

УДК 625.7

**Сергей Егорович КРАВЧЕНКО**,  
кандидат технических наук,  
заведующий кафедрой  
"Строительство  
и эксплуатация дорог"  
Белорусского национального  
технического университета

**Жанна Владимировна РЕУТ**,  
старший преподаватель кафедры  
"Строительство  
и эксплуатация дорог"  
Белорусского национального  
технического университета

**Сергей Викторович ШИЛЬКО**,  
кандидат технических наук,  
заведующий отделом  
Института механики  
металлополимерных систем  
им. В. А. Белого НАН Беларуси, г. Гомель

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УПРУГИХ И ВЯЗКОУПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСФАЛЬТОБЕТОНА

### PREDICTION OF ELASTIC AND VISCO-ELASTIC CHARACTERISTICS OF ASPHALT CONCRETE

В статье рассматривается мезомеханический подход при прогнозировании упругих и вязкоупругих характеристик асфальтобетона при заданной объемной доле щебня и известных свойствах материала матрицы, основанный на рассмотрении асфальтобетона как двухкомпонентного дисперсно-наполненного композита с выделением в нем структурного элемента. Предложено вязкоупругое деформирование материала матрицы и асфальтобетона в целом характеризовать тремя параметрами: статическим модулем Юнга, временем релаксации и временем ретардации, а для описания процесса его течения использовать модели резонансной дисперсии и Богуславского.

This article describes a mezo-mechanical approach for predicting elastic and visco-elastic characteristics of asphalt concrete at the given aggregate volume fraction and known properties of the matrix material. The approach is based on considering the asphalt concrete as a two-component disperse-filled composite with a selected structural element. It was proposed to characterize the visco-elastic deformation of the matrix material and asphalt concrete by three parameters: the static Young's modulus, relaxation time and retardation time. The resonance dispersion model and Boguslavsky model were offered for description of the deformation process.

#### ВВЕДЕНИЕ

Разработка новых и модификация известных методик прогнозирования упругих и вязкоупругих характеристик асфальтобетона при заданной объемной доле щебня и известных свойствах материала матрицы при мезомеханическом подходе позволит обоснованно задавать требования к характеристикам составляющих асфальтобетона и его структуре в целом, обеспечивающих качество дорожного покрытия [1]. Эти методики должны быть основаны на учете реального поведения материалов в условиях функционирования дорожного покрытия и классических подходов механики композитов [2, 3]. При этом асфальтобетоны, относимые к наполненным бетонам, обладают рядом особенностей, снижающих точность расчетных характеристик, получаемых на основе большинства известных методов гомогенизации, но которые могут быть учтены в рамках мезомеханического подхода [4], предусматривающего выделение повторяющихся структурных элементов и анализ их деформирования с последующим переходом к макроскопическим параметрам (характеристикам композита в целом). К одной из наиболее значимых особенностей следует отнести ту, что жесткость одной из компонент исследуемой системы (щебень) существенно превышает жесткость матрицы (минеральный порошок, битум), что приводит к значительным градиентам свойств, напряжений и деформаций по объему композита и, как следствие, к снижению достоверности существующих расчетных методик.

Анализ напряженно-деформированного состояния различных структурных элементов асфальтобетона, изложенный в работах [5–7], основан на учете эмпирических

параметров и использовании трудоемких математических выкладок для описания влияния структуры исследуемого композита на его эффективные механические характеристики. В данных работах анализ влияния структуры исследуемого композита на его эффективные механические характеристики выполнен без учета отмеченных выше особенностей механических свойств асфальтобетона, что вызвало необходимость введения в расчетные методики ряда упрощений и допущений, без которых методики были бы излишне громоздки и сложны в применении.

При описании механического поведения исследуемых материалов используют не только модуль Юнга и предел прочности, но и набор вязкоупругих характеристик [1]. Данные характеристики во многом определяют сдвигоустойчивость и трещиностойкость дорожно-строительных композитов [8]. Поэтому при проектировании дорожных покрытий состав асфальтобетона выбирают таким образом, чтобы обеспечить заданные значения вязкоупругих свойств. Подобная оптимизация состава композита возможна только на основе расчетной методики, позволяющей определять эффективные реологические характеристики исследуемого материала. До настоящего времени для расчета свойств асфальтобетона используются главным образом эмпирические соотношения [9, 10], имеющие ограниченную область применения и требующие проведения многочисленных экспериментов.

В связи с вышесказанным авторы статьи предлагают упрощенную методику расчета эффективных механических и реологических характеристик асфальтобетона, основанную на методе выделения структурного элемента и позволяющую реально задавать требования к ис-

ходным составляющим асфальтобетона и прогнозировать их дальнейшее поведение в его структуре.

### ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСФАЛЬТОБЕТОНА

В качестве первого приближения рассмотрен асфальтобетон как двухкомпонентная система, в которой относительно мягкий материал матрицы (песок и минеральный порошок совместно с битумом) дисперсно наполнен жесткими гранулами (щебнем). При анализе деформирования подобного композита выделяется структурный элемент в виде куба с длиной ребра  $L_0$ , образованного материалом матрицы и содержащего сферическое жесткое включение диаметром  $d$  (рис. 1), который определяется по формуле

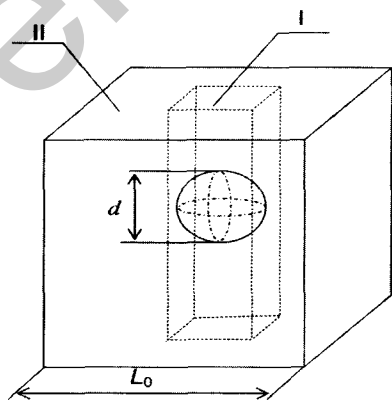
$$d = L_0 \left( \frac{\varphi}{\varphi_{\max}} \right)^{1/3}, \quad (1)$$

где  $\varphi$  — объемная доля наполнителя;  
 $\varphi_{\max}$  — максимальная объемная доля наполнителя.

Объемная доля наполнителя в исследуемых материалах не может превышать значения  $\varphi_{\max}$ . Для реальных структур дисперсно-наполненных композитов используется значение предельной доли  $\varphi_{\max} = 0,605$ , что является средним между соответствующими значениями  $\varphi_{\max}$  для кубической ( $\varphi_{\max} = \pi/6 = 0,524$ ) и кубической объемноцентрированной ( $\varphi_{\max} = \pi\sqrt{3}/8 = 0,685$ ) упаковок сфер одного радиуса [11]. Размер включения характеризуется безразмерной величиной

$$\gamma = \frac{d}{L_0} = \left( \frac{\varphi}{\varphi_{\max}} \right)^{1/3}. \quad (2)$$

Рассмотрим одноосное напряженное состояние структурного элемента, представленного на рис. 1, используя упрощенный подход, предложенный в работе [11], в соответствии с которым структурный элемент рассматривается как система, состоящая из двух параллельно соединенных подэлементов. Подэлемент I состоит из включения и фрагментов матрицы, расположенных непосредственно "над" и "под" включением. Подэлемент II образован фрагментами матрицы, расположенными "вокруг" подэлемента I.



I и II — выделяемые подэлементы

Рис. 1. Структурный элемент

Макроскопическое осевое напряжение определяется как комбинация осевых напряжений, возникающих в I ( $\sigma_I$ ) и II ( $\sigma_{II}$ ) подэлементах

$$\sigma = (1 - \gamma^2) \cdot \sigma_{II} + \gamma^2 \cdot \sigma_I. \quad (3)$$

Подэлемент II образован только материалом матрицы. Тогда с учетом сделанного допущения осевое напряжение  $\sigma_{II}$  определяется следующим образом:

$$\sigma_{II} = \sigma_m(\varepsilon), \quad (4)$$

где  $\sigma_m(\varepsilon)$  — зависимость осевого напряжения от продольной деформации для материала матрицы.

В общем случае данная зависимость нелинейна. Для осевого напряжения в подэлементе I можно записать

$$\sigma_I = \sigma_m(\varepsilon_I), \quad (5)$$

где  $\varepsilon_I$  — продольная деформация фрагмента матрицы, расположенного "над" включением.

Величина  $\varepsilon_I$  определяется из уравнения

$$\sigma_m(\varepsilon_I) = \sigma_f(\varepsilon_f), \quad (6)$$

где  $\sigma_f(\varepsilon_f)$  — зависимость осевого напряжения от продольной деформации для материала включения;

$\varepsilon_f$  — продольная деформация включения.

Поскольку деформации  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon_I$ ,  $\varepsilon_f$  связаны соотношением:  $\varepsilon = \varepsilon_I(1 - \gamma) + \varepsilon_f\gamma$ , то связь макроскопического осевого напряжения с продольной деформацией исследуемого композита описывается уравнениями:

$$\begin{aligned} \sigma &= (1 - \gamma^2) \cdot \sigma_m(\varepsilon) + \gamma^2 \cdot \sigma_m(\varepsilon_I), \\ \sigma_m(\varepsilon_I) &= \sigma_f \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon_I \cdot (1 - \gamma)}{\gamma} \right). \end{aligned} \quad (7)$$

При линейно упругом деформировании компонент композита уравнения (7) позволяют получить выражение для эффективного модуля Юнга асфальтобетона

$$E = E_m \left[ 1 - \gamma^2 + \frac{\gamma^2}{\chi\gamma + 1 - \gamma} \right], \quad (8)$$

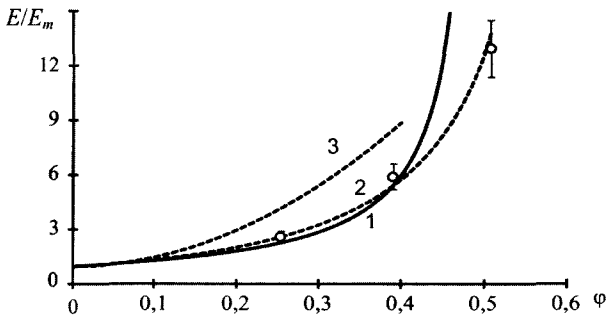
где  $E_m$  — модуль Юнга материала матрицы;  
 $\chi$  — коэффициент, определяемый по формуле

$$\chi = \frac{E_m}{E_f} \ll 1, \quad (9)$$

здесь  $E_f$  — модуль Юнга материала включения.

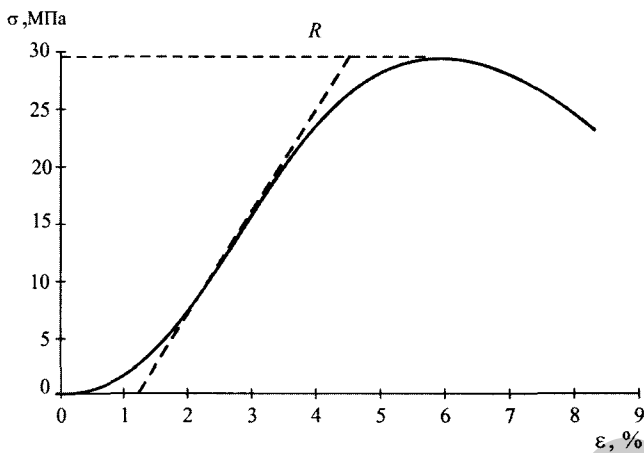
Для апробации расчетной методики были сопоставлены результаты использования соотношения (8) с результатами, полученными на основе известного эмпирического соотношения, приведенного в работе [12]

$$\frac{E}{E_m} = \frac{2 + \varphi}{2 \cdot (1 - 2\varphi)}. \quad (10)$$



1 — с использованием эмпирического соотношения (10);  
2 — с использованием эмпирического соотношения (8) —  
точками отмечены экспериментальные результаты;  
3 — метод моментных функций [13]

**Рис. 2.** Зависимость относительного модуля Юнга дисперсно-наполненного композита от объемной доли жесткого наполнителя



**Рис. 3.** Диаграмма сжатия образца асфальтобетона серии А

В соответствии с рис. 2 отклонение расчетных оценок по предложенному соотношению (8) от результатов использования эмпирического соотношения (10) составляет 6 %. При этом погрешность традиционного метода моментных функций, изложенного в частности в работе [13], в диапазоне  $\phi < 0,4$  составляет 21 %.

Состав экспериментально испытывавшихся композитов представлен в таблице 1.

Образцы имели форму цилиндров высотой 33 мм и диаметром поперечного сечения 70 мм. Скорость сжатия составляла 10 мм/мин. Нагружение осуществлялось на испытательной машине INSTRON 5567 по способу [14], обеспечивающему повышенную точность испытания при сжатии. Для каждой серии образцов построено три экспериментальные диаграммы. Учитывая значения плотности щебня, песка, отсева и минерального порошка по известным значениям  $\mu_{щ}$ ,  $\mu_{п}$ ,  $\mu_{о}$ ,  $\mu_{м}$ ,  $\mu_{б}$  можно найти объемную долю щебня

$$\phi = \frac{\mu_{щ}}{1+3\mu_{б}} \quad (11)$$

Экспериментальные значения модуля Юнга и предела прочности асфальтобетона определяли по диаграммам сжатия. В соответствии с рис. 3 на диаграмме сжатия можно выделить практически линейный участок, наклон которого к оси деформации характеризует модуль Юнга материала. В качестве предела прочности принималось максимальное осевое напряжение.

Из рис. 2 видно, что расчетные оценки относительного модуля Юнга асфальтобетона, полученные на основе формулы (8), лежат в пределах статистической погрешности измерения экспериментальных значений.

Анализ деформирования структурного элемента при одноосном напряженном состоянии позволяет получить расчетную оценку не только модуля Юнга, но и эффективного коэффициента Пуассона щебеночного асфальтобетона. Для этого первоначально определяется средняя по высоте поперечная деформация подэлемента I (см. рис. 1). Затем определяется макроскопическая поперечная деформация всего структурного элемента. После выполнения математических преобразований для эффективного коэффициента Пуассона  $\nu$  исследуемого композита получено выражение

$$\nu = (1-\gamma) \cdot \nu_m + \gamma \cdot \frac{\chi \nu_f \cdot \gamma + \nu_m \cdot (1-\gamma)}{\chi \gamma + 1 - \gamma} \quad (12)$$

где  $\nu_m$ ,  $\nu_f$  — коэффициенты Пуассона материала матрицы и включения соответственно.

Зная модуль Юнга и коэффициент Пуассона, можно определить расчетную оценку и модуль сдвига исследуемого макроскопически изотропного композита. В соответствии с рис. 4 отклонение значения модуля сдвига, рассчитанного по формулам (8) и (12), от соответствующего значения, определенного методом моментных функций, не превышает 8 %.

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЯЗКОУПРУГИХ СВОЙСТВ**

Наиболее точное описание реологического поведения песчаного асфальтобетона (без щебня) позволяет обеспечить механическая модель Богуславского [15], образованная параллельным соединением элементов Максвелла и Кельвина (рис. 5).

При использовании модели Богуславского связь осевого напряжения  $\sigma$  с продольной деформацией при одноосном напряженном состоянии описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{1}{E} \left( \dot{\sigma} + \frac{1}{\theta} \sigma \right) = \tau \dot{\epsilon} + \left( 2 + \frac{\tau}{\theta} \right) \dot{\epsilon} + \frac{1}{\theta} \epsilon, \quad (13)$$

**Таблица 1.** Состав и характеристики образцов асфальтобетона

Серия	Содержание компонентов, доли единиц					Характеристики		
	Щебень $\mu_{щ}$	Песок $\mu_{п}$	Отсев $\mu_{о}$	Минеральный порошок $\mu_{м}$	Битум (сверх единицы) $\mu_{б}$	$\phi$	$E$ , МПа	$R$ , МПа
Г	0	0,14	0,76	0,1	0,06	0	63±9,5	19,2±2,3
В	0,3	0,3	0,3	0,1	0,06	0,254	164±19,7	22,9±2,7
Б	0,46	0,22	0,22	0,1	0,06	0,39	371±44,5	25,4±3,0
А	0,6	0,16	0,16	0,08	0,06	0,508	815±98	29,0±3,5

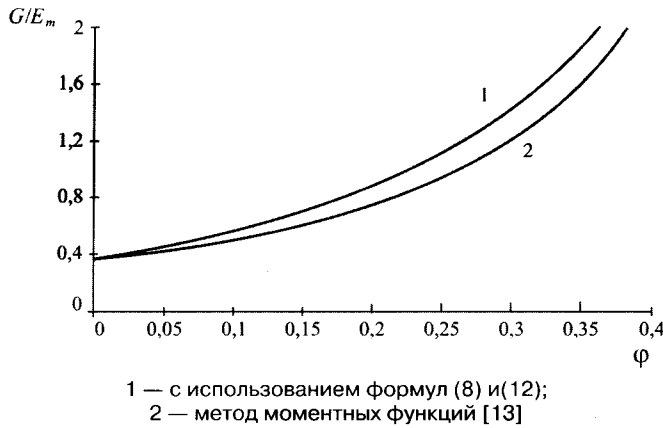


Рис. 4. Зависимость относительного модуля сдвига асфальтобетона от объемной доли щебня

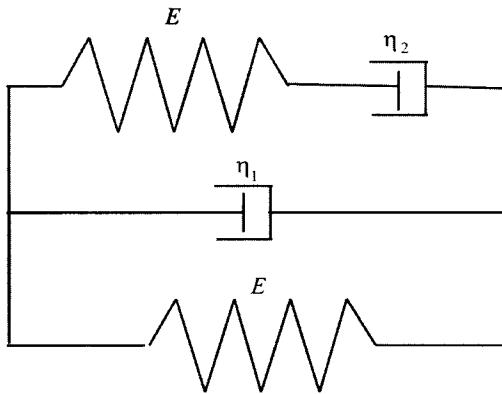


Рис. 5. Механическая модель Богуславского

где  $E$  — статический модуль Юнга материала;  $\theta$ ,  $\tau$  — соответственно время релаксации и время ретардации (время запаздывания деформации), определяемые по формулам:

$$\theta = \frac{\eta_2}{E}, \quad (14)$$

$$\tau = \frac{\eta_1}{E}. \quad (15)$$

Материал включений в композите принимали линейно упругим и характеризовали модулем Юнга  $E_f$ , материала включения ( $E_f \gg E$ ).

Используя формулу (8), для эффективного модуля Юнга получим:

$$E = (1 - \gamma^2) \cdot E_m + \frac{\gamma^2 \cdot E_f \cdot E_m}{E_f \cdot (1 - \gamma) + E_m \cdot \gamma}. \quad (16)$$

Для максимально плотной упаковки гранул щебня величина  $\varphi_{\max}$  может быть принята равной единице.

Вязкоупругие свойства композита определяют, используя выражение (16). С этой целью заменяют модули Юнга соответствующими комплексными динамическими модулями  $\tilde{E} = E'(\omega) + iE''(\omega)$  [16, 17]. Комплексный модуль Юнга характеризует напряженное состояние материала в режиме установившихся гармонических колебаний с заданной циклической частотой  $\omega$ . Действительная часть динамического модуля  $E'(\omega)$  определяет напряжение, совпадающее по фазе с деформацией. Мнимая часть  $E''(\omega)$  определяет напряжение, отстающее от деформации по фазе на  $\pi/2$ . В соответствии с уравнением (13) для компонент комплексного

модуля Юнга материала матрицы можно записать выражения:

$$E'_m = E \cdot \frac{1 + 2\theta^2 \cdot \omega^2}{1 + \theta^2 \cdot \omega^2}, \quad (17)$$

$$E''_m = E \omega \cdot \left( \tau + \frac{\theta}{1 + \theta^2 \cdot \omega^2} \right).$$

Так как материал включений рассматривается как линейно упругий, то  $E'_f = E_f$ ,  $E''_f = 0$ . Подставив в уравнение (16) комплексные модули Юнга матрицы и включения, разделив действительную и мнимую части, получим выражения для компонент комплексного модуля Юнга композита:

$$E' = (1 - \gamma^2)E'_m + \gamma^2 E_f \frac{E'_m [E_f(1 - \gamma) + E'_m \gamma] + E_m^2 \gamma}{[E_f(1 - \gamma) + E'_m \gamma]^2 + E_m^2 \gamma^2}, \quad (18)$$

$$E'' = (1 - \gamma^2)E''_m + \gamma^2 E_f^2 \frac{E''_m (1 - \gamma)}{[E_f(1 - \gamma) + E'_m \gamma]^2 + E_m^2 \gamma^2}.$$

Таким образом, уравнения (18) составляют математическую модель, которая позволяет при заданных вязкоупругих свойствах материала матрицы ( $E$ ,  $\tau$ ,  $\theta$ ), модуле Юнга материала включения ( $E_f$ ) и объемной доле включений ( $\varphi$ ) определить компоненты комплексного динамического модуля Юнга исследуемого композита.

Если для характеристики наполненного асфальтобетона использовать ту же механическую модель (см. рис. 5), что и для материала матрицы, то функции  $E'(\omega)$  и  $E''(\omega)$ , вычисленные в соответствии с (18), следует аппроксимировать уравнениями (17). При этом эффективные вязкоупругие характеристики композита ( $E_k$ ,  $\tau_k$ ,  $\theta_k$ ) будут определяться по формулам:

$$E_k = E'(0), \quad \tau_k = \frac{1}{E_k} \left. \frac{dE''(\omega)}{d\omega} \right|_{\omega \rightarrow \infty}, \quad (19)$$

$$\theta_k = \frac{1}{E_k} \left[ \left. \frac{dE''(\omega)}{d\omega} \right|_{\omega=0} - \left. \frac{dE''(\omega)}{d\omega} \right|_{\omega \rightarrow \infty} \right].$$

Осуществив описанные математические преобразования, получим уравнения:

$$E_k = E \left[ 1 - \gamma^2 + \frac{E_f^2 \cdot \gamma^2 \cdot (1 - \gamma)}{(E_f \cdot (1 - \gamma) + E_m \gamma)^2} \right], \quad (20)$$

$$\tau_k = \tau \cdot (1 - \gamma^2) \cdot \frac{E}{E_k},$$

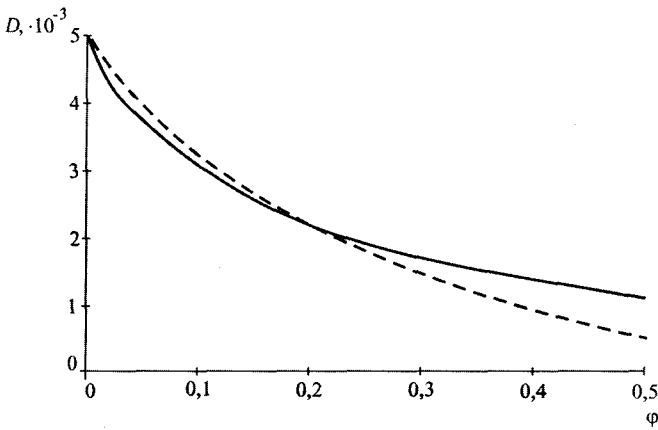
$$\theta_k = \theta + \tau - \tau_k.$$

#### Пример расчета

В качестве основного кинетического параметра, определяющего устойчивость асфальтобетона к нагрузкам и характеризующего процесс развития деформации, используются кинетические характеристики процесса деформации  $P_1$ ,  $P_2$  [8]

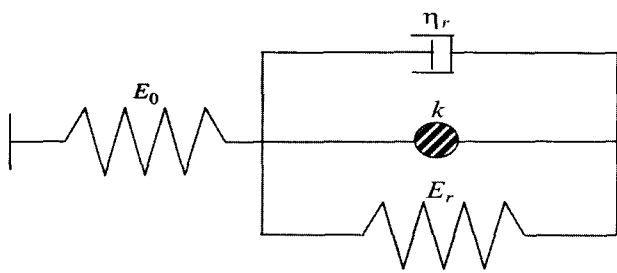
$$P_1, P_2 = -\frac{\theta + 0,5\tau}{\theta\tau} \pm \sqrt{\left( \frac{\theta + 0,5\tau}{\theta\tau} \right)^2 - \frac{1}{\theta\tau}}. \quad (21)$$

Найдем отношение  $P_1/P_2 = D$  и получим следующую комбинацию времени релаксации  $\theta$  и ретардации  $\tau$



Сплошная кривая — экспериментальные данные из [7]; пунктирная — результаты расчета

**Рис. 6.** Зависимость кинетического параметра асфальтобетона от объемной доли щебня

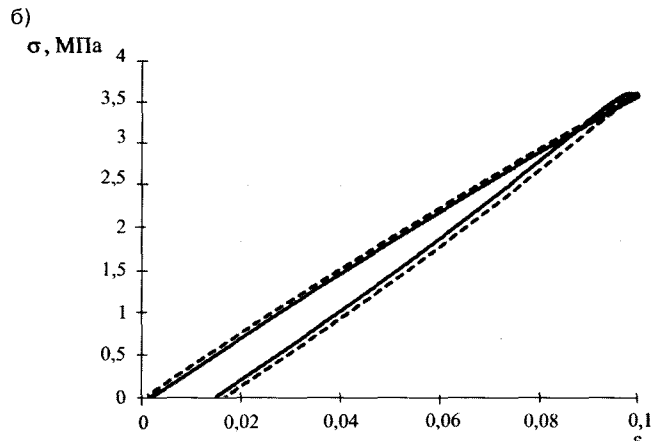
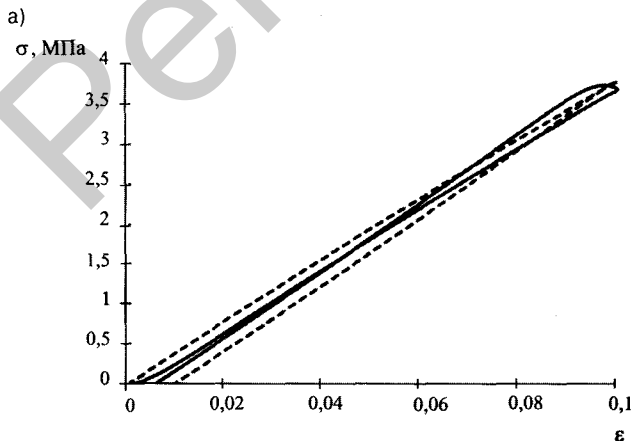


**Рис. 7.** Механическая модель резонансной дисперсии

$$D = \frac{2\theta + \tau - \sqrt{4\theta^2 + \tau^2}}{2\theta + \tau + \sqrt{4\theta^2 + \tau^2}} \quad (22)$$

Для подавляющего большинства асфальтобетонов выполняется неравенство  $\tau \ll \theta$ . Поэтому параметр  $D$  можно определить по упрощенной формуле  $D \approx \theta/4\theta$ .

В асфальтобетоне, который характеризуется высоким значением кинетического параметра  $D$ , реализуются ярко выраженные процессы ползучести при длительном действии нагрузки и накоплении остаточных деформаций при циклическом нагружении. При низком значении кинетического параметра асфальтобетон обладает повышенной жесткостью и пониженной трещиностойкостью. Поэтому для различных нагрузочных и климатических режимов функционирования дорожного покрытия определены [8] оптимальные диапазоны значений параметра  $D$  асфальтобетона. Если значение



Сплошные кривые — использование модели резонансной дисперсии; пунктирные кривые — модели Богуславского

**Рис. 8.** Диаграмма циклического деформирования асфальтобетона при скорости изменения деформации  $0,002 \text{ c}^{-1}$  (а) и  $0,0005 \text{ c}^{-1}$  (б)

кинетического параметра принадлежит данному диапазону, то обеспечивается требуемый уровень трещиностойкости при пониженных температурах, а при высоких температурах — необходимая устойчивость полотна к нагрузкам. Таким образом, параметр  $D$ , заданный соотношением (22), является одной из важнейших характеристик асфальтобетона, определяющей качество дорожного покрытия.

Разработанная математическая модель позволяет определить зависимость кинетического параметра  $D$  от объемной доли щебня в исследуемом асфальтобетонном композите. Для апробации математической модели сопоставим расчетную зависимость  $D(\phi)$  с экспериментальными данными, приведенными в работе [8] для асфальтобетона на основе битума БНД 60/90 при массовой доле минерального порошка 15 % (рис. 6). При построении расчетной зависимости на рис. 2 были приняты следующие значения исходных параметров:  $E = 20 \text{ МПа}$ ;  $\tau = 40 \text{ с}$ ;  $\theta = 200 \text{ с}$ ;  $E_r = 20 \text{ ГПа}$ ;  $\phi_{\text{max}} = 0,605$ . В соответствии с рис. 2 можно отметить, что разработанная математическая модель (20) позволяет с достаточной точностью прогнозировать значение кинетического параметра асфальтобетона при различном наполнении щебнем. Среднее относительное отклонение расчетных значений параметра  $D$  от экспериментальных в диапазоне  $\phi < 0,5$  составило 11,0 %.

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИ РЕЗОНАНСНОЙ ДИСПЕРСИИ

Модель Богуславского не позволяет описать все многообразие механических явлений, характерных для высокомолекулярных материалов. В частности при использовании данной модели не удастся обнаружить экспериментально наблюдаемое явление резонансной дисперсии полимеров [17, 18]. В [18] было показано, что это явление описывается механической моделью, содержащей инерционный элемент  $k$ . В соответствии с рис. 3 связь осевого напряжения с продольной деформацией описывается дифференциальным уравнением

$$k\ddot{\sigma} + \eta\dot{\sigma} + (E_0 + E_r)\sigma = E_0 \cdot (k\ddot{\epsilon} + \eta\dot{\epsilon} + E_r\epsilon). \quad (23)$$

Отличие уравнения (23) от аналогичного уравнения для модели Богуславского (13) заключается в наличии дополнительной слагаемого, содержащего вторую производную от напряжения. В связи с этим модель ре-

зонансной дисперсии (рис. 7) можно рассматривать как развитие модели Богуславского.

Для режимов нагружения, при которых вторая производная по времени от осевого напряжения равна нулю, модели Богуславского и резонансной дисперсии обеспечивают схожие по форме физические уравнения (13) и (23). Пусть для данных режимов нагружения совпадают также и результаты использования рассматриваемых моделей. При выполнении этого условия удается установить математическую связь между параметрами моделей:

$$\begin{aligned} E_0 &= E \left( 2 + \frac{\tau}{\theta} \right), \\ E_r &= E \frac{2\theta + \tau}{\theta + \tau}, \\ \eta_r &= E \frac{(2\theta + \tau)^2}{\theta + \tau}, \\ k &= \tau \theta E \frac{2\theta + \tau}{\theta + \tau}. \end{aligned} \quad (24)$$

Одно из преимуществ использования модели резонансной дисперсии заключается в возможности интерпретировать "закручивание" диаграммы "напряжение — деформация" при циклическом деформировании образцов асфальтобетона. Так, при проведении циклических испытаний было установлено, что в определенном диапазоне скорости и амплитуды деформирования диаграммы нагружения (циклы) имеют вид "восьмерки".

Для объяснения данного явления рассмотрим циклическое деформирование образца асфальтобетона при следующих значениях параметров модели Богуславского:  $E = 20$  МПа;  $\theta = 200$  с;  $\tau = 40$  с. При использо-

вании соотношений (24) для модели резонансной дисперсии получим:  $E_0 = 40,4$  МПа;  $E_r = 39,6$  МПа;  $\eta_r = 16$  ГПа·с;  $k = 32,7$  ГПа·с<sup>2</sup>. В соответствии с рис. 8 наличие в модели инерционного элемента позволяет объяснить низкую скорость уменьшения напряжения при разгрузке. Данное явление более заметно при высокой скорости деформирования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- 1 Мезомеханический подход, основанный на выделении структурного элемента, представляющего собой куб с единичным включением, позволяет адекватно отразить влияние объемной доли щебня на эффективные упругие характеристики исследуемого композита и точнее, по сравнению с традиционными методами механики композитов, описать известные эмпирические зависимости и экспериментальные результаты.
- 2 Использование механической модели Богуславского и разработанного мезомеханического подхода при расчете вязкоупругих свойств дисперсно-наполненного композита (асфальтобетона) позволяет адекватно описать влияние объемного содержания щебня на значение кинетического параметра исследуемого материала.
- 3 Модель резонансной дисперсии более полно отражает реальные свойства асфальтобетона по сравнению с традиционно используемой моделью Богуславского. В частности предложенная модель позволяет интерпретировать особые виды петель гистерезиса, например, в виде "восьмерки".

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковалев, Я. Н. Автомобильные дороги / Я. Н. Ковалев [и др.]. — Минск: Арт Дизайн, 2006. — 352 с.
2. Малышев, А. А. Исследование влияния характеристик структуры на деформативность асфальтобетонного слоя / А. А. Малышев // Известия вузов. Строительство. — 2004. — № 6. — С. 74–78.
3. Рак, Н. А. Структурно-механическая модель бетона / Н. А. Рак // Вестник БрГТУ. Архитектура и строительство. — 2004. — № 1. — С. 234–239.
4. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов; под ред. В. Е. Панина. — Новосибирск: Наука, 1995. — Т. 1, 2.
5. Кравченко, С. Е. Новые подходы к оценке структурной прочности асфальтобетона / С. Е. Кравченко // Автомобильные дороги и мосты. — 2008. — № 2. — С. 49–52.
6. Хархардин, А. Н. Структурная топология дисперсных материалов и композитов / А. Н. Хархардин, А. И. Топичиев // Строительные материалы. Наука. — 2006. — № 7. — С. 27–30.
7. Кравченко, С. Е. Связь деградации структуры асфальтобетона с гистерезисными потерями при его циклическом деформировании в условиях режима мягкого нагружения / С. Е. Кравченко // Автомобильные дороги и мосты. — 2009. — № 2. — С. 24–29.
8. Асфальтовый бетон; под ред. Л. Б. Гезенцева. — М.: Транспорт, 1985. — 350 с.
9. Рокас, С. Ю. Статистический контроль качества в дорожном строительстве / С. Ю. Рокас. — М.: Транспорт, 1977. — 155 с.
10. Дорожно-строительные материалы. Учебник для автомобильно-дорожных институтов / И. М. Глушко, И. В. Королев, И. М. Борщ, Г. М. Мищенко. — М.: Транспорт, 1983. — 383 с.
11. Шилько, С. В. Особенности деформирования и описание упругих свойств наполненных эластомеров при растяжении / С. В. Шилько, Д. А. Черноус, С. Б. Анфиногенов // Каучук и резина. — 2008. — № 4. — С. 34–38.
12. Кристенсен, Р. Введение в механику композитов / Р. Кристенсен. — М.: Мир, 1982. — 334 с.
13. Гузь, А. Н. Механика композитных материалов и элементов конструкций. В 3-х томах. Т. 1. Механика материалов / А. Н. Гузь, Л. П. Хорошун, Г. А. Ванин. — Киев: Наукова думка, 1982. — 368 с.
14. Способ получения напряженно-деформированного состояния образца материала для определения механических характеристик при сжатии: пат. 6417 РБ, МПК7 G 01N 3/08 / С. В. Шилько, Н. Н. Бодрунов; по заявке № a20000234BY; заявл. 15.03.00; опубл. 30.09.01 // Афіц. бюлетень / Нац. центр інтэлл. уласнасці. — 2001. — № 3. — С. 53.
15. Богуславский, А. М. Основы реологии асфальтобетона / А. М. Богуславский, Л. А. Богуславский. — М.: Высшая школа, 1972. — 199 с.
16. Хархардин, А. Н. Краевые задачи материаловедения / А. Н. Хархардин, А. И. Топичиев // Конструкции из композиционных материалов. — 2004. — Вып. 3. — С. 52–63.
17. Ferry, J. D. Viscoelastic properties of polymers / J. D. Ferry. — New York-London, 1961. — 530 p.
18. Черноус, Д. А. Модель резонансной дисперсии полимеров / Д. А. Черноус // Материалы, технологии, инструменты. — 2004. — Т. 9, № 3. — С. 22–26.

Статья поступила в редакцию 20.05.2010.