УДК 691.168:625.855.3

К ВОПРОСУ О ТЕОРИИ СТРУКТУРЫ АСФАЛЬТОБЕТОНА

Канд. техн. наук **Г.Н. Кирюхин**
(ООО «Институт Дорожных Покрытий»)
Конт. информация: 8 (915) 304-75-62;
dorkir@mail.ru

В статье рассмотрены особенности структуры асфальтобетона и основные структурно-реологические параметры, определяющие долговечность асфальтобетонных покрытий. Обоснован термофлуктуационный и фрактальный подход к оценке деформативных и прочностных свойств асфальтобетона.

***Ключевые слова**: асфальтобетон, состав, структура, прочность, деформативность, термофлуктуационные и фрактальные модели.*

Асфальтобетон относится к наиболее распространенному материалу для устройства дорожных покрытий. Он состоит из трех основных частей: минерального заполнителя, битумного вяжущего и воздушных пор. От объемного содержания и структуры каждой составляющей зависит качество асфальтобетона. Зерновой состав минеральной части влияет на технологические свойства асфальтобетонной смеси, формирует структуру минерального остова и в значительной степени определяет сдвигоустойчивость асфальтобетонных покрытий. Битумное вяжущее склеивает минеральные зерна в монолит, определяет реологические свойства и трещиностойкость асфальтобетона в заданных условиях эксплуатации. Воздушные поры также имеют важное значение. При увеличении пористости асфальтобетона снижается водо- и морозостойкость и быстрее стареет битумное вяжущее, а при низкой остаточной пористости происходит раздвижка минерального остова битумными пленками, что приводит к потере сдвигоустойчивости покрытий.

Содержание компонентов асфальтобетона естественным образом взаимосвязано между собой по условию нормировки объема фаз. Объемное содержание битумного вяжущего в асфальтобетоне равно разности пористости минерального остова и остаточной пористости. Поэтому основу любого метода проектирования состава асфальтобетона составляет объемный анализ его компонентов, хотя требования к пористости минерального остова и остаточной пористости различаются в зависимости от регламентируемого метода уплотнения и области применения проектируемой смеси.

Оптимизацию структуры асфальтобетона долгое время проводили в направлении создания максимально плотного минерального остова.

В результате были разработаны непрерывные зерновые составы с коэффициентом сбега 0,81 (Н.Н. Иванов), степенные кривые гранулометрии по Фуллеру, а также внедрены высокоплотные и высокомодульные асфальтобетоны. При этом содержание битума в асфальтобетонной смеси подбирается по максимумам плотности и прочности уплотненных образцов в соответствии с правилом створа И.А. Рыбьева. Если варьировать содержание битума, то минимальная пористость минерального остова асфальтобетонов различных типов гранулометрии по ГОСТ 9128 достигается примерно при следующих значениях остаточной пористости:

- 6 % – у пористого асфальтобетона без минерального порошка;
- 4 % – у песчаного асфальтобетона типа Д;
- 2,5 % - 3 % – у мелкозернистых асфальтобетонов типа А и Б;
- 1,8 % – у высокоплотного асфальтобетона с прерывистой гранулометрией минеральной части.

Однако сложившиеся и действующие на протяжении многих лет правила подбора смесей претерпевают изменения, особенно в связи с массовым внедрением щебеночно-мастичного асфальтобетона, для которого закон створа не применим. В настоящее время и для обычных асфальтобетонных смесей, запроектированных по методологии *Superpave*, предписывается ограничивать минимальную пористость минерального остова в соответствии с **рис. 1.**

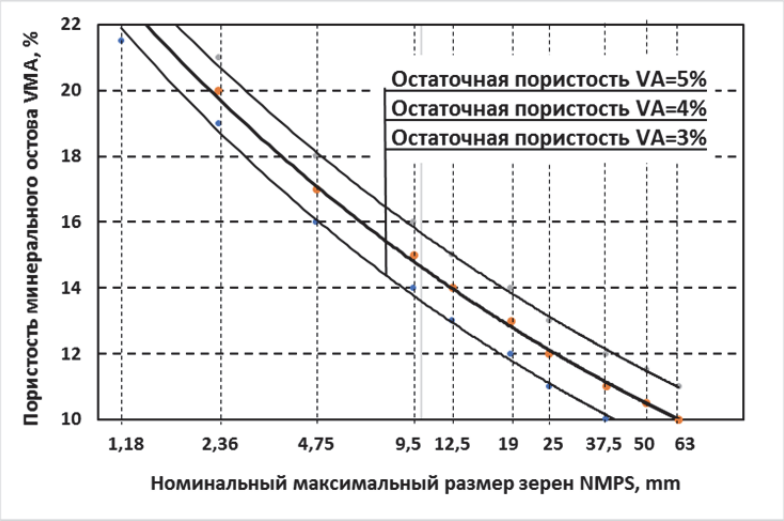

Рис. 1. Минимальная допустимая пористость минерального остова асфальтобетона, рекомендуемая Институтом асфальта (США)

В последнее время в связи с ростом интенсивности движения и транспортных нагрузок существенно обострилась проблема увеличения сроков службы асфальтобетонных покрытий. Поэтому на передний план выдвигаются методы функционального проектирования составов асфальтобетона с требуемыми эксплуатационными свойствами, способными обеспечивать максимальную долговечность устраиваемых покрытий в заданных условиях эксплуатации. Эти методы предполагают прогнозирование работоспособности асфальтобетона по результатам лабораторных испытаний образцов, основываясь на зависимостях прочности и деформативности от условий нагружения. Прогноз долговечности асфальтобетонных покрытий осуществляется в результате сопоставления напряжений, возникающих от нестационарных воздействий колесной нагрузки и погодно-климатических факторов, с прочностью асфальтобетона, которая также зависит от температурно-временных условий нагружения. При таком подходе оптимальная структура асфальтобетона определяется не только его составом и качеством компонентов, но и условиями работы материала в дорожной конструкции.

Деформативные и прочностные свойства асфальтобетона зависят от его структуры. В соответствии с представлениями академика П.А. Ребиндера, битумные материалы относятся к коагуляционному типу дисперсных структур, которым свойственна сильно выраженная зависимость реологических свойств от температуры, скорости и времени нагружения, а также, как показали исследования, от напряженно-деформированного состояния образцов. Асфальтобетон является к тому же высоконаполненной полидисперсной системой. Размах размера дисперсных частиц в асфальтобетоне достигает 7 десятичных порядков (**рис. 2.**).

Дисперсионная среда битумных вяжущих представлена мальтенами с размером молекул от 0,6 до 1 нм, энергия активации которых находится соответственно в пределах от 100 до 200 кДж/моль **[1]**. Органическая часть дисперсной фазы состоит из асфальтенов размером 2-4 нм и более крупных асфальтеновых комплексов, которые обычно присутствуют в битумных вяжущих. Минеральная часть дисперсной фазы асфальтобетона представлена размерами зерен от самых мелких наночастиц, которые обычно содержатся в минеральном порошке, до самой крупной фракции применяемого щебня.

Состав и структуру асфальтобетона по характерному влиянию на реологические свойства принято разделять на асфальтовое вяжущее вещество и минеральный остов, ориентируясь при этом на соразмерность мелких зерен минерального порошка (МП) и средней толщины битумных пленок.

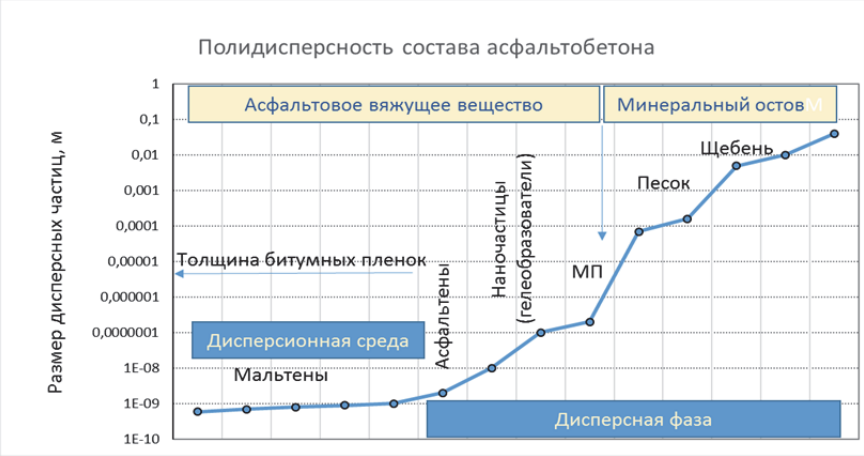

Рис. 2. Ранжирование компонентов асфальтобетона по размеру частиц

Состав асфальтового вяжущего определяет когезию битумных пленок и является ответственным за вязкие свойства асфальтобетона. Основное влияние на вязкую составляющую деформации оказывают дисперсионная среда и мелкие частицы дисперсной фазы. Чем мельче частицы дисперсной фазы, тем больше их удельная поверхность и структурирующее воздействие на дисперсионную среду, так как число контактов и предельное напряжение сдвига возрастают обратно-пропорционально квадрату диаметра дисперсных частиц **[2]**. При увеличении содержания дисперсной фазы вязкость суспензии растет по степенному закону, отклоняясь от линейной зависимости Эйнштейна.

Минеральный остов, в отличие от асфальтового вяжущего, в большей степени влияет на упругие свойства и статический предел текучести асфальтобетона при сдвиге. В соответствии с законом Кулона предельное напряжение сдвига зернистых материалов равняется произведению нормального давления на тангенс угла внутреннего трения. Из-за явления дилатансии статический предел текучести увеличивается прямо пропорционально среднему размеру зерен каркасообразующей фракции, в чем проявляется принципиальное отличие структурно-реологических свойств минерального остова от асфальтового вяжущего вещества. При заполнении межзерновых пустот щебня более мелкими расклинивающими зернами песка и далее частицами минерального порошка происходит увеличение плотности, числа контактов и рост прочности асфальтобетона по степенному закону фрактальных структур.

В результате совместной работы асфальтового вяжущего и минерального остова проявляются характерные вязкоупругие свойства ас-

фальтобетона. Асфальтовое вяжущее в основном определяет восприимчивость асфальтобетона к температуре, а минеральный остов за счет самоподобия вложенных структур способствует рассеиванию вектора внутренних напряжений на различных масштабных уровнях. С фрактальной размерностью структуры очевидно связан и спектр времен релаксации асфальтобетона, так как релаксационные явления в реологически сложных средах зависят от времени перегруппировки структурных единиц различного масштабного уровня.

Структура битумных пленок и геометрия поверхности склеиваемых минеральных зерен взаимосвязаны, поэтому фрактальная размерность поверхности раздела фаз в асфальтобетоне влияет на совместную работу асфальтового вяжущего и минерального остова. Вследствие этого закономерности структурообразования и временные зависимости прочности и деформативности битумных материалов описываются степенными уравнениями, что было показано многими исследователями в России и за рубежом.

В 1949 г. Н.Н. Иванов и М.Я. Телегин, обрабатывая результаты испытаний цилиндрических образцов на сжатие при температуре 22 °С, впервые установили степенную зависимость прочности асфальтобетона от скорости деформирования **[3]**. Показатель степени в зависимости прочности от скорости деформирования авторы назвали коэффициентом пластичности, предложив его в качестве дополнительной характеристики сопротивления асфальтобетона пластическим деформациям при высоких температурах эксплуатации.

Ш. Юе (Ch. Huet) использовал степенные реологические модели для описания вязкоупругих свойств асфальтобетона при температуре 20 °С в диапазоне частот нагружения от 0,01 до 10 Гц **[4]**. Коэффициент пластичности при этом оставался практически постоянным в пределах от 2-х до 3-х десятичных порядков времен приложения нагрузки. Дальнейшие исследования битумных вяжущих и асфальтобетонов методами циклического нагружения, получившие наибольшее распространение за рубежом, показали наличие максимума коэффициента пластичности примерно в середине температурно-временного диапазона вязкоупругости.

А.В. Руденский обосновал степенные зависимости модуля упругости и прочности битумных материалов от времени нагружения, показав универсальность показателя пластичности *P*, вычисленного из экспериментальной кривой ползучести **[5]**. Для описания зависимости пластичности от температуры предложено использовать нормальный закон распределения Гаусса.

В.А. Золотарев показал применимость степенной зависимости для описания времени до разрушения (долговечности) асфальтобетона

под действием разных по величине постоянно действующих нагрузок, а также релаксационную природу коэффициента пластичности при испытаниях битумных материалов циклическими нагрузками **[6]**. Показатель степенной зависимости, отражающий релаксационную сущность процесса деформирования и прочности асфальтобетона, тесно коррелирует с тангенсом угла механических потерь **[7]**. Кроме того, по данным сотрудников ХНАДУ (Украина) коэффициент пластичности асфальтобетона при температуре 20 °С практически не зависит от схемы напряженного деформирования образцов.

Л.С. Губач исследовал зависимость коэффициента пластичности асфальтобетона от режима нагружения. Рассматривая потерю прочности в виде кинетического процесса, он обосновал связь результатов испытаний образцов при статическом и динамическом нагружении **[8]**.

В.Н. Носков экспериментально показал влияние режима нагружения на накопление пластических деформаций асфальтобетона при высоких эксплуатационных температурах. Испытывая цилиндрические образцы на кручение, он установил, что увеличение частоты приложения сдвигающих напряжений приводит к резкому росту относительной пластической деформации **[9]**.

Разработчики методологии *Superpave* предложили в качестве одного из критериев прогнозирования трещиноустойчивости асфальтобетона температуру, при которой коэффициент пластичности битумного вяжущего при испытании на ползучесть методом BBR был бы не менее 0,3 **[10]**.

Из анализа результатов проведенных исследований следует, что коэффициент пластичности зависит от структуры и температурно-временных условий деформирования битумных материалов. Факторы, понижающие степень структурирования битума, приводят к повышению пластичности **[7]**.

При испытании образцов на сдвиг в режиме вынужденных колебаний установлено, что при понижении вязкости вяжущего коэффициент пластичности увеличивается, а при одинаковой глубине проникания иглы при 25 °С у битумов структурного типа «гель» он примерно в 2 раза ниже, чем у битумов типа «золь», как впрочем и в случае понижения температуры испытания с 25 °С до 10 °С **[6]**.

В Союздорнии по результатам испытаний на растяжение при изгибе плотных асфальтобетонов различных типов гранулометрии, приготовленных на основе битумов разных марок, была установлена корреляционная связь между показателями модуля упругости и коэффициента пластичности. Корреляция показателей асфальтобетонных образцов-балочек при температуре 0 °С и времени их нагружения в интервале от 1 до 5 с показана на **рис. 3**.

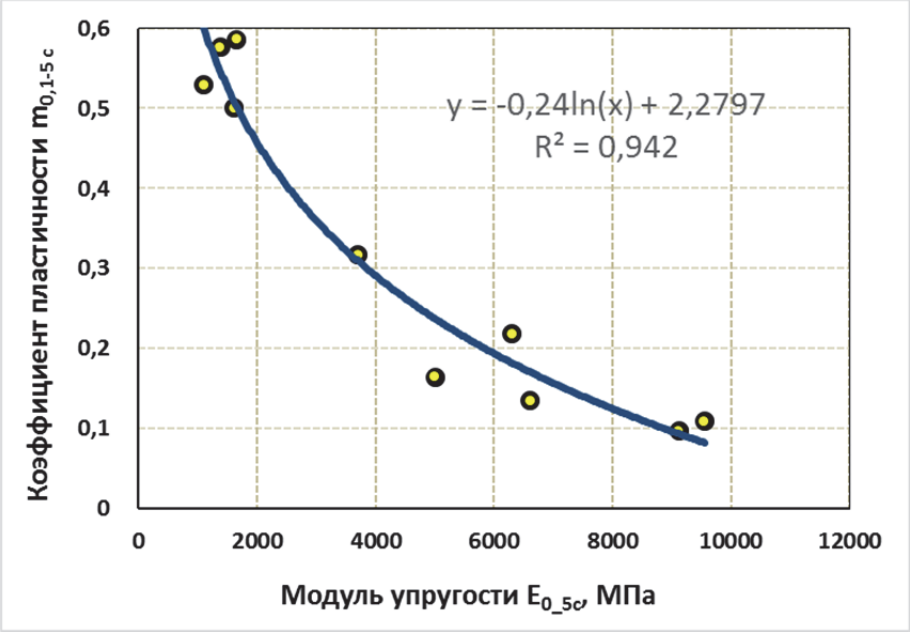

Рис. 3. Корреляционная зависимость коэффициента пластичности от модуля упругости асфальтобетона при температуре 0 °С и времени действия нагрузки 5 с

Обобщая известные экспериментальные данные, приходим к выводу, что коэффициент пластичности, как, впрочем, и другие деформативно-прочностные свойства коагуляционных дисперсных структур, зависит от объемного соотношения *среда/фаза*. С повышением содержания дисперсионной среды коэффициент пластичности увеличивается. Максимальный коэффициент пластичности при испытании на виброреометре наблюдается у однородных битумов типа «золь» или 2-го структурного типа по классификации А.С. Колбановской. У ньютоновской жидкости он очевидно будет равен 1, соответствуя фазовому углу сдвига 90 град.

Зависимость коэффициента пластичности битумных материалов от условий испытания отражается в спектрах времен релаксации, причем температурно-временные зависимости деформативных и прочностных свойств битумов и асфальтобетонов адекватно описываются термофлуктуационными и фрактальными математическими моделями **[1, 11]**. Изменяющийся в широких пределах от E_{min} до E_{max} модуль упругости асфальтобетона на практике чаще всего аппроксимируют с помощью сигмоидальной функции *Rs* **(рис. 4)**.

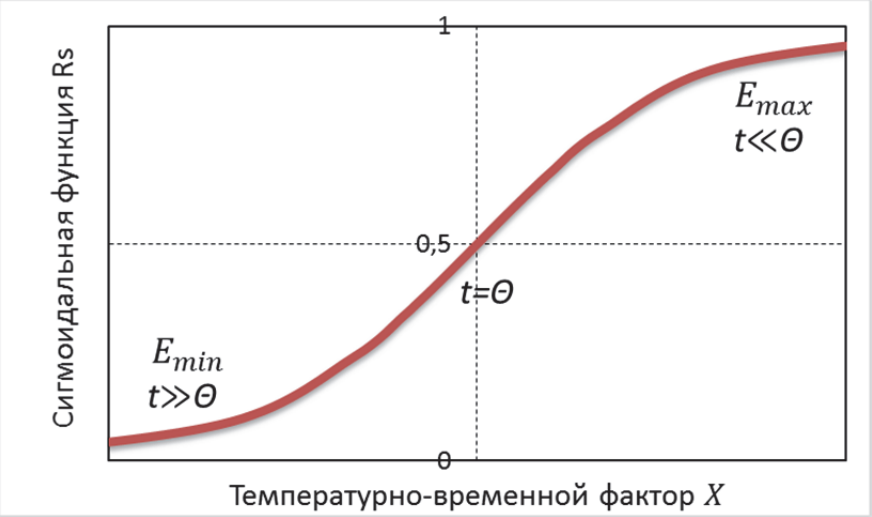

Рис.4. Сигмоидальная функция для аппроксимации модуля упругости асфальтобетона

Температурно-временной фактор X сигмоидальной функции определяется в соответствии с принципом температурно-временной суперпозиции. Температурный коэффициент приведения вычисляют на основании экспериментальных данных с помощью полинома второго порядка, по эмпирическому уравнению WLF (Вильямса-Ландела-Ферри) **[12]**, или же по следующей термофлуктуационной зависимости:

$$Ln \propto_T = \frac{U}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right) , \quad \textbf{(1)}$$

где

$\propto_T$ – коэффициент приведения;
U – энергия активации, Дж/моль;
R – газовая постоянная, 8,314 Дж/К моль;
T – температура испытания, К;
T_0 – температура приведения, К.

Эквивалентность влияния температуры и частоты нагружения на деформативные и прочностные свойства задается соотношением:

$$\frac{U}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right) = -Ln\frac{\omega}{\omega_0} , \quad \textbf{(2)}$$

где

ω – частота нагружения, Гц;
ω_0 – частота приведения, Гц.

Обобщенный фактор влияния температурно-временных условий деформирования на показатели прочности и деформативности битумных материалов в результате принимает следующий вид:

$$X = Ln\frac{\omega}{\omega_0} + \frac{U}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\text{ср}}}\right) \ , \qquad \textbf{(3)}$$

где

$T_{\text{ср}}$ – температура, соответствующая середине диапазона вязкоупругости при деформировании образцов с частотой приведения ω_0, К.

Сигмоидальная функция на **рис. 4** характеризует соотношение обратимой и необратимой составляющей деформации. Максимальный коэффициент пластичности, судя по графику, находится в середине диапазона вязкоупругости при $X = 0$, когда время приложения нагрузки t равно периоду релаксации θ.

Зависимость коэффициента пластичности битумных материалов от обобщенного температурно-временного фактора X можно определить по формуле:

$$m(X) = 4m_{max}R_s(1 - R_s) \ , \qquad \textbf{(4)}$$

где

m_{max} – максимальный коэффициент пластичности, соответствующий середине диапазона вязкоупругости;

R_s – сигмоидальная функция, изменяющаяся от 0 до 1 в зависимости от обобщенного температурно-временного фактора X.

В области линейной вязкоупругости зависимость модуля упругости от температуры и частоты нагружения описывает термофлуктуационно-фрактальная модель следующего вида:

$$E(T,\omega) = E_0\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{m(X)} exp\left[\frac{m(X)U}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \ , \qquad \textbf{(5)}$$

где

$E(T,\omega)$ – модуль упругости в зависимости от температуры и частоты, МПа;

E_0 – модуль упругости при расчетной температуре T_0 и частоте ω_0, МПа.

К термофлуктуационно-фрактальной зависимости можно отнести и аппроксимацию результатов испытаний асфальтобетона на ползучесть и долговременную прочность при статическом нагружении **[13]**. Долговечность асфальтобетона, характеризуемая временем до разрушения образцов, наиболее адекватно отвечала экспериментальному уравнению Г.М. Бартенева, полученному для полимеров **[14]:**

$$\tau = B\sigma^{-b}exp\left(\frac{U}{RT}\right) \ , \qquad \textbf{(6)}$$

где

τ – время до разрушения, с;

B – константа, зависящая от структуры материала;

σ – растягивающее напряжение, Па;

b – показатель степени, характеризующий изменение структуры материала при деформировании.

Отсюда предел прочности асфальтобетона в вязкопластичном состоянии можно представить темофлуктуационно-фрактальной моделью следующего вида:

$$\sigma_{\text{р}} = B^p V^p exp\left(\frac{pU}{RT}\right) , \quad \textbf{(7)}$$

где

σ_p – предел прочности при растяжении;

p – коэффициент пластичности по Н.Н. Иванову;

V – скорость нагружения.

В достаточно широком диапазоне температур между долговечностью и скоростью необратимого деформирования образцов асфальтобетона установлена тесная корреляционная связь. На **рис. 5** представлены характерные кривые ползучести асфальтобетона, приведенные к времени разрушения образцов от действия постоянных растягивающих напряжений $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$.

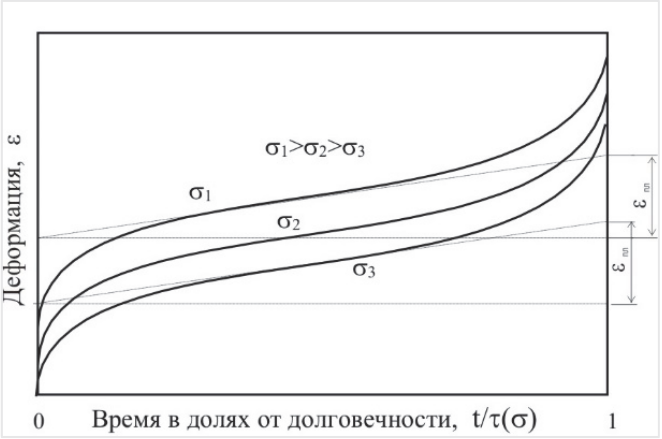

Рис. 5. Кривые ползучести асфальтобетона, приведенные к долговечности

Из **рис. 5** следует, что скорость деформации на участке установившегося течения обратно-пропорциональна времени до разрушения образцов. Следовательно, необратимую деформацию в зависимости от температуры, времени и уровня нагружения можно определить с помощью структурных параметров, характеризующих прочность и долговечность асфальтобетона.

Термофлуктуационно-фрактальный подход был впервые реализован в действующей методике оценки устойчивости асфальтобетона к образованию колеи пластичности **[15]**, позволяющей наиболее полно учитывать структурные особенности материала и условия его эксплуатации в покрытии. Согласно этой методике, сдвигоустойчивость асфальтобетона в дорожной конструкции слагается из упругой и вязкой составляющих, что следует из известного реологического уравнения Гершеля – Балкли и закона Кулона. Статический предел текучести связан в основном со структурой минерального остова и определяется как произведение нормального давления на коэффициент внутреннего трения. Реологической составляющей сопротивления сдвигу является эффективная пластическая вязкость, зависящая от структуры асфальтового вяжущего вещества, температуры и градиента скорости сдвига. При увеличении касательных напряжений или скорости сдвига эффективная вязкость падает по степенной зависимости, характерной для неньютоновского течения высококонцентрированных дисперсных систем.

ВЫВОДЫ

1. Асфальтобетон относится к коагуляционному типу дисперсных структур, которым свойственна сильно выраженная зависимость реологических и прочностных свойств от температуры, скорости и времени нагружения, а также от напряженно-деформированного состояния образцов. Деформативно-прочностные свойства асфальтобетона, обеспечивающие требуемый срок службы покрытий, зависят от состава и качества битумного вяжущего, асфальтового вяжущего вещества, минерального остова и структуры порового пространства уплотненной асфальтобетонной смеси.
2. При оптимизации структуры асфальтобетона необходимо учитывать нестационарные условия его эксплуатации в конструкциях дорожных одежд, используя методы функционального проектирования составов смесей с требуемыми эксплуатационными свойствами, способными обеспечивать максимальную долговечность устраиваемых покрытий в заданных условиях эксплуатации.
3. Температурно-временные зависимости прочности и деформативности битумных материалов определяют два структурных параметра: энергия активации и коэффициент пластичности. Эти показатели структуры связывают между собой реологические и прочностные свойства, характеризуя релаксационную сущность

и термофлуктуационно-фрактальную природу деформирования и разрушения.

4. Энергия активации и вероятность флуктуаций молекул дисперсионной среды являются первопричиной вязкой составляющей деформации асфальтобетона.
5. Коэффициент пластичности, являясь производной от фрактальной структуры асфальтобетона, отражает интегральную совокупность взаимодействий частиц дисперсной фазы на различных масштабных уровнях. По существу, данный показатель определяет совместную работу минерального остова и асфальтового вяжущего вещества, характеризуя нелинейность процессов деформирования и разрушения асфальтобетона.
6. В целях уточнения физически обоснованных параметров реологических моделей и их связей со структурой асфальтобетона необходимо проводить дальнейшие исследования. Для испытания образцов вполне подойдут современные приборы и лабораторное оборудование, предусмотренные для стандартных испытаний битумных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кирюхин Г.Н. Усталостные процессы. К вопросу о термофлуктуационной природе деформирования и разрушения битумных материалов / Г.Н. Кирюхин // Автомобильные дороги. – 2012. – № 12. – С. 44-48.*
2. *Котлярский Э.В. Строительно-технические свойства дорожного асфальтового бетона: учебное пособие: МАДИ. – М., 2004. – 194 с.*
3. *Иванов Н.Н. К обоснованию показателей механических свойств асфальтовых смесей / Н.Н. Иванов, М.Я. Телегин // Исследование органических вяжущих материалов и физико-механических свойств асфальтовых смесей. – М.: Дориздат,1949. – С. 106-132.*
4. *Huet Ch. Étude par une méthode d'inpédance du comportement viscoélastique des matériaux hydrocarbonés. Thèse de docteur-Ingéniuer. – Faculté des Sciences de Paris, 1963. – 140 p.*
5. *Руденский А.В. Исследование влияния пластичности на деформативные и прочностные характеристики асфальтобетона: автореф. дисс. … канд. техн. наук: 05.23.05 / Руденский Андрей Владимирович; МАДИ. – М., 1965. – 34 с.*
6. *Золотарев В.А. Долговечность дорожных асфальтобетонов. – Харьков : Вища школа. – 1977. – 116 с.*

7. *Золотарев В.А. Коэффициент пластичности как характеристика реологического состояния асфальтобетона / В.А. Золотарев // Автошляховик України: наук.-вироб. журн. — 2013. – № 6. – С.22–33.*
8. *Губач Л.С. О степенных закономерностях деформирования асфальтобетона / Л.С. Губач // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1972. – №10. – С. 125-129.*
9. *Носков В.Н. Исследование деформационной устойчивости асфальтобетона при статическом и циклическом загружении с различным режимом в условиях повышенных температур: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.22.10 / Носков Виталий Николаевич. – Омск, 1975. – 31 с.*
10. *Superpave Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing / Asphalt Institute Superpave. – 1997. – Series No 1 (SP-1). – 67 p.*
11. *Кирюхин Г.Н. Термофлуктуационная и фрактальная модель долговечности асфальтобетона // ДОРОГИ И МОСТЫ. – 2014. – Вып. 31/1. – С. 247-268.*
12. *Williams M.L. The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquids / M.L. Williams, R.F. Landel, J.D. Ferry J. //Am. Chem. Soc. – 1955. – 77, 14. – PP. 3701-3707.*
13. *Кирюхин Г.Н. Исследование влияния качества битумов на работоспособность асфальтобетонных покрытий: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Кирюхин Геннадий Николаевич; Государственный всесоюзный дорожный научно-исследовательский институт. – М., 1982. – 21 с.*
14. *Бартенев Г.М. Прочность и механизм разрушения полимеров / Г.М. Бартенев. – М.: Химия, 1984. – 280 с.*
15. *СТО-ГК «Транссстрой» 007-2007. Асфальтобетон. Метод оценки устойчивости к образованию колеи пластичности. – М., 2007. – Электрон. данные. – URL: https://znaytovar.ru/gost/2/STOGK_Transstroj_0072007_Asfal.html (дата обращения: 16.05.2019).*

L I T E R A T U R A

1. *Kiryuhin G.N. Ustalostnye processy. K voprosu o termofluktuacionnoj prirode deformirovaniya i razrusheniya bitumnyh materialov / G.N. Kiryuhin // Avtomobil'nye dorogi. – 2012. – № 12. – S. 44-48.*
2. *Kotlyarskij E.V. Stroitel'no-tekhnicheskie svojstva dorozhnogo asfal'tovogo betona: uchebnoe posobie: MADI. – M., 2004. – 194 s.*

3. *Ivanov N.N. K obosnovaniyu pokazatelej mekhanicheskih svojstv asfal'tovyh smesej / N.N. Ivanov, M.YA.Telegin // Issledovanie organicheskih vyazhushchih materialov i fiziko-mekhanicheskih svojstv asfal'tovyh smesej. – M.: Dorizdat, 1949. – S. 106-132.*
4. *Huet Ch. Étude par une méthode d'inpédance du comportement viscoélastique des matériaux hydrocarbonés. Thèse de docteur-Ingéniuer. – Faculté des Sciences de Paris, 1963. – 140 p.*
5. *Rudenskij A.V. Issledovanie vliyaniya plastichnosti na deforma-tivnye i prochnostnye harakteristiki asfal'tobetona: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk: 05.23.05 / Rudenskij Andrej Vladimirovich; MADI. – M., 1965. – 34 s.*
6. *Zolotarev V.A. Dolgovechnost' dorozhnyh asfal'tobetonov. – Har'kov : Vishcha shkola. – 1977. – 116 s.*
7. *Zolotarev V.A. Koefficient plastichnosti kak harakteristika reologicheskogo sostoyaniya asfal'tobetona / V.A. Zolotarev // Avtoshlyahovik Ukraïni: nauk.-virob. zhurn. — 2013. — №6. – S. 22–33.*
8. *Gubach L.S. O stepennyh zakonomernostyah deformirovaniya asfal'tobetona / L.S. Gubach // Izv. vuzov. Stroitel'stvo i arhitektura. – 1972. – №10. – S. 125-129.*
9. *Noskov V.N. Issledovanie deformacionnoj ustojchivosti asfal'tobetona pri staticheskom i ciklicheskom zagruzhenii s razlichnym rezhimom v usloviyah povyshennyh temperatur: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk: 05.22.10 / Noskov Vitalij Nikolaevich. – Omsk, 1975. – 31 s.*
10. *Superpave Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing / Asphalt Institute Superpave. – 1997. – Series No 1 (SP-1). – 67 p.*
11. *Kiryuhin G.N. Termofluktuacionnaya i fraktal'naya model' dolgovechnosti asfal'tobetona // DOROGI I MOSTY. – 2014. – Vyp. 31/1. – S. 247-268.*
12. *Williams M.L. The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquids / M.L. Williams, R.F. Landel, J.D. Ferry J. //Am. Chem. Soc. – 1955. – 77, 14. – RR. 3701-3707.*
13. *Kiryuhin G.N. Issledovanie vliyaniya kachestva bitumov na rabotosposobnost' asfal'tobetonnyh pokrytij: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk: 05.23.05 / Kiryuhin Gennadij Nikolaevich; Gosudarstvennyj vsesoyuznyj dorozhnyj nauchno-issledovatel'skij institut. – M., 1982. – 21 s.*
14. *Bartenev G.M. Prochnost' i mekhanizm razrusheniya polimerov / G.M. Bartenev. – M.: Himiya, 1984. – 280 s.*

15. *STO-GK «Transstroj» 007-2007. Asfal'tobeton. Metod ocenki ustojchivosti k obrazovaniyu kolei plastichnosti. – M., 2007. – Elektron. dannye. – URL: https://znaytovar.ru/gost/2/STOGK_Transstroj_0072007_Asfal.html (data obrashcheniya: 16.05.2019).*

……

ON THE THEORY OF ASPHALT CONCRETE STRUCTURE

Ph. D. (Tech.) ***G.N. Kiryukhin***
(LLC «Institute of Road Pavements»)
Contact information: 8 (915) 304-75-62;
dorkir@mail.ru

The article describes the peculiarities of the structure of asphalt concrete and the main structural and rheological parameters that determine the durability of asphalt concrete pavement. The thermalfluctuation and fractal approach to the evaluation of deformation and strength properties of asphalt concrete is justified.
Key words*: asphalt concrete, composition, structure, strength, deformability, thermal and fractal models.*

Рецензент: д-р техн. наук А.В. Руденский (ФАУ «РОСДОРНИИ»).
Статья поступила в редакцию: 06.06.2019 г.