени достаточно сложно организованные, поскольку не исключены ситуации, при которых тень включает в себя «отражения» различных по природе, интенсивности проявления и времени действия разных событий. Контуров теней, совмещаясь и сливаясь друг с другом, размыты до неузнаваемости, что не позволяет идентифицировать события их создающие. Платон (428-348 гг. до н.э.) в диалоге «Софист» отмечал, что «...тени, когда с огнем смешивается тьма, затем двойное отображение, когда собственный свет предмета и чужой сливаются воедино и порождают отображение, которое производит ощущение, противоречащее прежней причинной видимости». «Отображения» протекающих индивидуальных событий в виде своеобразных теней, не локализованы ни во времени, ни в пространстве. Причинные связи между событиями и сопровождающими их процессами скрыты усредненными параметрами

последних. Это ведет к уменьшению, а иногда и к невольной фальсификации, информации о протекающих событиях, что затрудняет выявление действенных факторов управления технологическими процессами. Особенно информационная неадекватность между событиями и инициируемыми ими процессами характерна для сложноорганизованных самоорганизующихся объектов-систем. В то же время отображения в виде теней, возникнув в результате реализации базовых событий, сами становятся активным фоном, инициирующим протекание последующих событий. Не исключены ситуации, при которых смещение во времени проявления и углубления протекания события и появление и развитие сопутствующих процессов сокращается, что характерно для систем с многоочаговыми источниками реализации тех или иных событий. В этих случаях трудно отделить событие от процессов им вызванных. В связи с этим возникает задача проведения анализа возможных механизмов взаимодействия и взаимовлияния базовых событий и процессов ими вызванных с целью инициирования образования структур с требуемыми параметрами.

**Объекты и методы анализа.** На начальных этапах исследований в качестве объекта изучения приняты цементно-водные композиции, которые представлены в виде грубодисперсных высококонцентрированных лиофобных систем с лиофильной межфазной границей раздела [2, 3]. Выделение цементно-водных композиций в качестве самостоятельных объектов анализа связано с неоспоримым фактом их непосредственного влияния на создание бетона как многоцелевого материала. Отличительной особенностью рассматриваемых систем является полиминеральность и полидисперсность частиц дисперсной фазы, что предопределяет протекание поверхностных явлений и связанных с ними структурных трансформаций отдельных объемов и всей дисперсной системы.

Получение таких композиций сопровождается самопроизвольным переформированием межфазной поверхности раздела с Т-Г в Т-Ж, что ведет к изменению энергетического состояния системы [4]. Средняя температура является блеклой тенью, согласно принятой в статье терминологии, тех событий, которые происходят в локальных участках межфазных взаимодействий. Использование частиц одной природы, но разных формы и размеров ведет к изменению температуры в локальных участках системы. Это происходит на фоне возникновения температурных градиентов между поверхностью и объемом частиц и между поверхностью частиц и окружающей дисперсионной средой. Температурные градиенты способствуют развитию внутреннего массопереноса, диффузионным процессам, активации поверхностных явлений и т.п. Таким образом, в системе, содержащей мономинеральные частицы дисперсной фазы, самопроизвольно возникают локальные возмущения или неравновесные состояния, которые предопределяют дальнейшие структурные преобразования.

Полиминеральность частиц дисперсной фазы априорно предполагает влияние изменение температуры каждой индивидуальной частицы на изменение средней температуры системы. Для полиминеральных и полидисперсных систем возможны следующие ситуации: - отдельные частицы являются мономинеральными; - каждая частица является полиминеральным образованием; - система состоит из моно- и полиминеральных частиц с различными количественными соотношениями между ними. Перечисленные случаи характерны, с различными вариациями, для реальных систем и способствуют возникновению локальных неуравновешенных состояний, уникальность которых скрыта в усредненных изменениях температуры. Можно заключить, что первый пик тепловыделения при образовании дисперсных систем определяется локальными экзотермическими эффектами, вызывающими локальные неуравновешенные состояния и предопределяющими, тем самым, протекание дальнейших физико-химических процессов гидратации и физико-механических процессов структурообразования.

Высокая концентрация частиц дисперсной фазы предполагает, что они находятся в зонах ближней или дальней коагуляции [2]. В этих условиях все моно- и полиминеральные частицы, с учетом их полидисперсности, находятся под действием неуравновешенных сил межчастичных взаимодействий [3]. В лиофобных системах снижение избыточной

поверхностной энергии (энергии Гиббса), которая превращает систему в неравновесную, происходит за счет сокращения межфазной площади поверхности раздела [4, 5]. В системе происходит внутренняя переорганизация, при которой при сохранении общего объема и общего количества частиц наблюдается их неравномерное распределение. В результате в дисперсной системе возникают принципиально новые структурные составляющие – структурные блоки (кластеры) и межблочные (межкластерные) поверхности раздела [3, 6]. Эти процессы предопределяют наступление и развитие последующих технологических событий.

Внутреннее распределение частиц по структурным блокам происходит одновременно с лиофилизацией их поверхности. В системе начинают реализовываться важные и достаточно полно и подробно описанные в специальной литературе события – физико-химические процессы гидратации минеральных вяжущих [7, 8]. Реализация новых событий осуществляется на фоне протекающих процессов возникших в результате произошедших предыдущих событий. Принципиальная схема развития событий и сопровождающих их процессов представлена на рис. 1.

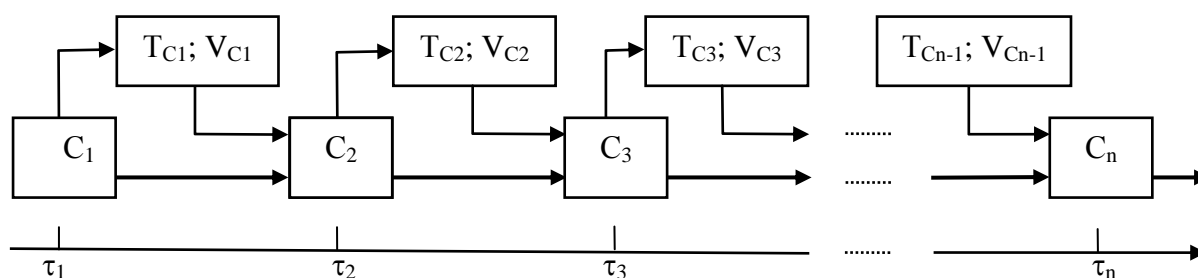


Рис. 1. Схема развития событий и процессов их сопровождающих:  
 $C_1 \dots C_n$  – развитие базового события;  
 $T_{c1} \dots T_{C_{n-1}}$  – изменение температуры;  
 $V_{C1} \dots V_{C_{n-1}}$  – изменение объема.

Неизбежность осуществления события  $C_2$ , в нашем случае взаимодействие минералов зерна цемента с водой, очевидна. При этом кинетика протекания совокупных процессов гидратации определяется начальной температурой взаимодействующих фаз и перепадом температур в локальных участках дисперсной системы. В свою очередь возникающие сопутствующие явления оказывают влияние на эффективность реализации новых событий  $C_3 \dots C_n$ , что усугубляет влияние локальных изменений температуры на суммарные процессы гидратации минеральных вяжущих.

Распределение поли- и мономинеральных зерен цемента по структурным агрегатам предполагает многоочаговой характер развития событий гидратации с определенным сдвигом по времени в зависимости от химической активности каждого индивидуального минерала цемента. В связи с этим сопутствующие процессы вызванные событиями  $C_1$  и  $C_2$  являются своеобразными катализаторами инициации событий  $S_1$ . В свою очередь сопутствующие процессы событий  $S_2$  и  $S_3$ , интегрируя, способны повлиять на кинетику развития событий  $C_3$  и  $M_1$ , рис. 2.

Идентифицировать источник возникновения и развития протекающих процессов после определенного промежутка времени становится проблематично. При этом происходит самоподдержка градиентов температуры (за счет углубляющихся процессов гидратации) между поверхностью частиц и их объемом, между поверхностью и окружающей дисперсионной средой, а также между сопряженными минералами, принадлежащими одному зерну цемента [9]. Повышенная скорость тепловыделения трехкальциевого алюмината по сравнению со скоростью тепловыделения трехкальциевого силиката [7, 10, 11] предполагает неравномерное распределение температур при гидратации полиминерального

зерна цемента.

Ионы новой фазы направленно мигрируют в результате проявления эффектов термодиффузии (эффектов Соре [12]). Это ведет к локальным флуктуациям концентрации продуктов новообразования, формируя сложную мозаику взаимодействий ионов различного вида, взаимодействие которых образуют зародыши новой фазы и создают своеобразную аморфную составляющую цементного камня, в которой трудно идентифицировать качественный и количественный составы. Используя результаты ряда авторов [7, 8, 13] можно предложить для обсуждения термо- и объемокинетические зависимости, учитывающие характер тепловыделения и объемных изменений индивидуальных минералов и всей системы, рис. 3.

Экспериментальные данные показывают, что характер тепловыделения полиминерального зерна цемента (кривая 3, рис. 3.) не позволяет в полной мере получить достоверную информацию о событиях, протекающих в отдельных минералах. Еще меньше информации содержат данные по кинетике тепловыделения при гидратации цементных композиций как полиминеральных и полидисперсных систем. Многоочаговый механизм гидратации инициирует энергетический хаос в системе. При этом важно, что явления, которые возникают как следствия происходящих событий, могут стать инициаторами дальнейших химических процессов. Системы с достаточно сложным исходным качественным и количественным составом частиц дисперсной фазы самопроизвольно выстраивают пути самоинициации физико-химических, физических и физико-механических процессов гидратации и многомасштабной структурной организации. Одно из главных мест в этих процессах занимают тепловые эффекты, возникающие как следствие и являющиеся причиной углубления явлений самоорганизации. В силу того, что в эти временные промежутки происходит «достраивание» структуры производимыми системой продуктами новой фазы, то такие системы следует отнести к аутопоэзисным системам [14].

Для выявления факторов управления процессами самодвижения системы важно учитывать не совокупные энергетические процессы, а ее самопроизвольное стремление к минимизации внутренней энергии путем образования разномасштабных структурных блоков организованных по принципу дальнего или ближнего порядка, с учетом локальных градиентов температур и концентраций. Использование усредненных данных по изменению температуры твердеющих минеральных вяжущих малоинформативно и не позволяет объективно определить действенные рецептурные и технологические факторы, которые позволяют управлять комплексными процессами эволюции с учетом явлений самоорганизации структуры системы.

Экзотермические эффекты, как неизбежные процессы, возникающие при реализации определенных событий, непременно приводят к изменению объема отдельных частиц дисперсной фазы и всей системы. Кроме того начальное изменение объема происходит в момент образования системы путем формирования межфазной поверхности раздела за счет адсорбции молекул воды на поверхности частиц. Изменения объема, которые возникают в результате реализации тех или иных событий, характерных для данной системы, инициируют развитие эндодеформаций. Под эндодеформациями (гр. endon – внутри; лат. deformation – изменение) понимаются деформации, которые проявляются и протекают «внутри» системы и причиной возникновения которых являются физико-химические и физико-механические явления и процессы гидратации и структурообразования вяжущих и материалов на их основе. Эндодеформации являются сопутствующими процессами при реализации определенных событий (например, процессов адсорбции, физико-химических процессов гидратации, процессов кристаллообразования, массопереноса и т.п.). К событиям, которые провоцируют развитие объемных изменений, следует отнести возникающие термические эффекты. Можно заключить, что часть эндодеформаций представляет собой «тень теней», которые «отбрасывают» базовые события и, одновременно, могут сами инициировать развитие тепловых эффектов.

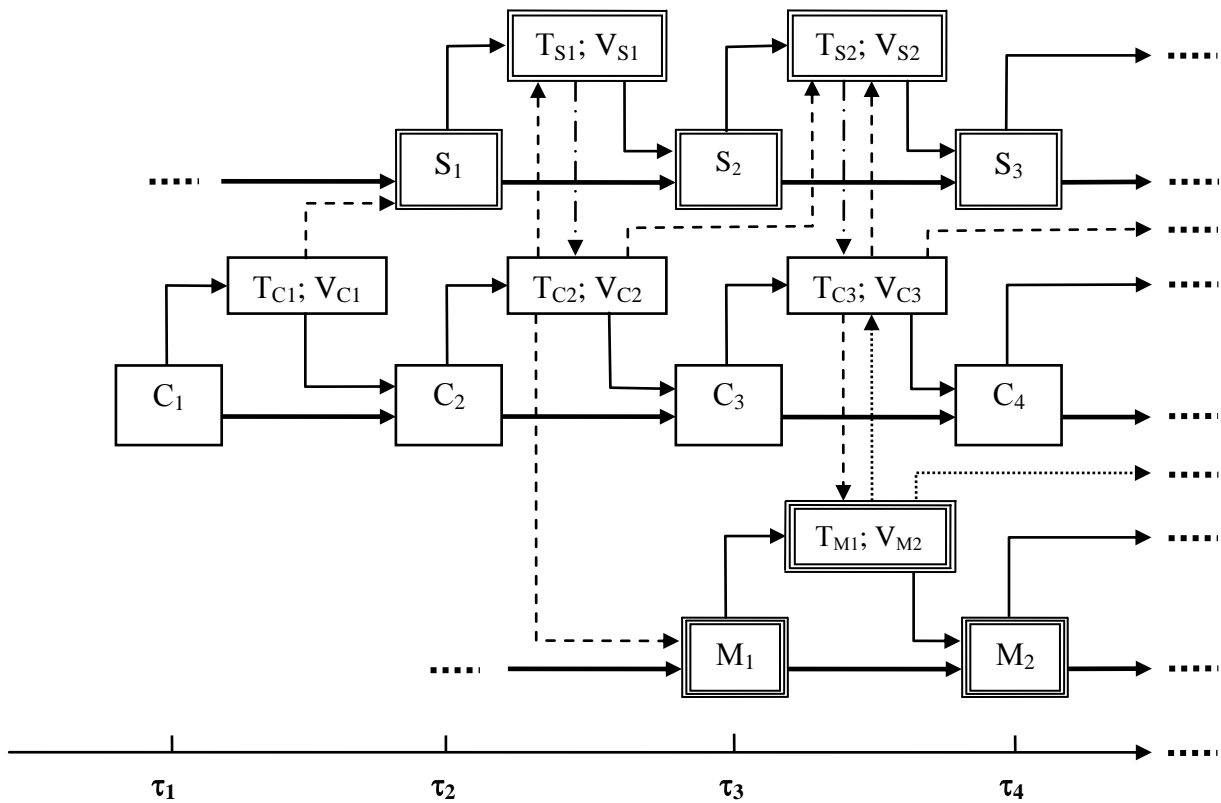


Рис. 2. Развитие многоэтапных взаимосвязанных событий:  
 $C_1 \dots C_4; S_1 \dots S_3; M_1 \dots M_2$  – базовые события;  
 $T_c; T_s; T_m; V_c; V_s; V_m$  – изменение температуры и объема  
при развитии событий.

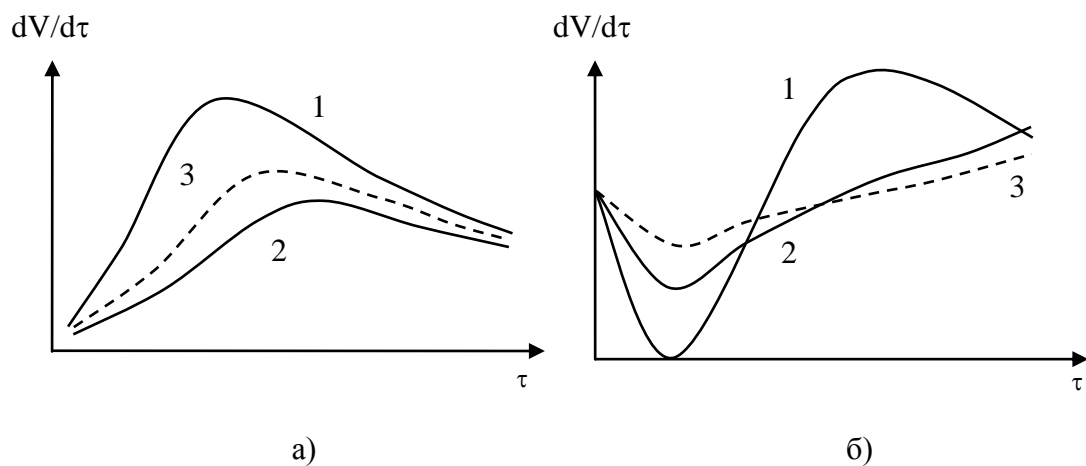


Рис. 3. Кинетика тепловыделения (а) и объемных изменений (б)  
одинарных и бинарных минералов:  
1 – трехкальциевый алюминат ( $C_3A$ );  
2 – трехкальциевый силикат ( $C_3S$ );  
3 – усредненное тепловыделение  
полиминеральной системы ( $C_3A + C_3S$ ).

Возникнув в результате комплекса разноплановых процессов, эндодеформации предопределяют пути структурной перестройки путем создания токов переноса тепловой энергии, что, в свою очередь, стимулирует дальнейшее развитие физико-химических процессов, вызывая появление новых деформационных потоков. Взаимообусловленность тепловых и деформационных процессов не позволяет рассматривать их изолированно друг от друга. Появившись как результат уже произошедших событий, термические эффекты и эндодеформации определяют грядущие процессы, участвуя в организации разномасштабной структуры системы. При этом их участие связано с общими процессами определенного вектора развития системы через развитие локальных событий структурного оформления становящейся и уже образованной системы.

**Выводы.** Эндодеформации, наряду с термическими эффектами, являются составляющими структурного «портрета» системы и представляют ее в движении, которое является ее естественным состоянием. Динамика структуры основана на самоактивации взаимного влияния событий и вызванных ими процессов друг на друга, своеобразном координировании поведения материальной составляющей путем формирования локализованных направленных ручейков и потоков. В результате такой взаимной стимуляции реализуются явления самоорганизации, что может привести к требуемому макросостоянию системы. Необходимы технологические, рецептурные и методологические усилия, которые способны определить достойные факторы управления поведением для целого класса систем с многоочаговыми источниками структурного разнообразия с целью получения конечного продукта с нормируемым набором свойств.

### Литература

1. Сахал Д. Технический прогресс: Концепции, модели, оценки / Д. Сахал. – М.: Финансы и статистика, 1985. – 366 с.
2. Урьев Н.Б. Высококонтрированные дисперсные системы / Н.Б. Урьев. – М.: Химия, 1980. – 320 с.
3. Соломатов В.И. Кластерообразование композиционных строительных материалов / В.И. Соломатов, В.Н. Выровой // Технологическая механика бетона. – Рига, 1985. – С.5-21.
4. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии / Ю.Г. Фролов. – М.: Химия, 1982. – 400 с.
5. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах / П.А. Ребиндер. – М.: Наука, 1979. – 384 с.
6. Композиционные строительные материалы и конструкции пониженной материалоемкости / В.И. Соломатов, В.Н. Выровой, В.С. Дорофеев, А.В. Сиренко. – Киев: Будівельник, 1991. – 144 с.
7. Пашенко А.А. Теория цемента / А.А. Пашенко, Е.А. Мясникова, В.С. Вилен [ и др.]. – Киев: Будівельник, 1991. – 168 с.
8. Штарк Й. Цемент и известь / Й. Штарк, Б. Вихт. – Киев: Оранта, 2008. – 469 с.
9. Тейлор Х. Химия цемента / Х. Тейлор. – М.: Мир, 1996. – 560 с.
10. Ушеров-Маршак А.В. Тепловыделение цемента / А.В. Ушеров-Маршак. – М.: ВНИИЭСМ, 1980. – 68 с.
11. Кривенко П.В. Щелочные цементы / П.В. Кривенко, Р.Ф. Рунова, М.А. Саницкий, И.И. Руденко. – Киев: ООО «Основа», 2015. – 448 с.
12. Кузьменко П.П. Электроперенос, термперенос и диффузия в металлах / П.П. Кузьменко. – Етев: Вища школа, 1983. – 152 с.
13. Коробко О. А. Объемные изменения моно- и полиминеральных вяжущих в начальные периоды схватывания и твердения / О.А. Коробко, В.Н. Выровой. // Вісник ОДАБА – 2001. – Вип.3. – С.113-117.
14. Матурана У. Древо познания: Биологические корни человеческого понимания / У. Матурана, Ф. Варела. – М.: Изд-во «Прогресс - Традиция», 2001. – 224с.