

# О МОДЕЛИРОВАНИИ ДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ И НЕКОТОРЫХ ТИПОВЫХ РЕШЕНИЯХ ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

В статье приведены теоретические данные по моделированию разрушения асфальтобетона покрытия под воздействием шипов противоскольжения, подтвержденные экспериментальными данными. Также приведены результаты наблюдений за изменением колеи износа на экспериментальных участках набережных реки Невы, покрытие которых отремонтировано в 2007 году. Подчеркивается необходимость продолжения начатых исследований и разработки Альбома типовых конструкций дорожных одежд Петербурга с учетом адекватной работы конструкций, а также оптимизации требований к асфальтобетону дорожных покрытий с учетом современных нагрузки и интенсивности движения.



**Братов В. А.,**  
к. ф.-м. н.



**Смирнов И. В.,**  
к. ф.-м. н.



**Петров Ю. В.,**  
д. ф.-м. н., чл.-кор. РАН  
(НИЦ «Динамика»)



**Майданова Н. В.,**  
к. т. н.



**Широкова Т. С.,**  
инж. (ПК «АБЗ-1»)

Как известно, благоустройство населенных пунктов, в том числе состояние дорог, является ценностью и ресурсом поддержания надлежащего порядка, в том числе, социального. Нормативы и нормы являются основными принципами организации этого ресурса, а применительно к дорожным конструкциям — это нормативы проектирования и содержания дорог, в том числе, с учетом особенностей магистралей мегаполиса.

В Санкт-Петербурге традиционно применялись типовые конструкции дорожных одежд для улиц и дорог с различным составом движения. Это началось с петровских Указов по правилам мощения и содержания дорог и улиц около домовладений («мостить, как указано от мастера»), продолжилось д.с.с. Гурьевым В. П., по разработкам которого в 1829 году была устроена торцовая мостовая на участке Невского проспекта. Виды транспорта видоизменялись, менялись и требования к дорожным конструкциям. С появлением автомобиля принципиально изменились требования к дорожным покрытиям улиц: в 1913 году Городской Думой Санкт-Петербурга были утверждены прошедшие этап опытных работ (на Бородинской улице) типовые конструкции для городских магистралей и улиц, в том числе, были выделены улицы для грузового движения с усиленной конструкцией дорожной одежды. С дальнейшим изменением состава транспортных средств, нагрузок и интенсивности движения менялись и требования к конструкциям.

Развитие теоретической модели работы дорожной конструкции и материалов в 50–60 гг. 20 века привело к созданию «Ин-

струкции по проектированию дорожных одежд нежесткого типа» ВСН 46–72.

На основании этой Инструкции в 1972 году решением Ленсовета утвержден Альбом типовых конструкций дорожных одежд для Ленинграда, разработанный институтом «Ленгипроинжпроект», а в начале 80-х годов прошлого века возникла необходимость дополнить его — узаконить двухстадийное строительство магистралей и улиц, в связи с чем была разработана уточненная редакция Альбома типовых конструкций дорожных одежд Ленинграда, которым проектировщики пользуются и сейчас.

К началу текущего века кардинально изменились транспортные условия в городе — лавинообразный рост интенсивности движения легкового транспорта на городских магистралях и использование проезжей части для стоянки, привели к работе дорожных конструкций в нерасчетном режиме: появился новый тип дефектов дорожного покрытия — колея износа.

Специалисты прошлого века имели дело с двумя видами колеи — колея, образующаяся вследствие слабого основания, и пластическая деформация асфальтобетонных слоев, локализовавшаяся в зонах торможения — ускорения (зоны светофоров, перекрестки и остановочные площадки общественного транспорта).

С внедрением в 90-х годах прошлого века многощебенистых асфальтобетонных смесей типа европейских АВТ на щебне габброидных горных пород и битумов Ухтинского НПЗ из высокосмолистой нефти Ярегского месторождения, о колеиности покрытия, вызванной излишней пластичностью смеси, успели забыть.

Пластическая деформация покрытия в наших условиях может возникнуть только по субъективным причинам:

1). некорректный подбор состава и нарушения технологии при производстве асфальтобетона;

2). нарушения технологической дисциплины при производстве работ по устройству покрытия;

3). несоответствие проектного решения дорожной конструкции условиям работы (нижний слой покрытия магистральных улиц и дорог все еще проектируется из пористой асфальтобетонной смеси по ГОСТ 9128).

Последняя причина объясняется применением программы расчета, выполненной в соответствии с устаревшей схемой работы дорожной конструкции и не учитывающей изменившуюся схему работы дорожной одежды.

На городских магистралях с высокой интенсивностью движения основной деформацией дорожных покрытий в наше время стал абразивный износ асфальтобетонного покрытия, вызванный шипами противоскольжения легкового транспорта.

Как известно, абразивный износ дорожного покрытия определяется несколькими параметрами:

- качеством минеральных материалов и вяжущего, примененных для производства асфальтобетона;
- структурой асфальтобетона верхнего слоя покрытия;
- интенсивностью движения и состава транспорта;
- скоростью движения транспорта;
- режимом движения транспорта;
- массой шипа противоскольжения.

В настоящее время количество легкового транспорта в Санкт-Петербурге превышает 1 400 000 легковых автомобилей, причем около 80% их в зимнее время используют резину с шипами противоскольжения.

Ориентировочные расчеты показывают, что интенсивность движения транспорта на основных транспортных магистралях составляет 12–17 тыс. авт./сутки на полосу движения, а с учетом практически не работающей правой полосы (занята стоящими транспортными средствами) интенсивность достигает 20,0 тыс. авт. в сутки на полосу, что в 6 раз превышает интенсивность наиболее нагруженной полосы, предложенные и утвержденные Минтрансом для загородных дорог. Кроме того, движение по городским магистралям имеет свою специфику: частые торможения-ускорения в зонах светофорных объектов и перекрестках приводят к ускоренному износу покрытий — в зонах перекрестков износ, по данным наблюдений, вследствие неравномерного режима движения увеличивается в 1,3–1,5 раза.

Для изучения и, в последующем, управления износом асфальтобетонных покрытий городских магистралей возникает необходимость построения адекватной модели разрушения материала покрытия от воздействия

транспортных средств. В настоящее время принята расчетная схема дорожной одежды — слоистое упругое полупространство, равномерно нагруженное по площади круга, что не отвечает работе дорожной конструкции, как это показали работы, выполненные в РГСУ под руководством д.т.н. Угловой Е. В.

НИЦ «Динамика» Санкт-Петербургского государственного университета при разработке модели дорожной конструкции предложил рассмотреть разрушение асфальтобетона под воздействием ударного нагружения на основе задачи Герца, позволяющей предсказывать условия возникновения разрушений при ударе автомобильного шипа об асфальтобетонное покрытие. На основе решения задачи Герца возможны оценки влияния свойств асфальтобетона на критические пороговые характеристики разрушения.

В настоящий момент модель, основанная на решении задачи Герца об ударе частицы о границу полупространства, представляется наиболее близкой к реальному воздействию для шипованной автомобильной шины среди возможных аналитических решений. На основании классической схемы Герца можно вычислить максимальное напряжение в среде и длительность воздействия, возникающего в результате удара частицей радиуса R со скоростью V об упругое полупространство.

### Конечноэлементное моделирование удара шипа об асфальтобетон

Решение, наиболее близкое к условиям реального удара шипа автомобильной шины об асфальтобетонное покрытие, можно получить путем численного моделирования динамического процесса взаимодействия шипа и разрушаемого асфальтобетона. В этом случае возникает необходимость решения контактной задачи, учитывающей динамику этого процесса.

Рассмотрим осесимметричную контактную задачу нормального удара стального цилиндра (автомобильный шип) о полупространство (асфальтобетонное покрытие).

Поведение системы описывается соотношениями линейной теории упругости:

$$\rho u_{i,tt} = (\lambda + \mu) u_{j,jj} + \mu u_{i,ii} \quad (1)$$

где «,» означает частную производную по соответствующей временной или пространственной координате,  $\rho$  — массовая плотность, индексы  $i, j$  принимают значения 1 и 2. Здесь под повторяющимися индексами подразумевается суммирование. Перемещения заданы  $u_i$  в направлении  $x_i$ .  $t$  обозначает время,  $\lambda$  и  $\mu$  — константы Ламе. Напряжения связаны с деформациями законом Гука:

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} u_{k,k} + \mu (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (2)$$

где  $\sigma_{ij}$  — компоненты тензора напряжения,  $\delta_{ij}$  — дельта функция Кронекера. В момент времени  $t = 0$  образец, представляющий асфальтобетон, свободен от напряжений и скорости всех точек нулевые:

$$\sigma_{ij}^s |_{t=0} = u_i^s |_{t=0} = 0 \quad (3)$$

Цилиндрический ударник, представляющий автомобильный шип, в начальный момент времени свободен от напряжений и имеет скорость  $v$ :

$$\begin{aligned} \sigma_{ij}^p |_{t=0} &= 0 \\ u_i^p |_{t=0} &= -v \end{aligned} \quad (4)$$

Шип моделируется как линейно упругий материал со свойствами, характерными для стали (свойства приведены в предыдущих разделах). Размеры цилиндра, моделирующего шип: высота (длина) 16 мм, радиус 2,4 мм. Масса шипа (учитывая свойства стали, приведенные выше) — 2,1 грамма, что соответствует стандартному автомобильному шипу, используемому в легковых автомобилях на этапе эксплуатации.

Моделируемая область, представляющая асфальтобетон, имеет конечные размеры, однако эти размеры выбираются из условия, что волны, отраженные от внешних границ, не возвращаются в зону контакта шипа и асфальта в течение времени эксперимента. Такое условие делает решение задачи соответствующим решению задачи для бесконечной области.

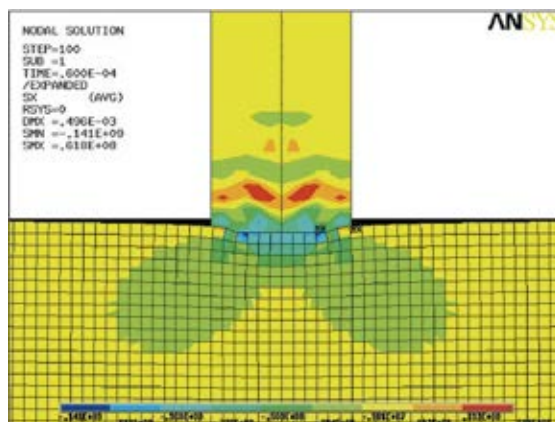
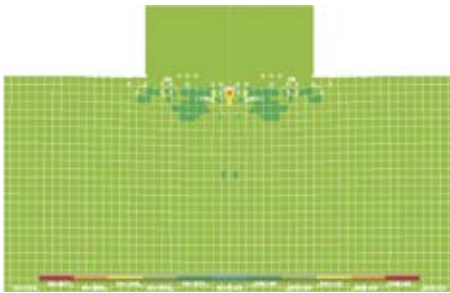
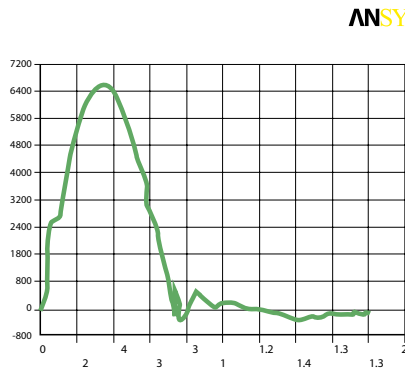


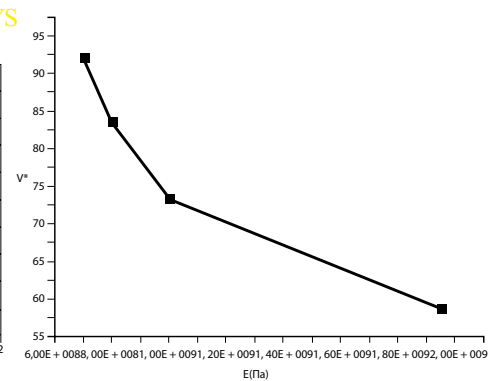
Рис. 1. Поле горизонтальных напряжений в процессе контакта шипа с асфальтобетонным покрытием



**Рис. 2.** Состояние образца в процессе моделирования удара достаточно большой скорости. Точками (для недеформированного образца) отмечены узлы, в которых произошло разрушение



**Рис. 3.** Типичная временная зависимость горизонтальных напряжений на поверхности асфальтобетонного покрытия вблизи контакта с автомобильным шипом



**Рис. 4.** Зависимость критической скорости автомобиля, при достижении которой следует ожидать начала микрорастрескивания асфальтобетонного покрытия от модуля упругости асфальтобетона

Для определения факта разрушения необходим критерий разрушения. В условиях данной задачи может быть использован критерий инкубационного времени:

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \sigma_{ii}(t') dt' \geq \sigma_c \quad (5),$$

где  $\tau$  — инкубационное время разрушения, связанное с динамикой подготавливающих разрыв процессов в структуре материала в результате нагрузки и характеризующее время разрушения;  $\sigma_{ii}$  — нормальное напряжение в направлении  $i$ -й координатной оси,  $\sigma_c$  — статическая прочность материала на разрыв.

Таким образом, для всех точек образца, представляющего асфальтобетон, проверяется выполнение критерия разрушения (5). При выполнении условия разрушения должно произойти разрушение — образование новой поверхности. Пространственное интегрирование исчезает, т.к. в МКЭ напряжения в данном узле и так представляют собой усредненное значение по расстоянию порядка размера элемента.

Задача решается для полупространства  $u < 0$ . Поведение материала определяется линейной теорией упругости. На рисунке 1 представлено поле горизонтальных напряжений и состояние системы в процессе моделирования. В данном случае для решения задачи использовался конечноэлементный пакет ANSYS. Выполнение условия (5) во всех узлах образца контролировалось при помощи отдельной подпрограммы на языке ANSYS ADPL.

На рис. 2 изображено состояние образца после завершения эксперимента в случае удара шипа на достаточно большой скорости. На рисунке на недеформированной сетке отмечены узлы, в которых произошло разделение материала.

На рис. 3 представлена типичная временная зависимость напряжений на поверхности асфальтобетонного покрытия, вблизи контакта с автомобильным шипом.

Проводилось исследование поведения ряда асфальтобетонов (стандартного и модифицированных) с различными свойствами. Для каждого из асфальтобетонов про-

водилась серия численных экспериментов с целью определения критической скорости  $v$  ударника (шипа), при которой начинается образование трещин в асфальтобетоне. На рис. 4 представлена полученная зависимость критической скорости автомобиля, при достижении которой следует ожидать начала микрорастрескивания асфальтобетонного покрытия, от модуля упругости асфальтобетона.

Как видно из приведенного графика, при уменьшении упругого модуля асфальтобетона и, согласно подходу инкубационного времени, увеличении инкубационного времени хрупкого разрушения асфальтобетона, критическая скорость возрастает.

Таким образом, результаты достаточно упрощенной модели показывают, что критическая скорость автомобиля, при которой начинается эрозионное разрушение асфальтового покрытия, существенно зависит от модуля упругости верхнего слоя асфальтобетона. Это значит, что на участках с различным скоростным режимом, в том числе и на участках торможения и ускорения, необходимо укладывать асфальтобетонное покрытие с заданными параметрами упругости и пластичности.

Здесь нужно отметить, что данное теоретическое моделирование носит предварительный характер. Для более детальных выводов необходимо проведение сравнительных экспериментов и теоретических расчетов.

### Результаты наблюдения за опытными участками дорог Санкт-Петербурга

В 2007–2008 годах по заказу Комитета по благоустройству и дорожному хозяйству были построены опытные участки набережных Невы (Малоохтинской, Свердловской и Арсенальной) с покрытием из асфальтобетона различного типа (тип А по ГОСТ 9128 и ЩМА 15 по ГОСТ 31015) на различных минеральных материалах и битумах, модифицированных добавками различного вида и типа. Основания на данных объ-

ектах также были различного типа: тощий бетон и традиционный щебень по методу заклинки, эксплуатируемый в конструкции около 40 лет. Кроме того, было выявлено влияние различных армирующих геоматериалов на возникновение отраженных трещин в покрытии.

В течение гарантийного срока эксплуатации объектов проводился мониторинг эксплуатационных характеристик покрытия — продольной и поперечной ровности по заказу ОАО «АБЗ-1».

К сожалению, в 2007 году, когда проводились опытные работы, в Санкт-Петербурге отсутствовали лабораторные приборы, позволяющие прогнозировать износ покрытия в процессе проектирования составов асфальтобетона. С 2004 года в странах северной Европы действует стандарт, регламентирующий асфальтобетон по абразивному износу, т.е. на устойчивость к износу покрытия под действием шин, оборудованных шипами противоскольжения.

Данные об абразивному износу участков набережных — Свердловской и Арсенальной — приведены в отчете об эксплуатационных показателях дорожного покрытия проезжей части за 2011 год; результаты наблюдений представлены на графике.

Состав 1-участок от Республиканской ул. до моста А. Невского со стороны Невы, ЩМА-15 на габбро-диабазе +БДУ и нижний слой из ЩМА-20.

Состав 2-участок от Б. Охтинского моста до ул. Помяловского со стороны Невы, ЩМА-15 на габбро-диабазе+БДУ+NAF-501.

Состав 3-участок от ул. Помяловского до Б. Охтинского моста со стороны застройки на габбро-диабазе+ПБВ+Топсел.

Состав 4-участок от М. Охтинского моста до Б. Охтинского моста со стороны Невы, ЩМА-15 на габбро-диабазе +ПБВ +БДУС.

Состав 5-участок от ул. Помяловского до Республиканской ул. со стороны Невы ЩМА-15 на габбро-диабазе+БДУ+Кратон

Состав 6-участок от Пискаревского пр. до М. Охтинского моста со стороны Невы Тип А марка 1 на габбро-диабазе+ПБВ+БДУС.

На Свердловской и Арсенальной набережных был изучен абразивный износ по-

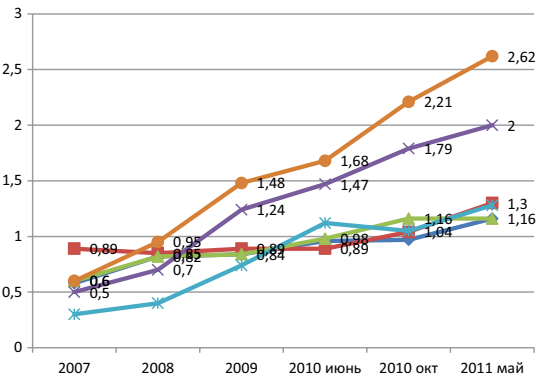


График 1

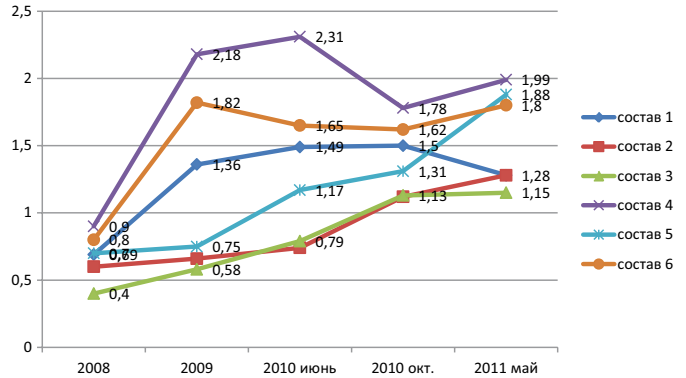


График 2

крытия из асфальтобетона, приготовленного из различного вида щебня и модификаторов вяжущего. Верхний слой покрытия на участке от Арсенальной ул. до ул. Ватутина (береговой проезд) был устроен из асфальтобетона с применением модификатора «Унирем»; за участком проводились наблюдения в течение 4 лет. К сожалению, просадки грунтового основания проезжей части, вызванные дефектами глубинного коллектора, сильно исказили данные по продольной и поперечной ровности этих участков, но покрытие, устроенное из асфальтобетона типа А марки 1 по ГОСТ 9128 с применением модификатора «Унирем», показало хорошую сопротивляемость износу, причем на этом участке наблюдалось уменьшение колеи к августу за счет эластичности смеси.

График изменения поперечной ровности (колеиности) по Свердловской набережной от Арсенальной ул. до Пискаревского проспекта с 2008 по 2011 г.

Состав 1- участок от Арсенальной ул. до ул. Ватутина со стороны застройки ЩМА-15 на габбро-диабазе + ПБВ.

Состав 2-участок от Арсенальной ул. до ул. Ватутина со стороны Невы тип А марка 1 на габбро-диабазе +БДУ+Унирем.

Состав 3-участок от ул. Ватутина до Феодосийской ул. со стороны Невы ЩМА-15 на габбро-диабазе +БДУ+Тринидад.

Состав 4-участок от ул. Ватутина до Феодосийской ул. со стороны застройки, ЩМА-15 на габбро-диабазе +БДУ+Гильсонит.

Состав 5-участок от Феодосийской ул. до Пискаревского пр. со стороны Невы ЩМА 15 на габбро-амфиболите+БДУ+Топсел.

Состав 6- участок от Пискаревского пр. до Феодосийской ул. со стороны застройки. ЩМА-15 на габбро-амфиболите+БДУ+Гильсонит

Изучение данных по скорости образования колеи износа позволило Заказчику — Комитету по благоустройству и дорожному хозяйству и Дирекции транспортного значения назначить типовые решения для Санкт-Петербурга по материалам для верхнего слоя покрытия в зависимости от назначения магистралей и улиц.

В 2012 году в Санкт-Петербурге появились приборы, позволяющие определить сопро-

тивляемость к износу от воздействия шипованной резины асфальтобетонных смесей, в соответствии EN 12697–16.

Лабораторией ООО «ЭнСиСи Роудс» по заказу ОАО «АБЗ-1» проведены испытания проб асфальтобетонных смесей и кернов из дорожного покрытия. Результаты испытаний показали, что смеси, производимые для устройства верхнего слоя покрытия проезжей части соответствуют требованиям SFS-EN 12697–16 и относятся к 1-му классу по износостойкости, т. е. могут быть применены на магистральных улицах с высокой интенсивностью движения легкового транспорта.

Но практика показывает, что гарантийный срок службы отрабатывают покрытия на далеко не всех магистралях, хотя все параметры требований как отечественных, так и зарубежных нормативов соблюдены. Требуется проведение научно-исследовательской работы по выявлению причин снижения долговечности покрытий.

Например, работы исследователей асфальтобетона МАДИ доказали, что технология зимнего содержания и обработка реагентами дорожных покрытий существенно снижает долговечность и износостойкость покрытий, что требует дополнительного изучения работы асфальтобетонных Петербурга под влиянием применяемых реагентов.

Учитывая вышеизложенное, с целью выявления обоснованного теорией и практикой срока службы дорожных покрытий Санкт-Петербурга, необходимо продолжить работы по определению зависимости составов асфальтобетона, его оптимальных модификаторов от режимов работы транспорта. Использование известных и зарекомендовавших себя подходов к изучению механики разрушения покрытия совместно с экспериментальными исследованиями асфальтобетона позволит не только дать рекомендации для строительства дорожного покрытия, но и разработать простые и доступные методики прогнозирования необходимых параметров асфальтобетона на различных участках городских магистралей.

Кроме того, в связи с увеличением количества заказчиков на строительство город-

ских улиц, дорог, площадей, крайне необходимо Альбом типовых конструкций дорожных одежд Санкт-Петербурга, что позволит упорядочить назначение конструкций в зависимости от нагрузки и, при соблюдении типовых решений, увеличить долговечность дорожных покрытий, а также улучшить благоустройство нашего города.

### Литература

1. H. Zubeck, L. Aleshire, S. Harvey and S. Porhola, E. Larson: SOCIO-ECONOMIC EFFECTS OF STUDDED TIRE USE IN ALASKA, EXECUTIVE SUMMARY, University of Alaska Anchorage, April 26, (2004).
2. Petrov Y. V., Utkin A. A. Dependence of the dynamic strength on loading rate. *Material Science* 1989;25:153–156.
3. Petrov Y. V., Morozov N. F.: On the modeling of fracture of brittle solids. *Journal of Applied Mechanics* vol. 61, (1994), pp. 710–712.
4. Morozov N., Petrov Y.: *Dynamics of Fracture*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, (2000).
5. Petrov Y. V., Morozov N. F., Smirnov V. I.: Structural micromechanics approach in dynamics of fracture. *Fatigue and fracture of Engineering Materials and Structures*, vol. 26, (2003), pp. 363–372.
6. Petrov Y. V.: Incubation time criterion and the pulsed strength of continua: fracture, cavitation, and electrical breakdown. *Doklady Physics* vol. 49, (2004), pp. 246–249.
7. Bratov V., Gruzdkov A., Krivosheev S., Petrov Y.: Energy Balance in the Crack Growth Initiation under Pulsed-Load Conditions. *Doklady Physics* vol. 49 (2004), pp. 338–341.
8. Bratov V., Petrov Y.: Optimizing energy input for fracture by analysis of the energy required to initiate dynamic mode I crack growth. *International Journal of Solids and Structures*, vol. 44, (2007), pp. 2371–2380.
9. Bratov V., Petrov Y.: Application of incubation time approach to simulate dynamic crack propagation. *Int. J. Fract.* Vol. 146, (2007), pp. 53–60.
10. J. M. M. Molenaar, X. Liu, A. A. A. Molenaar. RESISTANCE TO CRACK-GROWTH AND FRACTURE OF ASPHALT MIXTURE, Delft University of Technology, (2001).
11. McQuillen J. L. and Hicks R. G.: Construction of rubber-modified asphalt pavements. *American Society of Civil Engineers, Journal of Construction Engineering and Management*, Vol: 113, issue: 4, (1987), pp. 537–553.
12. M. A. Mull, K. Stuart, A. Yehia. Fracture resistance characterization of chemically modified crumb rubber asphalt pavement. *Journal of Materials Science*, vol. 37 (3), (2002), pp. 557–566
13. Gruzdkov A. A., Morozov N. F., Petrov Y. P. The Principle of Equal Powers for Multilevel Fracture in Continua, *Mechanics of solid state*, vol 6, (2006), pp. 198–203.
14. Lawn B. R., Wilshaw T. R., *Indentation Fracture: Principles and Application*, *Journal of Material Science*, vol.10, (1975), 1049–1081