

## ХАРАКТЕР ИЗМЕНЕНИЯ ПОВРЕЖДЕННОСТИ ДОРОЖНЫХ БЕТОНОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ УВЛАЖНЕНИИ И ВЫСУШИВАНИИ

**Коробко О.А.,** к.т.н., доцент,  
**Уразманова Н.Ф.,**  
**Борис Л.П.,**  
**Мельниченко О.А.**

*Одесская государственная академия строительства и архитектуры*  
korobko1971@mail.ua

**Аннотация.** Работа посвящена проблеме безопасного функционирования бетонов в дорожных конструкциях при периодически изменяющихся условиях эксплуатации. основополагающее значение в процессах адаптации материала конструкции как открытой самоорганизующейся системы имеет потенциал его структуры. Конструкция-система противостоит разрушающему влиянию внешней среды путем соответствующих структурных изменений. Для повышения стойкости материала необходимо обеспечить заданный набор активных элементов, способных своевременно реагировать на внешние воздействия, что требует учета взаимообусловленности структурной организации бетона на различных уровнях неоднородностей.

**Ключевые слова:** конструкция-система, бетон, структурные уровни, взаимовлияние, технологические трещины (ТТ), внутренние поверхности раздела (ВПР), поврежденность.

## ХАРАКТЕР ЗМІНИ ПОШКОДЖЕНОСТІ ДОРОЖНІХ БЕТОНІВ ПРИ ЦИКЛІЧНОМУ ЗВОЛОЖЕННІ ТА ВИСУШУВАННІ

**Коробко О.О.,** к.т.н., доцент,  
**Уразманова Н.Ф.,**  
**Боріс Л.П.,**  
**Мельниченко О.А.**

*Одеська державна академія будівництва та архітектури*  
korobko1971@mail.ua

**Анотація.** Робота присвячена проблемі безпечного функціонування бетонів у дорожніх конструкціях в умовах експлуатації, що періодично змінюються. основоположне значення в процесах адаптації матеріалу конструкції як відкритої системи, що самоорганізується, має потенціал його структури. Конструкція-система опирається руйнівній дії зовнішнього середовища шляхом відповідних структурних змін. Для підвищення стійкості матеріалу необхідно забезпечити заданий набір активних елементів, здатних своєчасно реагувати на зовнішні впливи, що потребує врахування взаємообумовленості структурної організації бетону на різних рівнях неоднорідностей.

**Ключові слова:** конструкція-система, бетон, структурні рівні, взаємовплив, технологічні тріщини, внутрішні поверхні розподілу, пошкодженість.

## DAMAGE CHANGE CHARACTER OF ROAD CONCRETES AT CYCLIC WETTING AND DRYING

**Korobko O.A.,** PhD., Assistant Professor,  
**Urazmanova N.F.,**

**Abstract.** The conducted researches and the analysis allow to conclude that during operation a building structure as the open self-organized system is capable to adapt to actions of external factors by spontaneous structural transformations. It is caused by the presence of elements in the form of cracks and inner interfaces in the structure of the construction material. These elements are able to respond to operational influences in proper time through a change of their own parameters. Self-support of concrete structural stability under the influence of external factors is determined by the possibility of redistribution of responses of its structure, which in turn depends on the set of macrostructural parameters. Concrete as a construction subsystem includes a various set of macrostructural forms (structural cells). Each cell is characterized by individual conditions of their formation and the emergence of active elements networks, the total amount of which determines the initial damage of the material. Multi-variation of a macrostructure provides originality of structural transformations of concrete as the compelled responses to periodic changes of external environment, thereby, improving its ability to resist aggressive influences. Thus, the difference of coefficient values of samples damage was 7...24% depending on parameters of structural cells through 6 cycles of alternate wetting and drying. Therefore, when considering concrete compositions it is necessary to take into account variety of the material structure of constructions for the increase of their service safety.

**Keywords:** construction-system, concrete, structural levels, interaction, technological cracks, inner interfaces of partition, damage.

**Введение.** Эффективность применения цементных бетонов в дорожном строительстве в качестве конструктивного элемента сооружений во многом определяется возможностью их адаптации к воздействиям окружающей среды, наиболее распространенными из которых являются попеременное увлажнение и высушивание в сочетании с механическими нагрузками. Строительные конструкции, как открытые системы [1, 2], способны реагировать на эти воздействия путем соответствующих структурных изменений. Возможность управления реакциями в ответ на каждое действие внешней среды зависит от оформления структуры материала, разнообразие и многовариантность которой повышает безопасность службы конструкций в сложных условиях. В работе [3] показано, что на момент функционирования структурный потенциал материала различных конструкций определяется преимущественно параметрами начальных трещин и внутренних поверхностей раздела как активных элементов структуры, способных адекватно воспринимать перераспределять, трансформировать, диссипатировать и релаксировать деформации, вызванные внешними факторами. При этом вынужденное изменение ТТ и ВПР можно представить как результат избирательных откликов структуры материала на источники возмущения. Предполагается, что стойкость бетона к действию разрушающих нагрузок должна определяться начальным набором трещин и внутренних поверхностей раздела. Для получения заданного «портрета» активных элементов эффективным приемом является использование внутренних возможностей материала с учетом взаимообусловленности организации его структуры на различных уровнях неоднородностей.

**Цели и задачи.** Исходя из вышеизложенного, была определена цель исследований – повышение способности цементного бетона в конструкции противостоять знакопеременным воздействиям за счет обеспечения требуемой совокупности ТТ и ВПР путем направленного изменения макроструктурных параметров. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: проанализировать влияние пространственно-геометрических и физических характеристик макроструктуры на поврежденность матричного материала и определить изменение начальной поврежденности бетона при циклическом увлажнении и высушивании.

**Объекты и методы анализа.** В качестве объекта анализа был принят бетон, являющийся необходимой составляющей конструкции-системы [4]. Представление конструкции в виде системы априорно предполагает ее структурное оформление, которое автоматически включает особенности структуры материала. Такой подход позволяет оценить вклад материала в организацию структурных уровней конструкции как системы, выявить элементы структуры, отвечающие за сохранение ее свойств под действием нагрузок, представить структуру как функцию движения, определяющую через изменение своих параметров безопасность функционирования объекта-системы в системе объектов-систем.

Материал, являясь составной частью конструкции-системы, может быть выделен как ее подсистема со сложной уровневой организацией. Каждый структурный уровень выступает в виде подсистемы структуры материала и одновременно в виде системы для своих структурных составляющих. В структуре бетона можно выделить неоднородности на уровне частиц вяжущего (микроструктура), на уровне матричного композита и заполнителей (макроструктура) и на уровне изделия (конструкции). Все уровни реализуют себя путем взаимной инициации, и их можно представить как открытые самоорганизующиеся системы.

Доминирующее положение на структурообразование бетона как полиструктурного материала в начальный период оказывают процессы и явления, протекающие на уровне частиц вяжущего. Этот уровень неоднородностей может быть представлен как многофазная гетерогенная высококонцентрированная лиофобная система с лиофильной границей раздела фаз [5]. Организация такой системы происходит за счет неуравновешенных межчастичных взаимодействий с образованием упорядоченных кластерных структур при одновременной модификации межфазных поверхностей раздела. Микроструктура является составной частью макроструктуры, которую можно выделить как структурную неоднородность бетона на уровне «заполнители – матричный материал» [6]. Организация макроструктуры происходит путем взаимодействия матричного материала с заполнителями и зависит от вида, размеров и природы заполнителей, плотности и способа их укладки, а также от соотношения когезионно-адгезионных сил связи между матричным материалом и заполнителями.

Анализ структуры кернов, взятых из реальных конструкций, показал, что в их объеме можно выделить своеобразно-упорядоченные структурные ячейки, образованные группами заполнителей в матричном материале. При одном и том же составе бетона на уровне макроструктуры сосуществуют взаимосвязанные ячейки с различными характеристиками и свойствами. Организация макроуровня происходит одновременно во всех ячейках, но ее реализация индивидуальна для каждой отдельной ячейки. Анализ структурных особенностей макроструктуры [7] показал, что матричный материал реагирует на изменение расположения и состояния поверхности заполнителей. Это вызывает изменение формы и размеров агрегатов из частиц вяжущего, величины и кинетики объемных деформаций, сроков схватывания твердеющего материала, даже в различных объемах ячеек. Как следствие, должны измениться параметры начальных трещин и внутренних поверхностей раздела, являющиеся результатом процессов самоорганизации бетона, на уровнях как микро-, так и макроструктур. Таким образом, в качестве управляющего фактора направленного изменения параметров разноуровневых ТТ и ВПР можно выделить пространственно-геометрические и физические характеристики макроструктуры бетона.

К началу функционирования конструкция приобретает конкретную структуру и присущий исключительно ей набор начальных трещин и внутренних поверхностей раздела. Суммарное количество ТТ и ВПР определяет поврежденность материала конструкции наследственными дефектами, что можно количественно оценить с помощью коэффициента поврежденности  $K_p = \sum L_i / L$ , выражаемого как соотношение фактической длины трещины  $\sum L_i$  к длине геодезической линии  $L$  (кратчайшее расстояние между точками выхода фактической трещины на торцевые поверхности образца) [8].

Изменение структурных характеристик и прочностных свойств бетонов в зависимости от состава и условий формирования макроструктуры изучали на образцах-кубах (размером  $10 \times 10 \times 10$  см) и моделях структурных ячеек (размером  $16 \times 9 \times 4$  см).

Для опытов были использованы три состава бетонов одинаковой удобоукладываемости ( $OK=10$  см). Составы отличались различным состоянием поверхности заполнителей. Одинарные составы – на обычном щебне ( $V/C=0,65$ ) и на щебне, обработанном ГКЖ-11 ( $V/C=0,58$ ). Бинарный состав включал заполнители с обработкой и без обработки ( $V/C=0,6$ ).

В моделях имитаторы располагали таким образом, чтобы получить ячейки кубической и гексагональной формы. Каждая модель включала по три ячейки, объединенных в одно изделие. Модели отличались способом укладки заполнителей и соотношением сил связи на границах раздела между матричным материалом и заполнителями:  $R_A > R_K$ ;  $R_A < R_K$ ;  $R_A = R_K$ , где  $R_A$  – величина адгезии матричного материала к поверхности заполнителя,  $R_K$  – величина когезионной прочности матричного материала. Изменение состояния поверхности имитаторов выполняли путем их обмазки поверхностно-активным веществом с повышенной адгезией к цементу. Измерение поврежденности проводили по двум боковым (ложковым) сторонам каждой модели, вычисляя  $K_p$  как среднее арифметическое из двух значений.

Попеременное увлажнение и высушивание моделей осуществляли в течение 6 циклов. Предварительная подготовка образцов выполнялась по стандартной методике. Высушенные до постоянной массы образцы погружали в раствор танина на 4 часа, что обеспечивало в среднем 85...90% их водонасыщения от водонасыщения образцов за 24 часа. Затем образцы высушивали при  $T=100\pm 5^\circ C$  в течение 12 часов до требуемого показателя и давали остыть до  $T=35...40^\circ C$ . После этого цикл повторялся с увлажнением образцов в новом растворе танина. Фотофиксацию и оценку изменения поврежденности моделей проводили после каждого цикла увлажнения и высушивания.

**Результаты исследований.** Развитие деформаций происходит в материале на всех этапах его «жизни» – от момента получения до периодов активной работы и гибели. Материал практически всех изделий и конструкций находится в постоянной динамике, а интенсивность ее проявления определяется способностью составляющих материала воспринимать и перераспределять возникающие в нем локальные и интегральные деформации всех видов. Поэтому деформации можно рассматривать не только как результат каких-либо произошедших изменений, но и как процесс этих изменений. Это позволяет включить деформации в качестве составляющих в общую сеть рекурсивных взаимодействий самоорганизации бетона. Распространение деформаций в материале происходит в виде деформационных волн. Взаимообусловленность организации структурных уровней бетонов предполагает саморазвитие взаимосвязанной сети внутренних деформационных явлений с возвратной передачей деформаций с одного уровня неоднородностей на другой.

Деформации можно представить как индивидуальные отклики структуры материала на внешние и внутренние воздействия. Внешние воздействия воспринимаются всеми уровнями неоднородностей бетона и провоцируют ответные структурные изменения. В результате самоорганизации системы часть энергии деформирования рассеивается на внутренних поверхностях раздела и берегах трещин, часть энергии вызывает подрастание трещин, и часть энергии передается на соседние структурные блоки. Спонтанные перестройки структуры проявляются как индивидуальные внутренние воздействия, что вызывает дальнейшие преобразования сложной системы с повышением разнообразия структурных «рисунков». Кроме того, к внутренним источникам возмущений относят непрекращающиеся процессы гидратации реликтовых зерен вяжущего. Это, по мнению профессора Чернявского В.Л. [9], является одной из форм адаптации строительных композитов как абиотических систем к изменяющимся внешним условиям. Структурные преобразования инициируют объемные и температурные деформации, которые локализируются в подструктурах на уровне частиц вяжущего. Это предполагает развитие деформаций, вызванных внутренними воздействиями, «снизу-вверх», от уровня микроструктуры через макроуровень на уровень изделия.

Деформации провоцируют появление и развитие взаимосвязанных трещин и внутренних поверхностей раздела, которые образуют единую сеть или паутину, организованную по принципу «сети внутри сетей» [10]. «Большая сеть» включает в себя

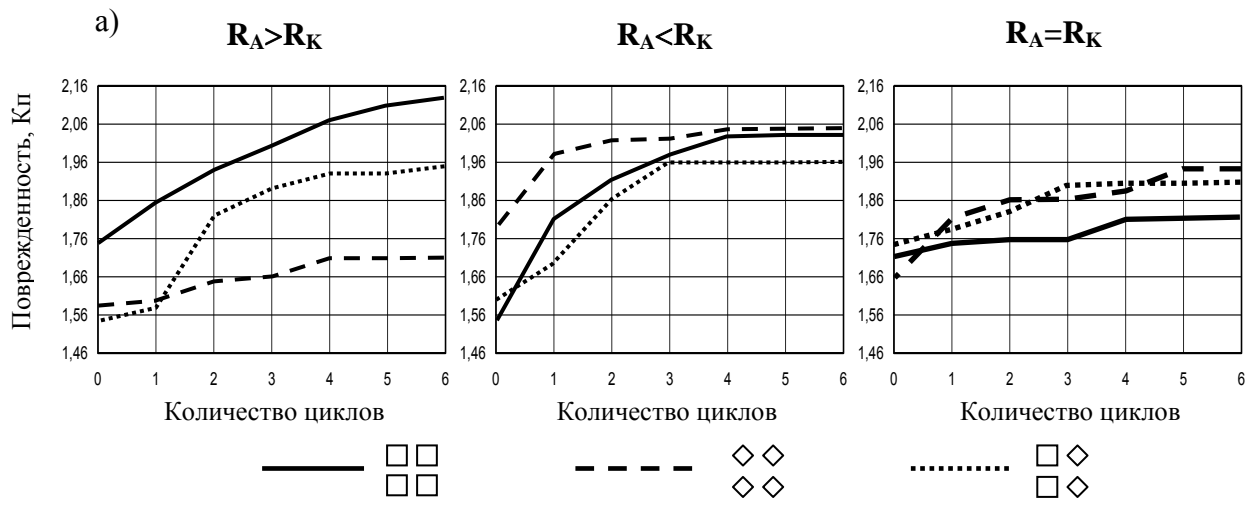
внутренние сети, которые состоят из собственных сетей. Каждая паутина на Большой сети представляет собой набор определенных элементов на определенном структурном уровне. При таком представлении материала можно выделить зоны взаимодействия разноуровневых паутин-составляющих, в которых они проявляют себя через внутри- и межструктурные связи.

При действии внешних нагрузок на всех уровнях системы происходит преобразование их внутрискруктурных связей в результате передачи деформаций через сеть трещин и поверхностей раздела. Это обеспечивает самосохранение каждого уровня. При снижении внешнего воздействия структурная перестройка уровней завершается, а при усилении воздействия может произойти разрыв связей и постепенная потеря функций отдельного уровня. На соседние уровни информация о произошедших преобразованиях передается путем изменения параметров межструктурных связей. При действии внутренних факторов начальные деформации на уровне частиц вяжущего инициируют возникновение внутренних воздействий, которые вызывают изменение внутрискруктурных связей. Последующее развитие деформаций создает условия для проявления внутренних воздействий, способных привести к разрушению. Возникают необратимые структурные изменения с разрывом межструктурных связей. Таким образом, стойкость материала конструкций под действием эксплуатационных нагрузок должна определяться соотношением интенсивности структурных преобразований и скорости реакций на них составляющих его структуры.

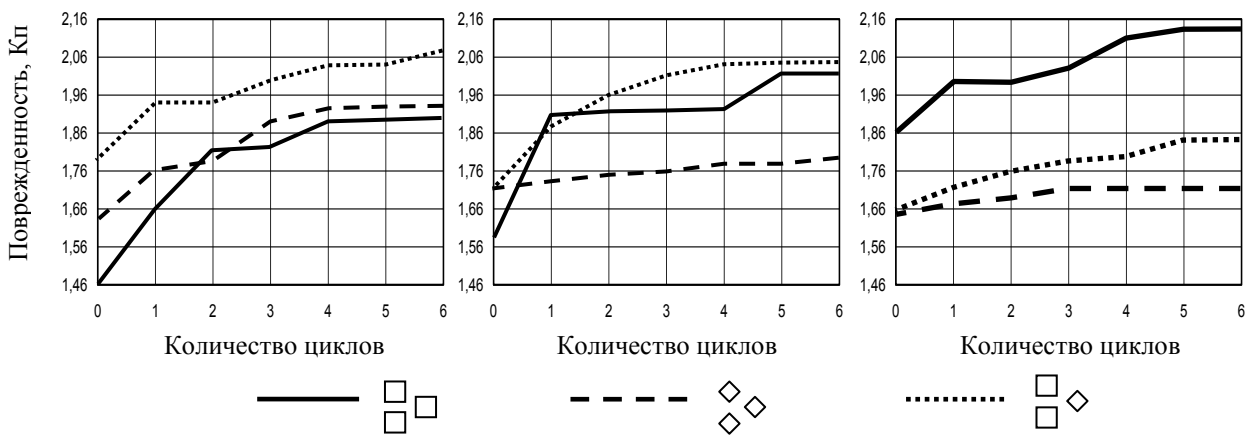
Развитая сеть трещин и внутренних поверхностей раздела связывает все структурные уровни материала в единую диссипативную систему. Характерный набор этих элементов определяет неповторимый «структурный портрет» каждого уровня и по завершению основных процессов структурообразования бетона отражает индивидуальность строительной конструкции-системы перед началом ее функционирования.

Функционирование конструкции-системы можно представить как непрекращающиеся структурные переходы, при которых сохраняется гомеостаз системы в условиях действия внешних факторов. Это подтверждается результатами экспериментальных исследований. Было определено, что способность бетонов противостоять разрушающим нагрузкам зависит от параметров их макроструктуры. Причем повышение структурного разнообразия обеспечило увеличение прочностных характеристик образцов на 24%. Прочность при сжатии бетонных кубов составила: на необработанном заполнителе –  $f_{ck}=33,5$  МПа; на заполнителе, обработанном ГКЖ, –  $f_{ck}=37,2$  МПа; на заполнителе с различным состоянием поверхности заполнителей –  $f_{ck}=44,2$  МПа.

В процессе эксплуатации материал конструкции вынужден постоянно приспосабливаться к периодически изменяющимся внешним условиям. При этом между конструкцией и средой устанавливается особый вид взаимоотношений – непрерывное структурное связывание. В ответ на каждое действие среды материал конструкции откликается определенной перестройкой структуры. Это ведет к изменению ее взаимодействий со средой, что вызывает очередной этап структурной адаптации. Опыты на моделях, подвергавшихся попеременному увлажнению и высушиванию (рис. 1), показали, что различие значений коэффициента поврежденности образцов, косвенно отражающего произошедшие в них изменения, через 6 циклов составило от 7% до 24% в зависимости от макроструктурных характеристик. При этом влияние структурного разнообразия на поведение материала сохранялось при каждом цикле воздействий. Это может быть связано с обеспечением параметров ТТ и ВПР, улучшающих способность материала своевременно подстраиваться под изменяющиеся внешние условия путем соответствующих структурных преобразований. Благоприятные структурные изменения, связанные с самоподдержкой и саморазвитием сети активных элементов, дают возможность проявления эффектов адаптации, что позволяет конструкции-системе безопасно функционировать в течение всего нормативного периода службы.



кубическая укладка заполнителей в структурных ячейках



гексагональная укладка заполнителей в структурных ячейках

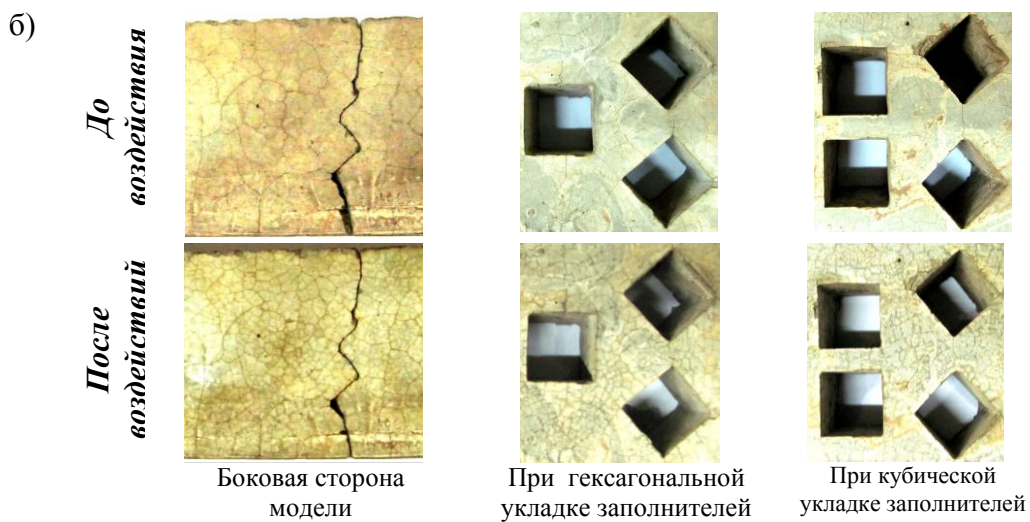


Рис. 1. Влияние параметров макроструктуры на изменение поврежденности (Кп, см/см) бетона после циклического увлажнения и высушивания:

а – в виде графиков; б – на моделях структурных ячеек;

$R_A$  – величина адгезии матричного материала к поверхности заполнителя,

$R_K$  – величина когезионной прочности матричного материала.

**Выводы.** Проведенные исследования позволяют заключить, что дорожные конструкции противостоят разрушающему влиянию внешней среды путем компенсирующих преобразований структуры материала, из которого они изготовлены. Это обуславливает необходимость анализа структурных элементов бетона, способных своевременно реагировать на внешние воздействия, с учетом многовариантности его структуры на макроуровне. Самоподдержка структурной стабильности бетона под действием внешних факторов определяется возможностью перераспределения откликов его структуры, что, в свою очередь, зависит от набора макроструктурных параметров. Оригинальность подхода к постановке и достижению цели исследований заключается в представлении макроструктуры бетона как взаимосвязанной совокупности структурных ячеек, образованных заполнителями в матричном материале. При этом предполагается, что реальные бетоны включают весь возможный набор макроструктурных форм. Тем самым обеспечивается неповторимость и непредсказуемость ответных реакций бетона в виде спонтанных структурных преобразований на внешние воздействия. Повышение структурной сложности бетона ведет к улучшению его способности приспосабливаться к изменяющимся условиям, что подтвердилось экспериментальными результатами. После циклического увлажнения и высушивания поврежденность образцов при различных способах укладки и ориентирования заполнителей изменялась до 24%, а при изменении состояния поверхности заполнителей – до 19%. Влияние структурных различий на поведение материала сохраняется при каждом цикле взаимодействия конструкции со средой эксплуатации. Следовательно, при назначении составов бетона необходимо учитывать разнообразие структуры материала конструкций для повышения безопасности их службы.

### Литература

1. Суханов В.Г. Структура материала в структуре конструкции / В.Г. Суханов, В.Н. Выровой, О.А. Коробко. – Одесса: Изд-во «ПОЛИГРАФ», 2016. – 244 с.
2. Могилевский В. Д. Методология систем: (вербальный подход) / В.Д. Могилевский. – М.: Экономика, 1999. – 251с.
3. Выровой В.Н. Трещины в бетоне: свойства, функции, идентификация / В.Н. Выровой, А.Н. Герега, В.С. Дорофеев, В.Г. Суханов. – Современные бетоны. Перспективы развития. – Киев, 2010. – С. 15-17.
4. Выровой В.Н. Конструкция-система. Основные представления и определения / В.Н. Выровой, О.А. Коробко, В.Г. Суханов, Е.В. Рожнюк // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Одеса, 2014. – Вип. 55. – С.57-63.
5. Соломатов В.И. Композиционные строительные материалы и конструкции пониженной материалоемкости / В.И. Соломатов, В.Н. Выровой, В.С. Дорофеев, А.В. Сиренко. – К.: Будівельник, 1991. – 144с.
6. Выровой В.Н. Бетон в условиях ударных воздействий / В.Н. Выровой, В.С. Дорофеев, С.Б. Фиц. – Одесса: Изд-во «Внешрекламсервис», 2004. – 270с.
7. Коробко О.А. Свойства бетона как функция структурного разнообразия / О.А. Коробко, В.Ю. Тофанило, Е.П. Кусова, А.Э. Стус. – Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2015. – Вип.58. – С. 198-205.
8. Выровой В.Н. Композиционные строительные материалы и конструкции. Структура, самоорганизация, свойства / В.Н. Выровой, В.С. Дорофеев, В.Г. Суханов. – Одесса: Изд-во «ТЭС», 2010. – 169 с.
9. Чернявский В.Л. Адаптация абиотических систем: бетон и железобетон / В.Л. Чернявский. – Д.: Изд-во ДНУЖДТ им. акад. В. Лазаряна, 2008. – 412 с.
10. Капра Ф. Паутина жизни. Новое научное понимание живых систем / Ф. Капра. – К.: «София»; М.: ИД «София», 2003. – 336 с.