

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-2-171-180>

УДК 691.16

## Моделирование асфальтобетона методом дискретных элементов

Канд. хим. наук, доц. В. В. Алексеенко<sup>1)</sup>, К. Ю. Вабищевич<sup>1)</sup>, доц. Е. В. Верхотурова<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет (Иркутск, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2019  
Belarusian National Technical University, 2019

**Реферат.** В статье для исследования композиционного материала, похожего по строению на асфальтобетон, рассмотрена математическая модель, которая явно учитывает наличие твердых частиц разных размеров и мягкого и пластичного связующего. Методом дискретных элементов в двумерной постановке исследовано разрушение асфальтобетонных образцов при одноосном сжатии, растяжении при расколе и сжатии по методу Маршалла. Численная модель учитывает наличие крупных частиц щебня, асфальтовой мастики, заполняющей поры в щебне, и липкой (способной восстанавливаться после разрыва) связи между частицами щебня. Силовое взаимодействие между различными компонентами асфальтобетона описано с помощью упругого отталкивания между частицами щебня, силы трения и силы, отвечающей за прилипание частиц, ввиду наличия вяжущего. Эта модель дает правильную, совпадающую с реальным экспериментом картину разрушения для одноосного сжатия, растяжения при расколе и сжатия по методу Маршалла. Именно правильная картина разрушения для трех различных схем нагружения материала позволяет оценить адекватность использованной математической модели. Установлены основные физико-механические характеристики вяжущего, которые определяют прочность и деформативность асфальтобетона. Показано, что для адекватного описания физико-механических характеристик асфальтобетона необходимо изучать и измерять свойства асфальтовяжущего – смеси битума и мелкодисперсного минерального наполнителя, определяющего параметры взаимодействия между частицами щебня. На основании выполненных авторами численных экспериментов можно предложить новые лабораторные методы испытаний смеси каменных материалов и органических связующих, которые намного более просты и, следовательно, дешевле, чем стандартные испытания асфальтобетона. Кроме того, эти испытания будут точнее предсказывать поведение асфальтобетона в реальных условиях.

**Ключевые слова:** метод дискретных элементов, асфальтобетон, асфальтовяжущее, разрушение, прочность, деформативность, одноосное сжатие, растяжение при расколе, сжатие по методу Маршалла

**Для цитирования:** Алексеенко, В. В. Моделирование асфальтобетона методом дискретных элементов / В. В. Алексеенко, К. Ю. Вабищевич, Е. В. Верхотурова // *Наука и техника*. 2019. Т. 18, № 2. С. 171–180. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-2-171-180>

## Modeling of Asphalt Concrete While Using Discrete Element Method

V. V. Alekseenko<sup>1)</sup>, K. Yu. Vabishchevich<sup>1)</sup>, E. V. Verkhoturova<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russian Federation)

**Abstract.** The paper considers a mathematical model which is used to study a composite material similar in structure to asphalt concrete and it takes into account presence of solid particles of different sizes and a soft and plastic binder. The two-dimensional method of discrete elements has been applied to investigate destruction of asphalt-concrete samples under uniaxial compression, tension during splitting and compression by the Marshall method. The numerical model takes into account presence of large particles of rubble, asphalt mastic filling rubble pores and sticky (capable of recovering after rupture) communication between rubble particles. The force interaction between various components of the asphalt concrete has been described with the help of elastic repulsion between rubble particles, friction force and force responsible for sticking of particles due to presence of a binder. This model gives a correct fracture pattern for uniaxial compression, stretching during splitting and compression according to the Marshall method and this pattern coincides with the real experiment. It is the correct picture

### Адрес для переписки

Алексеенко Виктор Викторович  
ул. Лермонтова, 83,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет  
664074, г. Иркутск, Российская Федерация,  
Тел.: +7 914 875-7915  
alavic59@yahoo.com

### Address for correspondence

Alekseenko Viktor V.  
83, Lermontov str.,  
Irkutsk National Research  
Technical University  
664074, Irkutsk, Russian Federation  
Tel.: +7 914 875-7915  
alavic59@yahoo.com

of destruction for three different schemes of material loading which makes it possible to assess the adequacy of the mathematical model which has been used. Basic physico mechanical characteristics of the binder which determine strength and deformability of asphalt concrete have been established in the paper. It has been shown that for an adequate description of physico mechanical characteristics for asphalt concrete it is necessary to study and measure properties of an asphalt binder that is a mixture of bitumen and fine mineral filler which determines parameters of interaction between rubble particles. The numerical experiments serve as a basis and make it possible to propose new laboratory methods for testing a mixture of stone materials and organic binders which are much simpler and, therefore, cheaper than standard tests on asphalt concrete. In addition these tests will more accurately predict behavior of asphalt concrete in real conditions.

**Keywords:** discrete element method, asphalt concrete, asphalt binder, fragmentation, strength, deformability, uniaxial compression, indirect tensile test, Marshall compression

**For citation:** Alekseenko V. V., Vabishchevich K. Yu, Verkhoturova E. V. (2019) Modeling of Asphalt Concrete While Using Discrete Element Method. *Science and Technique*. 18 (2), 171–180. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-2-171-180> (in Russian)

## Введение

Асфальтобетон – один из самых распространенных композиционных строительных материалов, и тем не менее теоретические основы, описывающие его поведение, еще далеки от завершения. Связано это с тем, что он состоит из сильно различающихся по свойствам и размерам компонентов: твердый щебень и пластичный битум, камни размером в десятки миллиметров и минеральный порошок размером в десятки микрон. В такой ситуации компьютерное моделирование является практически единственным инструментом, с помощью которого возможно изучение поведения данного материала во всем его многообразии. Наиболее перспективный способ, позволяющий изучать и прогнозировать различные физико-механические характеристики асфальтобетона, – метод дискретных элементов (МДЭ) [1–5]. В последние годы он получил широкое распространение при решении задач механики горных пород, сыпучих сред, грунтов, композиционных материалов [6–13].

Цель исследований авторов – обоснование применимости двумерного МДЭ, разработанного в [6, 7], для описания физико-механических характеристик такого пластичного материала, как асфальтобетон. Очевидно, что к физическому эксперименту более приближена его численная трехмерная модель. Кроме того, некоторые механизмы разрушения могут принципиально отличаться при двумерной и трехмерной моделировании. Однако большая часть современных работ по численному исследованию свойств асфальтобетона выполнена в рамках двумерной модели. Связано это с тем, что при трехмерном моделировании из-за большого объема вычислений исследователи вынуждены делать упрощающие предположе-

ния, а результаты этих упрощений чаще всего находятся на стадии проверки. При двумерном моделировании время счета сокращается как минимум на два порядка. Ограничением двумерного моделирования является то, что можно решать только те задачи, ответы на которые будут иметь значение и для трехмерных моделей.

В процессе исследований решены следующие основные задачи:

- а) сравнение механизма разрушения реальных и модельных образцов асфальтобетона;
- б) оценка влияния модуля упругости частиц щебня на прочность асфальтобетона;
- в) определение взаимосвязи между параметрами индивидуального взаимодействия между частицами щебня и физико-механическими характеристиками асфальтобетона;
- г) выбор модели для описания асфальтовой мастики (смеси битума и мелкодисперсного заполнителя).

## Метод исследования – дискретная модель асфальтобетона

Предлагаемая модель асфальтобетона является модификацией модели дискретной среды, приведенной в [6, 7], где дано подробное описание алгоритма вычислений, вида сил и способа учета этих сил при реальном взаимодействии твердых частиц. Далее приведем наиболее важные особенности именно нашей модели, которые помогут понять механизм взаимодействия твердых частиц. Исследуемый композиционный материал состоит из каменного наполнителя и асфальтовяжущего. К первому относятся щебень и песок, ко второму – битум с модифицирующими его свойствами минеральными порошками и неорганическими или органическими компонентами типа полимеров, резины и др. Скелетная часть асфальтобетона

состоит из зерен щебенки, поры которых частично или полностью заполнены пластичной мастикой – смесью асфальтовяжущего с песком. Зерна щебня, имеющие форму, как показано на рис. 1, непосредственно на своих контактах склеены тонким слоем асфальтовяжущего, т. е. мастикой без песка или с его малой долей (рис. 2).

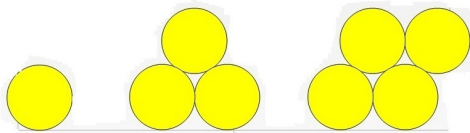


Рис. 1. Форма неразрушаемых частиц щебня  
Fig. 1. Form of non-destructive rubble particles



Рис. 2. Структура реального асфальтобетона  
Fig. 2. Structure of real asphalt concrete

В двумерной модели зерна щебня моделируются неразрушаемыми элементами – дисками единичной толщины (рис. 1); модельные частицы песка представляют собой отдельные диски единичной толщины; асфальтовяжущее в модели присутствует только в виде виртуальных пружин, склеивающих дискретные элементы. Взаимодействия между последними, возникающие в результате приложения к ним внешних нагрузок, осуществляются путем ввода четырех типов сил: отталкивания, трения, прилипания и притяжения. Силы отталкивания между дисками возникают при их пересечении. При этом значения этих сил, направленных к центрам контактирующих дисков, линейно зависят от их модуля упругости и величины их перекрытия. В результате смещения контактирующих элементов относительно друг друга между ними возникают силы трения, действующие по касательной к дискам и направленные против их относительного движения. Эти силы пропорциональны модулю силы отталкивания и коэффициенту трения элементов.

Пластичное поведение расположенной в порах между зернами щебня мастики моделируется введением направленных к центрам взаимодействующих дисков – частиц песка сил притяжения, которые возникают при соприкосновении частиц песка и пропадают при превышении заданной величины зазора между ними. Эти силы моделируются растяжением виртуальных пружин притяжения, концы которых закрепляются в центрах взаимодействующих дисков. Склеивающее воздействие связующего на контактах зерен щебня моделируется введением виртуальных пружин прилипания. Вводятся они при соприкосновении диска одного кластера с диском другого кластера. В процессе смещения и вращения дисков концы пружины прилипания расходятся, и между дисками возникают силы прилипания, пропорциональные ее длине и заданной жесткости, пружина разрывается при достижении ею заданной предельной величины. При повторном контакте данных дисков между ними снова вводится пружина прилипания.

Взаимодействие между зернами щебня и мастикой моделируется введением пружины прилипания между кластерными дисками – зернами щебня и дисками – частицами песка. Отличаются эти пружины прилипания от приведенных выше только тем, что они существенно менее прочные. Схема сил, действующих в рассматриваемой модели, представлена на рис. 3. На рисунке использованы общепринятые обозначения [14]. Оригинальное обозначение имеет только сила прилипания.

Таким образом, приведенная модель взаимодействия между элементами асфальтобетона обладает следующими свойствами. Мастика, состоящая из частиц песка, взаимодействующих между собой и с асфальтовяжущим путем отталкивания, трения и притяжения, будет пластична и относительно легко изменять свою форму под действием внешних сил. Скелет асфальтобетона, состоящий из зерен щебня, склеенных асфальтовяжущим посредством введения пружин прилипания, приобретает сдвиговую прочность и прочность на растяжение. Следует обратить внимание на то, что характеристика пружины прилипания на разрыв определяется свойствами асфальтовяжущего, а не битума. Физико-механические свойства асфальтовяжущего могут кардинально отличаться от характеристик битума, особенно при ис-

пользовании активированных и модифицированных минеральных порошков [15–20].

При исследовании физико-механических характеристик асфальтобетона, как правило, используют три схемы определения прочности цилиндрических образцов: одноосное сжатие, растяжение при расколе (indirect tensile test), сжатие по Маршаллу (рис. 4–6). Чтобы определить применимость той или иной численной модели для описания асфальтобетона, используем два критерия.

Первый, качественный, – это сравнение механизма разрушения образцов в численном и реальном экспериментах. Если учитывать все основные взаимодействия и правильно выбрать параметры, то механизмы разрушения в численном и реальном экспериментах должны быть похожи. Второй, количественный, критерий – это удовлетворительное совпадение значений прочности и работы разрушения образцов в численном и физическом экспериментах.

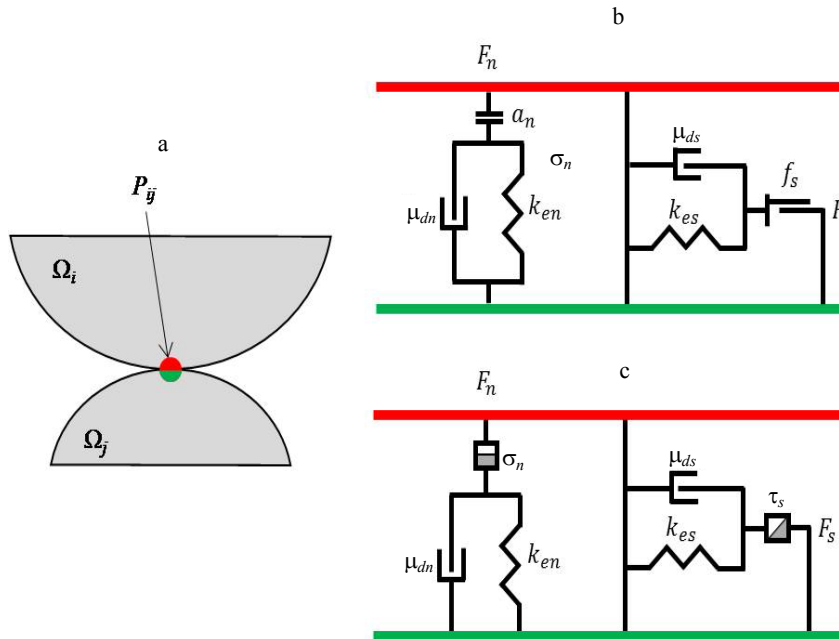


Рис. 3. Схема сил, действующих в модели: а – вязкоупругого контактного взаимодействия между частицами  $\Omega_i$  и  $\Omega_j$ , контактирующими в точке  $P_{ij}$ ; б – контакт «мастика–мастика»; с – контакты «частица–мастика» и «частица–частица»;  $\mu_{dn}$ ,  $\mu_{ds}$  – демпфирующий фактор для нормальных и сдвигающих сил;  $a_n$  – наличие жесткого контакта при столкновении частиц;  $k_{en}$ ,  $k_{es}$  – жесткость пружины при нормальном контакте и сдвиге;  $\sigma_n$ ,  $\tau_s$  – жесткость пружины прилипания в нормальном и касательном направлениях;  $F_S$  – коэффициент трения; наполовину зачерненный квадрат – сила прилипания

Fig. 3. Scheme of forces acting in model: а – viscoelastic contact interactions between particles  $\Omega_i$  and  $\Omega_j$  contacting in point  $P_{ij}$ ; б – “mastic–mastic” contact; с – “particle–mastic” and “particle–particle” contacts;  $\mu_{dn}$ ,  $\mu_{ds}$  – damping factor for normal and shear forces;  $a_n$  – presence of hard contact at collision of particles;  $k_{en}$ ,  $k_{es}$  – spring stiffness when in normal contact and shear;  $\sigma_n$ ,  $\tau_s$  – stiffness of spring sticking in normal and tangential directions;  $F_S$  – friction coefficient; half-blackened square – adhesion strength

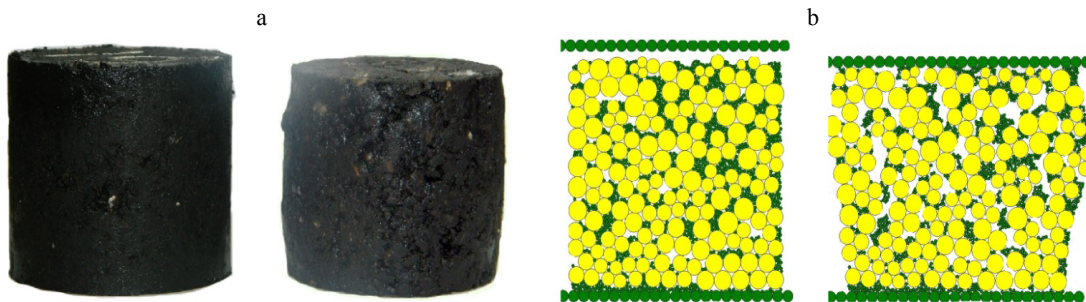


Рис. 4. Картина разрушения при одноосном сжатии реального образца (а) и компьютерной модели (б) для липкой связи между частицами щебня

Fig. 4. Fragmentation pattern at uniaxial compression of real sample (а) and computer model (б) for adhesive bond between rubble particles

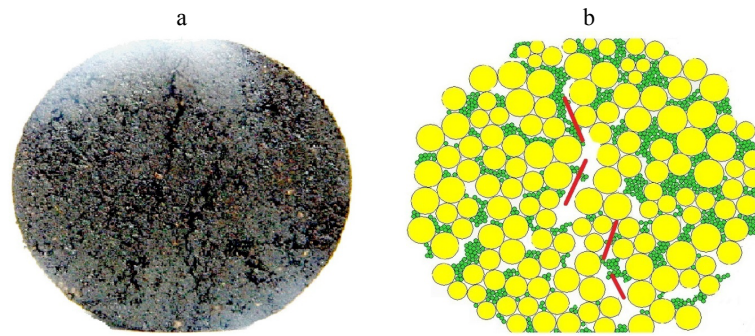


Рис. 5. Картина разрушения при растяжении при расколе реального образца (а) и компьютерной модели (b) для липкой связи между частицами щебня

Fig. 5. Fragmentation pattern at indirect tensile test of real sample (a) and computer model (b) for adhesive bond between rubble particles

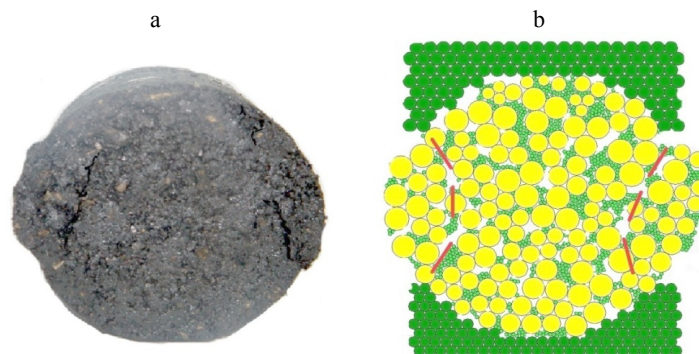


Рис. 6. Картина разрушения при испытаниях по Маршаллу реального образца (а) и компьютерной модели (b) для липкой связи между частицами щебня

Fig. 6. Fragmentation pattern at Marshall testing of real sample (a) and computer model (b) for adhesive bond between rubble particles

Одна из важных характеристик, влияющих на прочность асфальтобетона, – форма и гранулометрический состав фракции щебня. Кроме того, большое влияние на прочность и механизм разрушения оказывает плотность упаковки [21, 22]. В двумерном случае зависимость прочности от гранулометрического состава и от пористости может быть иной. Поэтому на данном этапе исследований нет необходимости подбирать форму и состав твердых частиц в строгом соответствии с реальными трехмерными образцами. Большинство экспериментов проводилось на одном и том же образце, из которого вырезались нужные по форме экземпляры для разных схем испытаний. Модельный образец асфальтобетона изготавливался путем насыпки в емкость, ограниченную с боков и снизу жесткими вертикальными стенками и горизонтальным основанием, кластеров различных размеров, моделирующих зерна щебня, и на порядок меньших дисков, с помощью которых моделировались частицы песка.

На первом этапе исследований определялся характер взаимодействия, ответственного за прилипание зерен щебня, и оценивалось влияние модуля упругости зерен щебня на прочностные характеристики образца. Дело в том, что возможны два принципиально разных описания взаимодействия между зернами щебня – хрупкая и липкая связи. В случае хрупкой связи между зернами щебня после ее разрыва она не восстанавливается при их повторном соприкосновении, при липкой – восстанавливается и, более того, в процессе деформирования образца образуются новые липкие связи при контакте зерен, ранее не соприкасавшихся между собой. Интуитивно понятно, что для описания асфальтобетона больше подходит липкая связь, но для строгости подхода необходимо было увидеть разницу в механизмах разрушения. Численное моделирование показало, что при хрупкой связи механизм разрушения был похож на механизм реального разрушения цементобетонных образцов (рис. 7), а при липкой связи происходило разбухание образцов (рис. 4), что характерно для асфальтобетона.

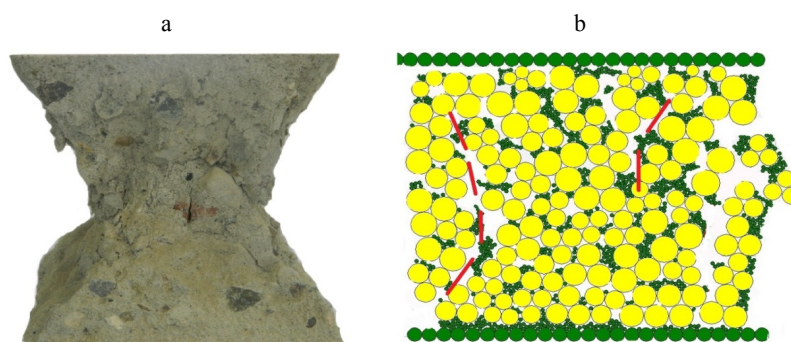


Рис. 7. Картина разрушения при одноосном сжатии реального образца (а) и компьютерной модели (b) для хрупкой связи между частицами щебня

Fig. 7. Fragmentation pattern at uniaxial compression of real sample (a) and computer model (b) for brittle bond between rubble particles

Поэтому в дальнейшем численные эксперименты проводились только с липкой связью между зернами щебня. Расчеты показали также, что при одноосном сжатии образец с хрупкой связью между зернами щебня имеет прочность более чем в два раза меньшую, чем с липкой связью при одной и той же прочности отдельной связи.

Далее исследовался вопрос о выборе величины модуля упругости зерен щебня. При численном решении данной задачи возникает проблема, заключающаяся в том, что скорость счета программ, использующих МДЭ, обратно пропорциональна квадратному корню из модуля упругости. Поэтому желательно выбирать наименьшее значение модуля упругости, но при этом не оказывающее существенного влияния на прочностные характеристики. Проведенные численные эксперименты на одноосное сжатие и раскол показали, что изменение модуля упругости зерен щебня даже на два порядка не приводит к заметному изменению прочности образцов. В дальнейших экспериментах модуль упругости зерен щебня выбирался равным 5 ГПа, что в десятки раз меньше реальных значений. В оправдание такого выбора отметим, что наличие тонкого слоя асфальтовяжущего вокруг зерен щебня приведет к заметному реальному уменьшению их модуля упругости. Как показывает опыт моделирования по МДЭ [7], основным критерием при выборе данной характеристики является то, что жесткость пружин отталкивания должна быть как минимум на порядок больше жесткости пружин всех остальных взаимодействий.

Второй этап исследований был посвящен описанию взаимодействия, ответственного за прилипание зерен щебня. Как показали результаты численного эксперимента, разрушающая нагрузка и деформация образца при одноосном сжатии связаны с прочностью и максимальной деформацией разрыва виртуальной пружины единичной связи (рис. 8, 9). Из рис. 8 следует, что прочность образца на сжатие в значительной степени определяется прочностью единичной связи на сдвиг и разрыв, трение вносит небольшой вклад. Отметим, что в широком диапазоне значений прочность образца на одноосное сжатие линейно зависит от прочности связи между частицами щебня на сдвиг и разрыв. Деформация образца в момент разрушения также линейно зависит от максимальной деформации разрыва единичной связи (рис. 9), но не так сильно, как прочность. Это связано с тем, что в процессе разрушения за счет прилипания образуются новые связи, и образец в целом более пластичен, чем единичная связь.

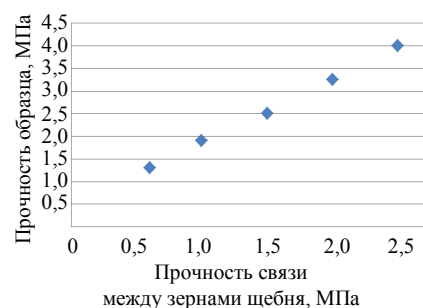


Рис. 8. Зависимость прочности образца при одноосном сжатии от прочности связи между зернами щебня

Fig. 8. Dependence of sample strength at uniaxial compression on adhesion strength between rubble particles

Деформативность образца определяется как изменение длины образца, деленное на его начальную длину. Таким образом, характеристики прочности и максимальной деформации разрыва виртуальной пружины связи, используемые в численном эксперименте, могут быть извлечены из реального эксперимента по разрушению асфальтобетонных образцов. Конечно, нужно помнить, что и форма частиц, и коэффициент трения оказывают определенное влияние на прочность образцов.

На третьем этапе решался вопрос выбора модели для описания асфальтовой мастики. Основные свойства мастики: пластичность, несжимаемость, определенная когезионная прочность и адгезия к частицам щебня. Все эти характеристики удобно моделировать с помощью набора твердых мелких частиц (чтобы могли поместиться в поры щебня), обладающих взаимодействием притяжения и небольшим прилипанием. Аттракция обеспечивает прочность мастики на разрыв, позволяя ей при этом пластично деформироваться; прилипание – связь мастики с частицами щебня; твердость мелких частиц, входящих в состав мастики, обеспечивает несжимаемость. Частицы мастики обладают заметно меньшим прилипанием, чем частицы щебня. Это связано с тем, что между частицами щебня находится асфальтовяжущее (смесь битума и минерального порошка), а, как известно из реального эксперимента [15], мелкодисперсный порошок сильно изменяет структуру битума и увеличивает его жесткость.

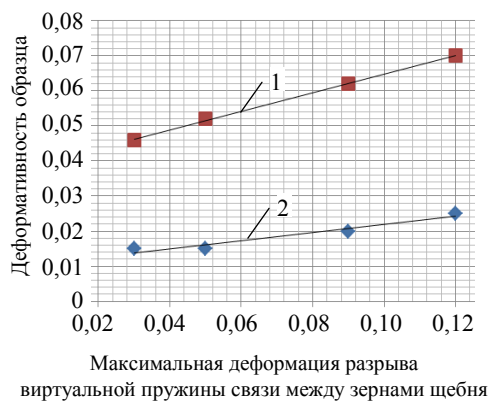


Рис. 9. Зависимость деформативности образца при одноосном сжатии от деформативности связи между частицами щебня: 1 – деформация при разрушении; 2 – деформация, при которой появляется первая трещина

Fig. 9. Dependence of sample deformability at uniaxial compression on connection deformability between rubble particles: 1 – deformation at fragmentation; 2 – first split deformation

Правильность модели описания асфальтовой мастики обосновывается следующими численными экспериментами. Во-первых, исследуются картины разрушения образцов при трех схемах нагружения (рис. 4–6), из которых следует, что рассматриваемая модель достаточно корректно описывает все три схемы испытаний асфальтобетонных образцов. Во-вторых, определяются прочность образца и работа разрушения при разных схемах нагружения. При этом важны не абсолютные значения характеристик, а относительные значения при разных схемах нагружения. Дело в том, что в настоящее время не известны реальные значения жесткости и деформативности связей между частицами, а они являются параметрами численной модели. Но при заданных параметрах единичной связи получаются определенные соотношения между прочностью образца и работой разрушения при разных схемах нагружения. Значения прочности, работы разрушения и деформация образцов в момент разрушения приведены в табл. 1. При этом прочность связи, ответственной за прилипание частиц щебня, равнялась 1 МПа, коэффициент трения между частицами щебня – 0,3, прочность связи, ответственной за аттракцию частиц асфальтовой мастики, – 1 МПа.

Таблица 1

Физико-механические характеристики асфальтобетона в модели дискретных элементов  
Physical and mechanical characteristics of asphalt concrete in model of discrete element method

Схема нагружения	Прочность, МПа	Работа разрушения, о. е.	Относительная деформация в момент разрушения
Раскол	0,5	0,007	0,028
Одноосное сжатие	1,5	0,020	0,030
Сжатие по методу Маршалла	2,6	0,040	0,035

Для сравнения численных результатов с реальным экспериментом удобно выразить работу разрушения в относительных единицах, где в качестве единицы измерения введем следующую величину:

$$A_0 = PSL, \quad (1)$$

где  $P$  – прочность образца;  $S$  – площадь сечения образца, перпендикулярного к силе;  $L$  – высота образца.

Рассмотрим реальный эксперимент по одноосному сжатию асфальтобетонных образцов диаметром и высотой 71 мм при 50 °С и скорости 50 мм/мин (ГОСТовские испытания при определении угла внутреннего трения и сцепления); для битума марки БНД 90/130 прочность примерно равна 2 МПа. Тогда для эталона работы получаем

$$A_0 = 2 \cdot 10^6 \cdot 40 \cdot 10^{-4} \cdot 0,071 = 568 \text{ Дж.} \quad (2)$$

Работа разрушения реальных образцов при одноосном сжатии при 50 °С равна примерно 15 Дж, или 0,026 о. е. Работа разрушения реальных асфальтобетонных образцов при сжатии по методу Маршалла обычно в два-три раза больше, чем при одноосном сжатии. Деформативность образцов асфальтобетона типа Б по ГОСТ 9128–2013 при одноосном сжатии при 50 °С составляет 0,026. Получается неплохое совпадение численных расчетов с экспериментами, при условии, что используется двумерная модель.

Отметим, что в отличие от [8, 11–13] в нашей работе такое пластическое вещество, как битум, описывается упругой силой, которую мы называем прилипанием. Отличие силы прилипания от чисто упругой заключается в том, что при определенном растяжении она рвется, а при обратном сближении частиц эта сила восстанавливается. Свойства связующего – марка битума, температура, наличие полимерных добавок и другие – учитываются путем изменения параметров  $k_{en}$ ,  $k_{es}$ ,  $\sigma_n$ ,  $\tau_s$ . Это свойство модели позволяет проводить исследования асфальтобетона при различных температурах и с разными связующими. Учет пластической деформации битума при численном моделировании заставляет вводить в модель дополнительные параметры, значения которых не определены в реальных экспериментах. Поэтому модели, использованные в [8, 11–13], необходимы и оправданы при описании динамических экспериментов. Для описания статических экспериментов, по нашему мнению, возможно исполь-

зовать только упругие силы, значительно ускоряющие вычисление.

Альтернативный методу дискретных элементов подход для описания асфальтобетона использовался в [23]. Там определены свойства связующего из реального эксперимента по разрушению образцов асфальтобетона при различных температурах и механических нагрузках. Затем полученные характеристики связующего использованы для аналитического описания асфальтобетона с применением модели фракталов. Основная проблема при таком подходе заключается в том, что в экспериментах с асфальтобетоном очень трудно корректно вычислить параметры связующего (МДЭ как раз позволяет оценить взаимосвязь характеристик связующего и прочностных характеристик асфальтобетона). Как показано в [23], свойства связующего очень сильно (экспоненциально) зависят от температуры и других параметров, поэтому для получения достоверных данных необходимо проведение большого числа громоздких (затратных) и точных экспериментов. Если бы авторы [23] смогли бы надежно установить характеристики связующего, то эти данные с успехом могли использоваться при моделировании методом дискретных элементов без необходимости привлечения модели фракталов.

Еще одним фактором в пользу данного выбора модели представления мастики служит то, что она описывается параметрами, которые можно определить экспериментально. Прочность мастики на разрыв и ее растяжимость однозначно определяют характеристики взаимодействия притяжения. Взаимодействие мастики и щебня, описываемое прилипанием, также можно определить экспериментально.

Таким образом, если из простого реального эксперимента определить характеристики единичной связи, то с помощью численного моделирования можно определить прочностные характеристики образцов любой формы. Один из наиболее важных для практики выводов заключается в следующем: для более адекватного описания физико-механических характеристик асфальтобетона необходимо изучать и измерять не свойства битума, а свойства асфальтовязующего (смеси битума с мелкодисперсными минеральными наполнителями).



## ВЫВОДЫ

1. С помощью метода дискретных элементов проанализирована возможность моделирования различных схем нагружения асфальтобетонных образцов. Для моделирования использована двумерная модель, которая позволяет установить основные физические параметры, определяющие прочность и деформативность реального асфальтобетона.

2. Предложена модель описания взаимодействия между различными компонентами асфальтобетона. Наиболее похожую на реальный эксперимент картину его разрушения дает липкая, а не хрупкая связь между частицами щебня.

3. Показано, что прочность и деформативность образцов однозначно зависят от характеристик единичной связи между компонентами асфальтобетона.

Авторы выражают искреннюю благодарность Г. Н. Хану, который не только предоставил программу по методу дискретных элементов, но и производил необходимые модификации программы по просьбе авторов и внес неоценимый вклад в написание статьи.

## ЛИТЕРАТУРА

- Cundall, P. A. A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies / P. A. Cundall, O. D. L. Strack // *Geotechnique*. 1979. No 29. P. 47–65.
- Zhang, D. The Calculation of Contact Forces Between Particles Using Spring and Damping Models / D. Zhang, W. Whiten // *Powder Technology*. 1996. Vol. 88. P. 59–64. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(96\)03104-x](https://doi.org/10.1016/0032-5910(96)03104-x).
- Zhang, D. A New Calculation Method for Particle Motion in Tangential Direction in Discrete Element Simulations / D. Zhang, W. Whiten // *Powder Technology*. 1999. Vol. 102, No 3. P. 235–243. [https://doi.org/10.1016/s0032-5910\(98\)00209-5](https://doi.org/10.1016/s0032-5910(98)00209-5).
- Potyondy, D. O. A Bonded-Particle Model for Rock / D. O. Potyondy, P. A. Cundall // *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.* 2004. Vol. 8, No 41. P. 1329–1364. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.09.011>.
- Дорофеенко, С. О. Численное моделирование течения бидисперсного сыпучего материала во вращающемся реакторе / С. О. Дорофеенко, Е. В. Полианчик, Г. Б. Манелис // *ДАН*. 2008. Т. 422, № 5. С. 615–617.
- Хан, Г. Н. О несимметричном режиме разрушения массива горных пород в окрестности полости / Г. Н. Хан // *Физическая мезомеханика*. 2008. Т. 11, № 1. С. 109–114.
- Хан, Г. Н. Моделирование методом дискретных элементов динамического разрушения горной породы / Г. Н. Хан // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2012. Т. 48, № 1. С. 110–117.
- Potyondy, D. O. The Bonded-Particle Model as a Tool for Rock Mechanics Research and Application: Current Trends and Future Directions / D. O. Potyondy // *Geosystem Engineering*. 2015. Vol. 18, No 1. P. 1–28. <https://doi.org/10.1080/12269328.2014.998346>.
- Discrete Element Method Modeling of the Rheological Properties of Coke/Pitch Mixtures / Behzad Majidi [et al.] // *Materials*. 2016. Vol. 9, No 5. P. 334–346. <https://doi.org/10.3390/ma9050334>.
- Yade Reference Documentation [Electronic Resource] / V. Šmilauer [et al.]. 2010. Mode of access: <http://yadedem.org/doc/>. Date of access: 29 April 2016.
- Investigation of Micro-Mechanical Response of Asphalt Mixtures by a Three-Dimensional Discrete Element Model / Shuguangl Hou [et al.] // *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. ed.* 2015. Vol. 30, No 2. P. 338–343. <https://doi.org/10.1007/s11595-015-1150-5>.
- Zezelew, H. M. Micromechanical Modeling of Asphalt Concrete Uniaxial Creep Using the Discrete Element Method / H. M. Zezelew, A. T. Papagiannakis // *Journal Road Materials and Pavement Design*. 2010. Vol. 11, No 3. P. 613–632. <https://doi.org/10.1080/14680629.2010.9690296>.
- You, Z. Discrete Element Modeling to Predict the Modulus of Asphalt Concrete Mixtures / Z. You, W. G. Buttlar // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2004. Vol. 16, No 2. P. 140–146. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2004\)16:2\(140\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2004)16:2(140)).
- Potyondy, D. Material-Modeling Support in PFC [fistPkg25]: Technical Memorandum ICG7766-L, March 16, 2017 / D. Potyondy. Minneapolis, Minnesota: Itasca Consulting Group, Inc. 2017.
- Алексеевко, В. В. Асфальтовяжущие, модифицированные полимерами и наночастицами углерода / В. В. Алексеевко, Ю. В. Салтанова // *Вестник ИргТУ*. 2012. № 12. С. 131–133.
- Андронов, С. Ю. Сравнение результатов получения композиционных асфальтобетонных смесей дисперсно-армированных с добавкой базальтового фиброволокна / С. Ю. Андронов, А. А. Задирака // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2017. № 2. С. 161–165.
- Rheological Properties and Chemical Analysis of Nano-Clay and Carbon Microfiber Modified Asphalt with Fourier Transform Infrared Spectroscopy / Hui Yao [et al.] // *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 38. P. 327–337.
- Шеховцова, С. Ю. Влияние углеродных нанотрубок на свойства ПБВ и асфальтобетона / С. Ю. Шеховцова, М. А. Высоцкая // *Вестник Московского государственного строительного университета*. 2015. № 11. С. 110–117.
- Evaluating the Effectiveness of Producing the Activated Mineral Powders from Technogenic Raw Materials for Asphalt Mixtures / A. Trautvain [et al.] // *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 117. P. 350–356. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.172>.
- Kjndrashov, A. A. Dynamic Modulus Application in the Asphalt Compaction Rheological Model for Pavement Construction / A. A. Kjndrashov, A. A. Shestopalov //

- Magazine of Civil Engineering. 2014. No 7. P. 103–111. <https://doi.org/10.5862/mce.51.7>
21. Prediction of the Dynamic Modulus of Superpave Mixes / A. A. Abdo [et al.] // Bearing Capacity of Roads Railways and Airfields. 2009. Vol. 305. P. 314–320. <https://doi.org/10.1201/9780203865286.ch33>.
  22. Роско, К. Значение деформаций в механике грунтов / К. Роско // Периодический сборник переводов иностранных статей. Механика. 1971. № 3. С. 91–145.
  23. Кирюхин, Г. Н. Термофлуктуационная и фрактальная модель долговечности асфальтобетона / Г. Н. Кирюхин // Дороги и мосты. 2014. Т. 31, № 1. С. 247–268.
- Поступила 15.10.2018  
Подписана в печать 18.12.2018  
Опубликована онлайн 29.03.2019
- #### REFERENCES
1. Cundall P. A., Strack O. D. L. (1979) A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies. *Geotechnique*, 29, 47–65. <https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.1.47>.
  2. Zhang D., Whiten W. (1996) The Calculation of Contact Forces Between Particles Using Spring and Damping Models. *Powder Technology*, 88, 59–64. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(96\)03104-x](https://doi.org/10.1016/0032-5910(96)03104-x).
  3. Zhang D., Whiten W. (1999) A New Calculation Method for Particle Motion in Tangential Direction in Discrete Element Simulations. *Powder Technology*, 102 (3), 235–243. [https://doi.org/10.1016/s0032-5910\(98\)00209-5](https://doi.org/10.1016/s0032-5910(98)00209-5).
  4. Potyondy D. O., Cundall P. A. (2004) A Bonded-Particle Model for Rock Cundall. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41 (8), 1329–1364. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmm.2004.09.011>.
  5. Dorofeenko S. O., Polianchyk E. V., Manelis G. B. (2008) Numerical Simulation of Bidisperse Granular Material Flow in Rotating Reactor. *Doklady Physics*, 53 (10), 510–512. <https://doi.org/10.1134/s1028335808100029>.
  6. Khan G. N. (2008) On Unbalanced Conditions of Rock Fragmentation Near Hollow. *Fizicheskaya Mezomekhanika Physical Mesomechanics Journal*, 11 (1), 109–114 (in Russian).
  7. Khan G. N. (2012) Discrete Element Modeling of Rock Fragmentation Dynamics. *Journal of Mining Science*, 48 (1), 110–117. <https://doi.org/10.1134/s1062739148010108>.
  8. Potyondy D. O. (2015) The Bonded-Particle Model as a Tool for Rock Mechanics Research and Application: Current Trends and Future Directions. *Geosystem Engineering*, 18 (1), 1–28. <https://doi.org/10.1080/12269328.2014.998346>.
  9. Behzad Majidi, Seyed Taghavi, Mario Fafard, Donald Ziegler, Houshang Alamdari (2016) Discrete Element Method Modeling of the Rheological Properties of Coke/Pitch Mixtures. *Materials*, 9 (5), 334–346. <https://doi.org/10.3390/ma9050334>.
  10. Šmilauer V., Catalano E., Chareyre B., Dorofeenko S., Duriez J., Gladky A., Kozicki J., Modenese C., Scholtès L., Sibille L., Stránský J., Thoeni K. (2010) *Yade Reference Documentation*. Available at: <http://yade-dem.org/doc/>. (Accessed 29 April 2016).
  11. Shuguang Hou, Dong Zhang, Xiaoming Huang, Yongli Zhao (2015) Investigation of Micro-Mechanical Response of Asphalt Mixtures by a Three-Dimensional Discrete Element Model. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. ed.*, 30 (2), 338–343. <https://doi.org/10.1007/s11595-015-1150-5>.
  12. Zelelew H. M., Papagiannakis A. T. (2010) Micromechanical Modeling of Asphalt Concrete Uniaxial Creep Using the Discrete Element Method. *Journal Road Materials and Pavement Design*, 11 (3), 613–632. <https://doi.org/10.1080/14680629.2010.9690296>.
  13. You Z., Buttlar W. G. (2004) Discrete Element Modeling to Predict the Modulus of Asphalt Concrete Mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16 (2), 140–146. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2004\)16:2\(140\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2004)16:2(140)).
  14. Potyondy D. (2017) *Material-Modeling Support in PFC [fstPkg25]*. Technical Memorandum ICG7766-L, March 16, 2017. Itasca Consulting Group, Inc. Minneapolis, Minnesota.
  15. Alekseenko V. V., Saltanova Yu. V. (2012) Asphalt Binders Modified with Polymers and Carbon Nanoparticles. *Vestnik Irkutskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*, (12), 131–133 (in Russian).
  16. Andronov S. Yu., Zadiraka A. A. (2017) Comparison of Results for Obtaining Composite Asphalt Mixtures with Dispersed Reinforcement and Addition of Basalt Fibre. *Vestnik Kuzbasskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta = Vestnik of Kuzbass State Technical University*, (2), 161–165 (in Russian).
  17. Hui Yao, Zhanping You, Liang Li, Shu Wei Goh, Chee Huei Lee, Yoke Khin Yap, Xianming Shi (2013) Rheological Properties and Chemical Analysis of Nano-Clay and Carbon Microfiber Modified Asphalt with Fourier Transform Infrared Spectroscopy. *Construction and Building Materials*, 38, 327–337. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.004>.
  18. Shekhovtsova S. Yu., Vysotskaya M. A. (2015) Effect of Carbon Nanotubes on the Properties of PMB and Asphalt Concrete. *Vestnik MGSU*, (11), 110–117 (in Russian). <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2015.11.110-119>.
  19. Trautvain A., Yadykina V., Gridchin A., Pashkova C. (2015) Evaluating the Effectiveness of Producing the Activated Mineral Powders from Technogenic Raw Materials for Asphalt Mixtures. *Procedia Engineering*, 117, 350–356. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.172>.
  20. Kjndrashov A. A., Shestopalov A. A. (2014) Dynamic Modulus Application in the Asphalt Compaction Rheological Model for Pavement Construction. *Magazine of Civil Engineering*, (7), 103–111. <https://doi.org/10.5862/mce.51.7>.
  21. Abdo A. A., Nielsen R., Jung S., Weaver T., Bayomy F., Santi M. (2009) Prediction of the Dynamic Modulus of Superpave Mixes. *Bearing Capacity of Roads Railways and Airfields*, 314–320. <https://doi.org/10.1201/9780203865286.ch33>.
  22. Rosko K. (1971) Deformation Importance in Soil Mechanics. *Periodical Digest of Foreign Article Translations. Mechanics*, (3), 91–145.
  23. Kiryukhin G. N. (2014) Thermal Fluctuation and Fractal Model of Asphalt Concrete Durability. *Dorogi i Mosty = Roads and Bridges*, 31 (1), 247–268 (in Russian).

Received: 15.10.2018

Accepted: 18.12.2018

Published online: 29.03.2019