

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)»



# **АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ И ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНЫЙ КОМПЛЕКСЫ: ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ**

Сборник материалов  
V Международной научно-практической  
конференции, посвященной 90-летию  
ФГБОУ ВО «СибАДИ»

03 – 04 декабря 2020 года

Омск  
СибАДИ  
2021

УДК 72:69:625.7:06  
ББК 85.11:39.311:38  
А87

*Рецензенты:*

д-р техн. наук, проф. Н.С. Галдин (СибАДИ);  
д-р экон. наук, доц. Е.В. Романенко (СибАДИ)

**А87** **Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации** [Электронный ресурс] : сборник материалов V Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию ФГБОУ ВО «СибАДИ» 03 – 04 декабря 2020 г. – Электрон. дан. – Омск, СибАДИ 2021. – URL: [http://bek.sibadi.org/cgi-bin/irbis64r\\_plus/cgiirbis\\_64\\_ft.exe](http://bek.sibadi.org/cgi-bin/irbis64r_plus/cgiirbis_64_ft.exe). – Режим доступа: для авторизованных пользователей.  
ISBN 978-5-00113-164-9.

Предназначен для научных работников, преподавателей, специалистов-практиков, докторантов, аспирантов, студентов и всех тех, кто интересуется проблемами, которые обсуждались на конференции.

Освещены актуальные проблемы, тенденции и перспективы фундаментальных и прикладных научных исследований в дорожно-транспортном и архитектурно-строительном комплексах.

Имеется интерактивное оглавление в виде закладок.

Представлен в научной электронной библиотеке eLIBRARY.ru, а также в системе Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

***Редакционная коллегия:***

А.П. Жигadlo, ректор (**отв. редактор**);

П.А. Корчагин, проректор по научной работе (**зам. отв. редактора**);

С.В. Мельник, проректор по учебной работе;

В.А. Мещеряков, проректор по информационным технологиям;

С.А. Еременко, проректор по административно-хозяйственной и социальной работе;

М.В. Банкет, декан факультета «Автомобильный транспорт»;

В.А. Казаков, декан факультета «Промышленное и гражданское строительство»;

Ю.В. Коденцева, и.о. директора Строительного института;

В.Н. Кузнецова, декан факультета «Нефтегазовая и строительная техника»;

Е.В. Романенко, декан факультета «Экономика и управление»;

Л.И. Остринская, декан факультета «Информационные системы в управлении»;

М.С. Перфильев, декан факультета «Автомобильные дороги и мосты»;

С.М. Хаирова, и.о. директора Института магистратуры и аспирантуры.

Ответственный за подготовку статей для сборника – начальник сектора информационно-патентного обеспечения **В.В. Федосов**.

Текстовое (символьное) издание (55 МБ)

Системные требования: Intel, 3,4 GHz; 150 Мб; Windows XP/Vista/7; DVD-ROM;

1 Гб свободного места на жестком диске; программа для чтения pdf-файлов:

Adobe Acrobat Reader; Foxit Reader

Издание первое. Дата подписания к использованию 27.01.2021

Издательско-полиграфический комплекс СибАДИ. 644080, г. Омск, пр. Мира, 5

РИО ИПК СибАДИ. 644080, г. Омск, ул. 2-я Поселковая, 1

© ФГБОУ ВО «СибАДИ», 2021

УДК 691.162

## ОСОБЕННОСТИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ЦЕМЕНТНЫХ ПАСТ И РАЗРУШЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ НА МИНЕРАЛЬНОМ И ОРГАНИЧЕСКОМ ВЯЖУЩЕМ

**Д. Н. Шабанов**, кандидат технических наук, доцент;

**Е. С. Боровкова**, старший преподаватель

Учреждение образования «Полоцкий государственный университет»,  
Новополоцк, Республика Беларусь

**Аннотация.** Приведены результаты мониторинга структурных изменений в искусственных конгломератах методом акустической эмиссии (АЭ). Представлены экспериментальные исследования АЭ, возбуждаемых в цементных пастах на основных этапах структурообразования цементного камня, а также исследования в образцах асфальтобетона при внешних и внутренних нагрузках. Определена связь между прочностными и АЭ характеристиками каждого образца, а также взаимосвязь между уровнями структуры бетона и сигналов АЭ в эти периоды.

**Ключевые слова:** акустическая эмиссия, цементный камень, структурообразование, асфальтобетон.

## FEATURES OF ACOUSTIC EMISSION CONTROL OF FORMATION OF THE STRUCTURE OF CEMENT PASTES AND DESTRUCTION OF PRODUCTS ON MINERAL AND ORGANIC BINDERS

**D.N. Shabanov**, PhD in engineering, associate professor;

**E. S. Borovkova**, senior lecturer

Polotsk State University, Novopolotsk, The Republic of Belarus

**Abstract.** The results of monitoring structural changes in artificial conglomerates by acoustic emission (AE) are presented. Experimental studies of AE excited in cement pastes at the main stages of structure formation of cement stone, as well as studies in asphalt concrete samples under external and internal loads are presented. The relationship between the strength and AE characteristics of each sample is determined, as well as the relationship between the levels of concrete structure and AE signals during these periods.

**Keywords:** acoustic emission, cement stone, structure formation, asphalt-concrete.

### Введение

Конгломераты активно формируют свои свойства в процессе эксплуатации, в результате чего возникающие изменения оказывают как положительное, так и отрицательное влияние на их структуру на разных масштабных уровнях. Информация о поведении материалов на этих уровнях является крайне важной для оценки эксплуатационных характеристик строительных конструкций, а также для создания новых материалов и технологий.

Структура бетона (искусственного строительного конгломерата) состоит из множества элементов и развивается во времени с момента взаимодействия компонентов цемента с водой и до момента потери эксплуатационных свойств бетонной конструкции. Несмотря на то, что технология бетона достигла больших успехов, точная интерпретация внутренних явлений и взаимодействий между различными физическими и химическими параметрами не определены до конца. Как уже говорилось, мониторинг ранней стадии материала важен, так как эта стадия в значительной степени определяет конечные свойства затвердевшего бетона. Одним из самых перспективных методов, который позволят исследовать свежий бетон и прогнозировать его ресурс еще на стадии твердения является метод акустической эмиссии (АЭ). Данный метод предпочтителен тем, что он показывает чувствительность захвата многочисленных сигналов упругих волн еще во время схватывания материала. С помощью метода АЭ можно регистрировать внутреннюю структурную активности бетона в процессе его твердения.

### Структурные изменения конгломератов на минеральном вяжущем

Нами были исследованы образцы из свежеприготовленной цементной пасты. С помощью пьезодатчиков и дополнительного экспериментального оборудования, представленного на рисунке 1, осуществляли регистрацию и анализ параметров сигналов акустической эмиссии цементной пасты с определением структурирования.

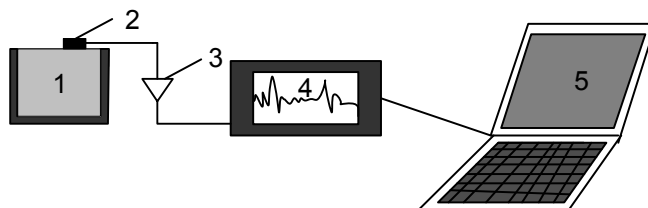


Рисунок 1 – Компонетка экспериментального оборудования:  
1– образец из свежеприготовленного бетона, 2 – пьезодатчик, 3 – усилитель,  
4 –осциллограф, 5 – персональный компьютер

Структура твердеющего цементного камня состоит из [1]:

– твердой фазы, включающей гель гидросиликатов и гидроалюминатов кальция, обладающих свойствами коллоидов, относительно крупные кристаллы  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и этtringита, а также непрореагировавшие зерна клинкера, содержание которых уменьшается по мере гидратации цемента;

– пор (поры геля размером менее 1000 А, капиллярные поры размером от 1000 А до 10 мкм, воздушные поры и пустоты размером от 50 мкм до 2 мм).

Между частицами различных уровней действуют силы и динамические связи нескольких типов [1]:

- ковалентные связи, действующие на расстоянии 0,1 – 0,2 нм и имеющие энергию 209 – 6270 кДж/моль;

- ионные связи, радиус которых 0,2 – 0,3 нм, а энергия – 4857 кДж/моль;

- водородные связи, действующие на расстоянии 0,24 – 0,32 нм, обладающие энергией ~ 62,7 кДж/моль;

- криогидратные силы, действующие на расстоянии 0,2 – 0,3 нм, а их энергия составляет ~ 20,9 кДж/моль;

- силы дальнего действия – действуют на расстояниях 2 – 300 нм, с энергией 4,18 кДж/моль.

Сигналы акустической эмиссии, распространяясь к поверхности образца, претерпевают существенные изменения вследствие дисперсии скорости звука, трансформации типов волн при дифракции, отражении, преломлении, затухании. Законы распространения акустических волн в цементном камне, бетоне имеют весьма сложный характер. Данный строительный конгломерат является упруго-вязким-пластическим неоднородным материалом, физико-механические свойства которого существенно отличаются от условно принятых свойств теоретической изотропной упругой среды, отличается непостоянством акустического сопротивления его составляющих [2]. На основании вышеперечисленного, можно сделать вывод, что в бетоне и цементном камне при распространении акустических волн возникают сложные процессы дисперсии, дифракции, отражения и преломления. Поэтому любые изменения в структуре, а как следствие энергетических и силовых характеристик, повлекут за собой изменения сигнала на выходе преобразователя.

Посредством анализа показаний нами были выявлены структурные изменения при резких скачкообразных отличиях в амплитуде:

- надмолекулярный уровень, диаметр частиц  $d$  лежит в интервале  $10^{-9} < d \leq 5 \cdot 10^{-9}$  м (свежеприготовленный раствор – цемент и вода). Сопровождается постоянной бомбардировкой молекулами свободной воды поверхности из-за их броуновского движения, возникновением контактов между возникшими и уже растущими частицами новой фазы, а также миграцией воды и пузырьков газа [3]. Основным источником АЭ на данном уровне является подвижность - максимальная амплитуда сигналов  $U_{\text{max}} = 200$  мкВ;

- субмикроскопический уровень,  $5 \cdot 10^{-9} < d \leq 10^{-7}$  м (возникновение коллоидов в цементной пасте). Количество свободной воды уменьшается, благодаря реакции гидратации ионов некоторым количеством молекул воды, в результате чего возникают условия для образования двойного электрического слоя на поверхности непрореагированного цементного зерна [4]. Из-за реакции гидратации, а как следствие ростом тепловыделения, происходит диссипация энергии звуковых волн, в связи с чем, интенсивность акустических волн уменьшается, т.е. происходит затухание сигналов -  $U_{\text{max}} = 10$  мкВ;

## АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ И ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНЫЙ КОМПЛЕКСЫ: ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ

Сборник материалов V Международной научно-практической конференции

- микроскопический уровень,  $10^{-7} < d \leq 5 \cdot 10^{-4}$  м (образование кристаллов). Из-за частично сформировавшейся структуры коэффициент затухания звуковых волн значительно ниже, чем в предыдущем периоде, что является следствием увеличения активности и амплитуды регистрируемых сигналов АЭ -  $U_{\max} = 250$  мкВ.

Таким образом, акустическая эмиссия чувствительна к захвату многочисленных сигналов упругих волн во время формирования структуры в различных условиях, что подтверждается результатами, представленными на рисунке 2. Мониторинг ранней стадии материала важен, так как эта стадия в значительной степени определяет конечные свойства затвердевшего цементного камня, поэтому способ АЭ можно применять в качестве исследования состояния структурообразования цементных и бетонных систем. Это объясняется тем, что физико-химические процессы, происходящие внутри цементной пасты, связанные с внутренними структурными изменениями и, как следствие, этапами гидратации, тесно связаны с акустической эмиссией.



Рисунок 2 – Зависимость максимальной амплитуды от времени твердения образцов

Исследования показали, что в первые 15 минут после приготовления цементной пасты, т.е. смешивания цемента и воды, максимальная амплитуда регистрируемых акустических сигналов составляет 200 мкВ (42,2 дБАЭ), этому периоду характерен 1% гидратации. На 2 этапе исследования можно заметить резкий спад показателей АЭ, а именно активности и амплитуды волновых сигналов. На данном этапе происходит образования коллоидов, степень гидратации уже в среднем составляет 3%. При дальнейших исследованиях выявлено резкое увеличение АЭ характеристик, как амплитуды, так и активности. На этом этапе в материале начинают образовываться кристаллы, степень гидратации возрастает до 4-5%.

### Структурные изменения конгломератов на органическом вяжущем

Также нами были исследованы сигналы АЭ в образцах из асфальтобетона, подверженные как внутренним напряжения (влияние растворов солей NaCl), так и внешним (режим одноосного деформирования). В работе были исследованы как образцы, изготовленные в лабораторных условиях, так и керны, вырезанные из дорожного полотна.



Рисунок 3 – Внешний вид экспериментального оборудования:  
1 – образец из асфальтобетона, 2 – пресс гидравлический, 3 – пьезодатчик, 4 – АЭ комплекс

### Направление 3. Инновационное развитие архитектурно-строительного комплекса

В качестве жестких дорожных покрытий были исследованы лабораторные образцы асфальтобетона цилиндрической формы диаметром 7 мм и высотой 10 мм. Одни образцы находились в естественных нормально-влажностных условиях (с исключением агрессивного влияния солевого воздействия на бетон), и другие - погруженные на 6 месяцев в солевом растворе (5% -ом растворе NaCl). Целью эксперимента являлась выявление закономерностей изменения свойств асфальтобетона в агрессивной среде. При лабораторных испытаниях запускались две программы: одна для регистрации параметров сигналов АЭ и вторая - для регистрации механических величин. Для испытаний были использованы установка, представленная на рисунке 3.

Параметры активности АЭ, т.е. числа импульсов в единицу времени, в образце, находившемся в нормальных условиях намного выше, чем в образце, находившемся в хлоридной среде, т.е. в данном случае ионы  $Cl^-$  уменьшили интенсивность сигналов АЭ. Хлоридная среда в асфальтобетоне вызывает меньшую активность акустических сигналов. Также прочностные характеристики показали, что агрессивная среда снижает эксплуатационные характеристики дорожного покрытия. При увеличении локального напряжения до величины, превосходящей предел прочности материала, наблюдается резкое увеличение активности сигналов АЭ. Поэтому, когда напряжение в образцах приближается к исчерпывающему ресурсу материала, то начинается резкий рост числа импульсов. Учитывая вышесказанное, можно заключить, что экспериментальный комплекс, представленный выше, дает возможность определять эксплуатационные характеристики асфальтобетонных конструкций под действием внутренних (коррозия) и внешних (механическая нагрузка) напряжений.

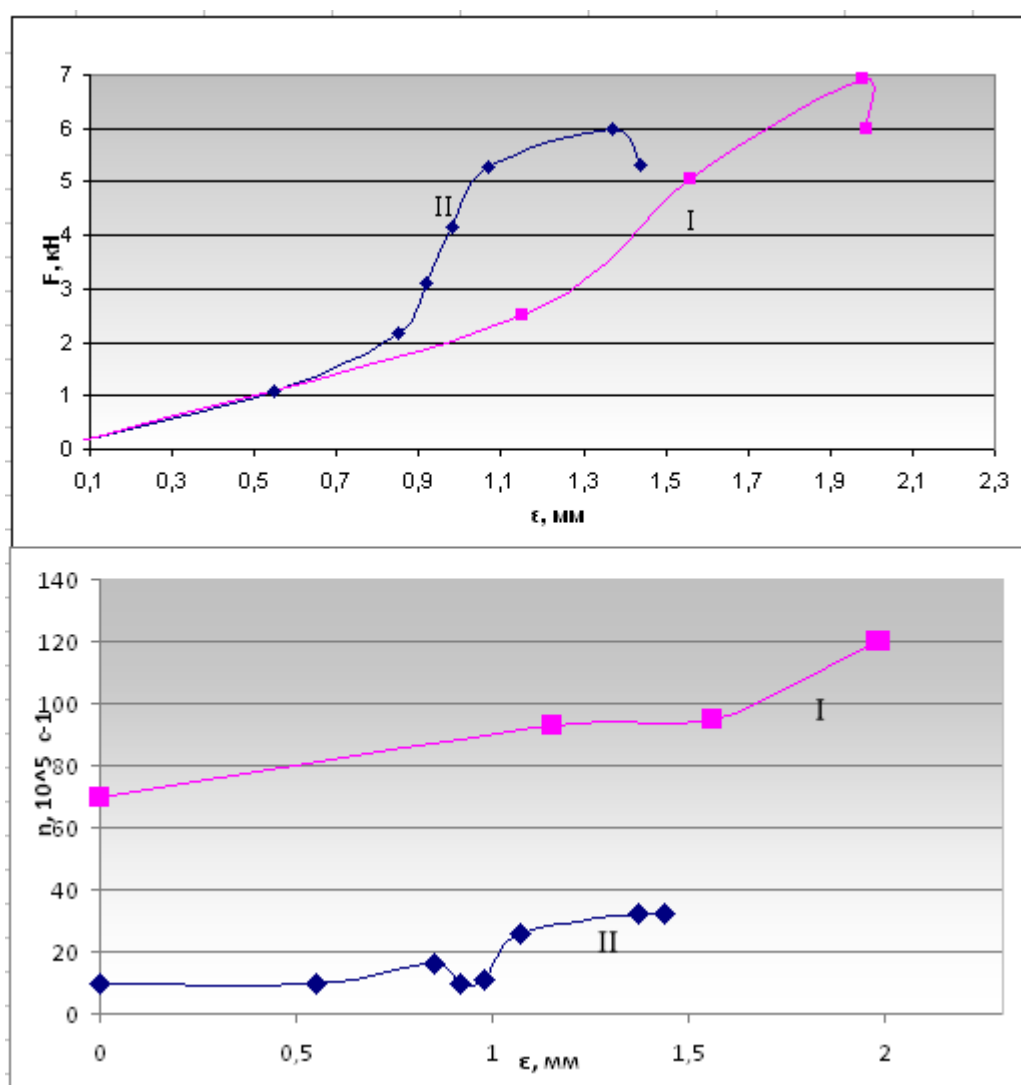


Рисунок 4 – Взаимосвязь между прочностными и АЭ характеристиками лабораторных образцов асфальтобетона в естественных условиях (I) и пробывшего в 5% -ом растворе NaCl (II):

а – зависимость разрушающей силы  $F$  от относительной деформации  $\epsilon$ ;

б – зависимость активности АЭ от деформации  $\epsilon$

## АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ И ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНЫЙ КОМПЛЕКСЫ: ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ

*Сборник материалов V Международной научно-практической конференции*

Также были исследованы образцы эксплуатируемого дорожного полотна (возрастом менее 3 лет) цилиндрической формы диаметром 150 мм и высотой 145 мм. Эксперимент проводился аналогичный испытаниям для лабораторных образцов из асфальтобетона. Зависимости напряженно-деформационных характеристик между лабораторными и уже эксплуатируемыми образцами значительно не отличается. Активность же АЭ между этими образцами различна. Так, в лабораторных образцах количество импульсов не меняется до момента потери эксплуатационных характеристик объекта, а в образцах эксплуатируемого дорожного покрытия можно выделить несколько областей. Активность АЭ вначале нагружения образца имеет более высокие показатели, чем при дальнейшем его нагружении. После чего только при критических значениях для образца происходит резкое увеличение числа импульсов.

Сравнивая лабораторные образцы из асфальтобетона, можно сделать вывод о том, что активность АЭ в образцах, поврежденных коррозией ниже в среднем в 7 раз, это связано с изменением внутренней структуры материала, и как следствие, затуханием звуковых волн. В образцах из асфальтобетона дорожного полотна активность АЭ на начальной стадии нагружения увеличилась в 3 раза, после чего имела устойчивый характер, и уже при переходе к критическому состоянию изменилась на 50 %.

### Выводы

Таким образом, при мониторинге структуры искусственных конгломератов с помощью метода акустической эмиссии, определена связь между акустическими сигналами и процессами структурообразования цементного камня. Метод акустической эмиссии позволяет определить параметры эксплуатационных и предельных напряженно-деформированных состояний дорожных покрытий при силовых и коррозионных воздействиях. Опираясь на приведенные исследования, возникает возможность использовать метод акустической эмиссии в качестве сопровождения бетонных и асфальтобетонных объектов, выражающаяся в получении информации о возникновении и развитии опасных состояний в режиме реального времени, а также определении ресурса на любой стадии эксплуатации. Как структурно чувствительный метод акустическая эмиссия обеспечивает обнаружение процессов пластической деформации, собственно разрушения и фазовых переходов. Указанные свойства акустико-эмиссионного метода дают возможность формировать адекватную систему классификации дефектов и критерии оценки технического состояния объекта, основанные на реальном влиянии дефекта на прочность и работоспособность объекта.

### Библиографический список

1. Вернигорова, В. Н. Химия композиционных материалов на неорганических вяжущих: монография / В. Н. Вернигорова, К. Н. Махамбетова, С. М. Саденко. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 163 с.
2. Шабанов, Д. Н. Параметры сигналов акустической эмиссии и их применение при мониторинге состояния структуры бетона / Д. Н. Шабанов, А. Н. Ягубкин, С. А. Вабищевич, Е. С. Боровкова, Трамбицкий Е.А // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2019. – № 8. – С. 74-78.
3. Бардаков, В. В. Прогнозирование прочности бетона в процессе его твердения при помощи метода акустической эмиссии / В. В. Бардаков, А. И. Сагайдак // РАН: Дефектоскопия №6, 2017. – С. 40-43.
4. Шабанов, Д. Н. Мониторинг уровней динамики структурообразования цементного камня методом акустической эмиссии и прогнозирование ресурса на его этапах твердения / Д. Н. Шабанов, А. Н. Ягубкин, Е. С. Боровкова // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации: электронный сборник статей II международной научной конференции, 5 Полоц. гос. ун-т, 2020. – С. 272-279.
5. Ахмедов, А. И. Влияние микроразрушений бетона на эксплуатационные качества строительных конструкций: дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / А. И. Ахмедов. – Москва, 2006. – 139 с.
6. Sokratis, N. ILIOPOULOS, Continuous AE monitoring of fresh concrete / Sokratis N. ILIOPOULOS, Evin Dzaye, Yassir EL KHATTABI, Dimitrios G. AGGELIS // JSNDI & IIIAE 2016, Progress in Acoustic Emission XVIII, 2016. – P. 293-298.
7. Бехер, С. А. Основы неразрушающего контроля методом акустической эмиссии: учеб. пособие / С. А. Бехер, А. Л. Бобров. — Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2013. – 145 с.
8. Якимович, В. Д. Твердение портландцемента / В. Д. Якимович // Сб. трудов Проблемы современного бетона и железобетона, ч.2 Технология бетона, 2009. – С. 448-460.
9. Aggelis, D. G. Wave dispersion and attenuation in fresh mortar: theoretical predictions vs. experimental results / D. G. Aggelis, D. Polyzos, T. P. Philippidis, // Journal of the Mechanics and Physics of solids 2005. – P. 857-883.
10. Koen VAN DEN ABEELE, Geert DE SCHUTTER, Martine WEVER. Non Destructive Online Evaluation of Concrete Hardening Using Acoustic Emission and Harmonic Wave Spectroscopy, 2006. – P. 1-9.
11. Rustem Gul Compressive strength and ultrasound pulse velocity of mineral admixture mortars / Rustem Gul, Ramazan Demirboga, Tekin Guvercin.// Indian Journal of Engineering & Materials Sciences. – 2006. – v. 13. – P. 18-24.
12. Guang, Ye, K. Experimental study on ultrasonic pulse velocity evaluation of the microstructure of cementitious material at early age / Guang Ye, K. van Breugel, A.L.A. Fraaij. // HERON. – 2001. – v. 46. – P. 161-167.