

Физико-механические свойства серобитумных вяжущих и сероасфальтобетонов

Х.Т. Ле

*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет
федеральный университет*

Аннотация: В работе представлены модель распределения серы по видам состояний и модель коалесценции капель серы в серобитумном вяжущем, а также экспериментальные данные, демонстрирующие влияние содержания серы на основные свойства серобитумного вяжущего и механические свойства сероасфальтобетона. Модель распределения серы по видам состояний демонстрирует, что с увеличением содержания серы в серобитумном вяжущем возрастает доля серы в физически свободном состоянии, которая формирует дисперсную фазу, повышающую вязкость вяжущего. Это повышение приводит к закономерному увеличению величин свойств серобитумного вяжущего с введением серы. Модель коалесценции капель серы показывает, что этот процесс является энергетически выгодным. Движущей силой коалесценции является давление Лапласа, возрастающее с увеличением соотношения размеров контактирующих капель серы. Также с увеличением содержания серы возрастает вероятность преодоления межфазной плёнки битума между каплями серы, что закономерно повышает вероятность образования пространственных структур серы, отрицательно влияющих на трещиностойкость сероасфальтобетона.

Ключевые слова: сера, состояния серы, прочность, трещиностойкость, серобитумные вяжущие, сероасфальтобетон, асфальтобетон, коалесценция капель серы.

Введение

Перспективным направлением повышения долговечности и транспортно-эксплуатационных показателей асфальтобетонных покрытий является применение модификаторов, в том числе, и на основе серы [1-3]. Добавка серы повышает прочность материала и значительно улучшает сцепление вяжущего с поверхностью минерального заполнителя [4-6]. Эксплуатационные свойства сероасфальтобетонов зависят как от содержания серы, так и от её распределения по состояниям, зависящим от вида и интенсивности взаимодействия с битумом [7,8]. Анализ исследований [9-11] показал, что сера присутствует в серобитумных материалах (СБМ) в трёх состояниях: 1) химически связанном; 2) растворенном в битуме состоянии и 3) в свободном состоянии (в виде дисперсной фазы). Очевидно, что каждое из этих состояний серы оказывает самостоятельное влияние на

структурообразование и свойства СБМ [12-14]. Часто затруднительно определить изменение распределения серы по видам при увеличении её содержания в СБМ.

Кроме того, важной задачей в технологии сероасфальтобетона (далее САБ) является определение содержания серы. В работах [15-17] показано, что с увеличением содержания серы возрастают не только механические свойства, но и проницаемость материала, что приводит к снижению его стойкости в жидких эксплуатационных средах. Кроме того, отсутствуют обоснования экспериментально установленных зависимостей прочности САБ от содержания серы.

Указанные нерешённые задачи определили цель работы и объекты исследования. Для определения распределения серы по её состояниям рационально использовать серобитумное вяжущее, которое в расплавленном состоянии является дисперсной системой типа эмульсии с дисперсной фазой в виде капель серы. Для исследования концентрационных зависимостей механических свойств от содержания серы – сероасфальтобетон.

Материалы и методы исследования

Для изготовления серобитумного вяжущего использовали нефтяной дорожный битум БНД 60/90 производства ООО «Московский нефтеперерабатывающий завод» (ГОСТ 22245-90) и гранулированную кристаллическую серу (ГОСТ 127.1-93). Свойства серобитумного вяжущего определены в соответствии с ГОСТ 22245-90 «Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические условия».

Для исследования механических свойств сероасфальтобетонов в качестве базового бетона использовался плотный асфальтобетон типа Б, спроектированный в соответствии с требованиями ГОСТ 9128-2013. Для изготовления сероасфальтобетонов использовали: серобитумное вяжущее, щебень из габбро-диабаз Карельского месторождения Новый поселок с

размером фракций от 5 до 20 мм (ГОСТ 8267 – 93), отсев камнедробления гранита (ГОСТ 31424 – 2010), кварцевый песок фракции 0,5...0,8 мм (ГОСТ 8739 – 93), неактивированный минеральный порошок из доломитовой породы (МП-1), (ГОСТ 52129 – 2003). Механические свойства сероасфальтобетонов (прочность, сдвигоустойчивость, трещиностойкость, сопротивление к пластическому течению по методу Маршалла) исследованы в соответствии с методиками, указанными в следующих нормативных документах: ГОСТ 12801 – 98 и TCVN 8860-1 (Вьетнамский нормативный документ).

Результаты исследования

Результаты исследования физико-механических свойств серобитумного вяжущего демонстрируют, что изменение концентрации серы оказывает влияние на все исследованные свойства серобитумного вяжущего. Анализ концентрационных зависимостей показывает, что влияние серы на относительное изменение исследованных свойств серобитумного вяжущего описывается линейной зависимостью (рисунок 1).

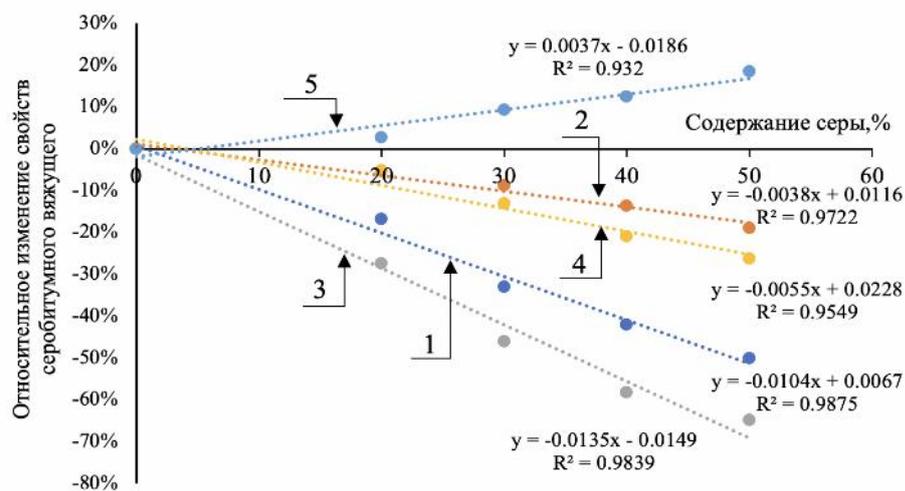


Рис. 1. – Зависимости относительного изменения свойств серобитумного вяжущего от содержания серы:

- 1) глубина проникания иглы при 25 °С; 2) то же, при 0 °С; 3) растяжимость при 25 °С; 4) то же, при 0 °С; 5) температура размягчения

Данные рисунка 1 демонстрируют, что наиболее значительное изменение свойств наблюдается для растяжимости при 25 °С (64,9 %), а минимальное относительное изменение для температуры размягчения (18,4 %). Кроме этого, относительное изменение наиболее значительно для свойств серобитумного вяжущего, определённых при температуре 25 °С, и менее изменчивы при температуре испытания 0 °С.

Для исследования распределения серы по её состояниям предположим следующее:

- 1) химические реакции протекают в зоне контакта «сера – битум», а количество серы в химически связанном состоянии Q_{ch} пропорционально площади границы раздела фаз (зоны контакта) S_{fb} :
 $Q_{ch} \propto S_{fb}$,
- 2) количество серы, растворенной в расплаве битума Q_r , пропорционально площади зоны контакта между серой и битумом S_{fb} , а также объёму битума, в котором растворяется сера V_b : $Q_r \propto V_b S_{fb}$;
- 3) количество физически свободной серы Q_f пропорционально количеству серы за исключением серы, находящейся в первых двух состояниях, то есть: $Q_f \propto V_s - Q_{ch} - Q_r$.

Предположим, что в исследуемом диапазоне содержания серы все ее состояния можно представить в виде:

$$\begin{cases} Q_{ch} = a_{ch} S_{fb} \\ Q_r = a_r V_b S_{fb} \\ Q_f = V_s - Q_{ch} - Q_r \end{cases}, \quad (1)$$

где a_{ch} – коэффициент, характеризующий количество серы, вступившей в химическое взаимодействие в зоне контакта «сера – битум»; a_r –

коэффициент, характеризующий количество серы, растворяющейся в единице объема расплава битума.

С учётом очевидных преобразований:

1) площадь границы раздела фаз равна:

$$S_{fb} = \frac{V_s}{\frac{\pi}{6} d_f^3},$$

где d_f – диаметр частицы серы,

2) объем серы и битума подчиняется закону абсолютных объемов, то есть:

$$V_0 = V_b + V_s,$$

систему уравнений (1) представим в виде:

$$\begin{cases} Q_{ch} = a_{ch} \frac{V_s}{\frac{\pi}{6} d_f^3} \\ Q_r = a_r (V_0 - V_s) \frac{V_s}{\frac{\pi}{6} d_f^3} \\ Q_f = V_s - a_{ch} \frac{V_s}{\frac{\pi}{6} d_f^3} - a_r (V_0 - V_s) \frac{V_s}{\frac{\pi}{6} d_f^3} \end{cases} . \quad (2)$$

Анализ (2) проведём по соотношению $Q_{ch} : Q_r : Q_f$:

$$\frac{Q_{ch}}{Q_{ch}} : \frac{Q_r}{Q_{ch}} : \frac{Q_f}{Q_{ch}} = 1 : \frac{a_r}{a_{ch}} (V_0 - V_s) : \frac{\frac{\pi}{6} d_f^3}{a_{ch}} - 1 - \frac{a_r}{a_{ch}} (V_0 - V_s). \quad (3)$$

Проведём анализ полученного соотношения (3):

1) слагаемое $\frac{a_r}{a_{ch}} (V_0 - V_s)$ с увеличением содержания серы будет уменьшаться, так как количество битума, в котором может раствориться сера также будет уменьшаться;

2) слагаемое $\frac{\frac{\pi}{6} d_f^3}{a_{ch}} - 1 - \frac{a_r}{a_{ch}} (V_0 - V_s)$ с увеличением содержания серы будет увеличиваться, так как слагаемое $\frac{a_r}{a_{ch}} (V_0 - V_s)$ будет уменьшаться.

Отсюда следует, что при увеличении V_S приведённое количество серы, растворившейся в расплаве битума, будет уменьшаться, а приведенное количество физически свободной серы будет возрастать.

Таким образом, проведённый анализ показывает, что изменения свойств серобитумного вяжущего с увеличением содержания серы (рисунок 1) обусловлены в основном увеличением количества физически свободной серы, которая формирует в объёме серобитумных материалов дополнительную дисперсную фазу, оказывающую влияние на вязкость серобитумных материалов. Влияние серы, обладающей температурой плавления 120 С, будет закономерно возрастать с повышением температуры эксплуатации/испытания, что и демонстрируют данные экспериментальных исследований рисунка 1.

Влияние содержания серы на механические свойства сероасфальтобетонов представлено на рисунках 2 – 6, которые демонстрируют закономерности аналогичные для серобитумных вяжущих – с увеличением содержания серы механические свойства сероасфальтобетонов возрастают (до 134%) и чем выше температура, тем выше эффект от введения серы.

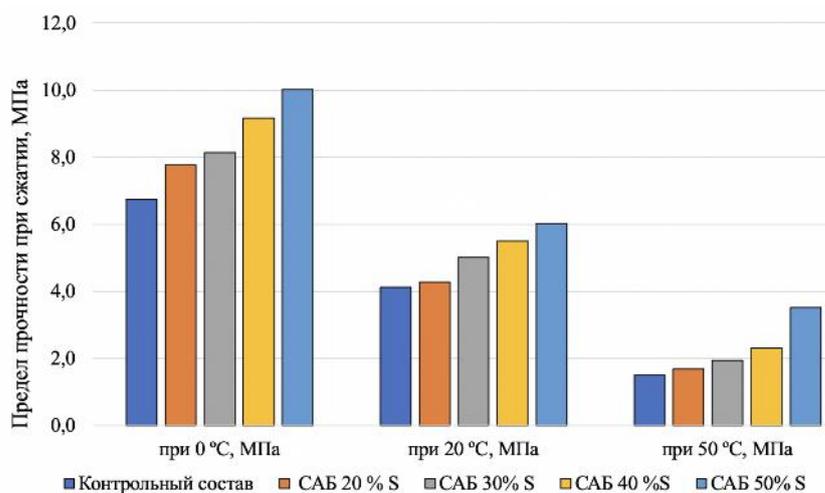


Рис. 2. – Прочность при сжатии сероасфальтобетона при 0; 20 и 50 °C (образцы испытаны после 4-суточного хранения)

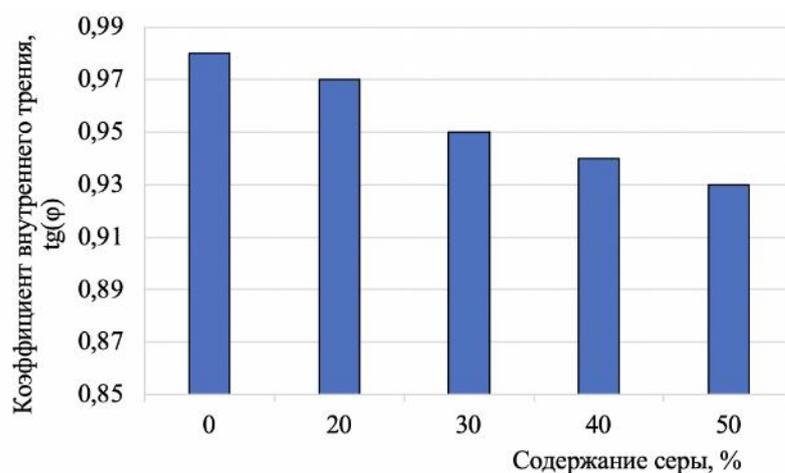


Рис. 3. – Зависимость коэффициента внутреннего трения $tg(\phi)$ от содержания серы

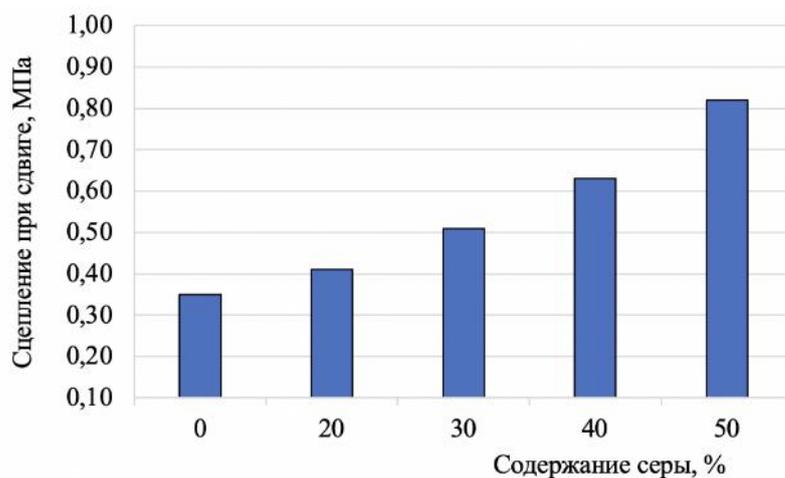


Рис. 4. – Зависимость сцепления при сдвиге при температуре 50 °С от содержания серы

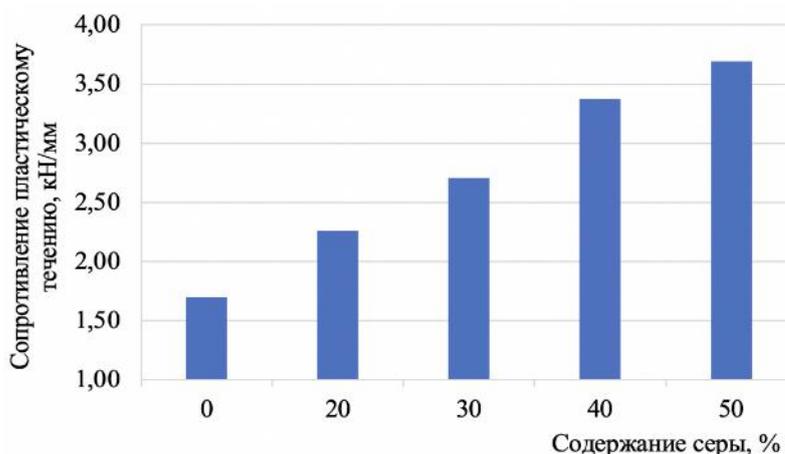


Рис. 5. – Зависимость сопротивления пластическому течению от содержания серы

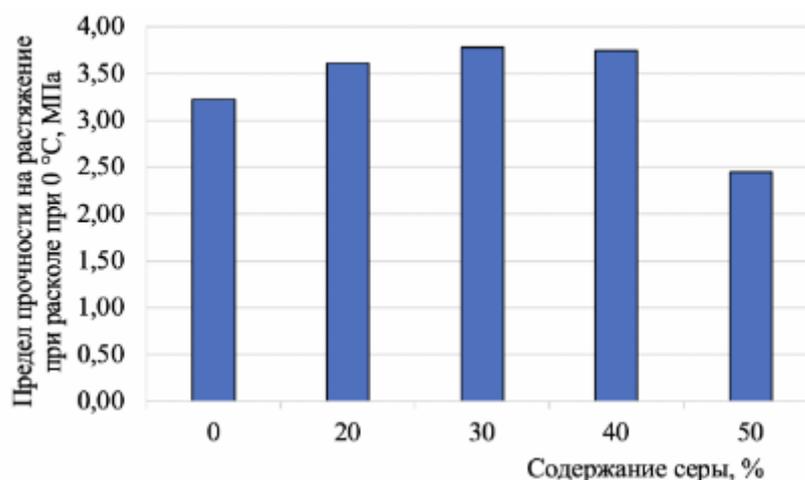


Рис. 6. – Зависимость предела прочности на растяжение при расколе сероасфальтобетона при 0 °С от содержания серы

Отклонение от пропорциональной зависимости свойства сероасфальтобетона от содержания серы демонстрирует трещиностойкость сероасфальтобетона (рисунок 6): наблюдается экстремальная зависимость с максимумом при 30 %-ном содержании серы в серобитумном вяжущем. При содержании серы 50 %, предел прочности на растяжение при расколе сероасфальтобетона на 23,9 % ниже, чем у контрольного состава и на 34,7 % ниже, чем у сероасфальтобетона с 40 % содержанием серы (рисунок 6).

Естественно предположить, что такое изменение трещиностойкости сероасфальтобетонов связано со структурными изменениями, связанными с формированием пространственных структур серы, образующихся при слиянии (коалесценции) капель серы. Как известно, сера в твёрдом состоянии является хрупким веществом, что отрицательно влияет на сопротивление материала растягивающим напряжениям (при определении трещиностойкости) и положительно при определении предела прочности при 0 °С (рисунок 2), так как в этом случае действуют не только растягивающие, но и касательные напряжения.

Для выявления условий формирования протяженных структур рассмотрим модель коалесценции капель серы. Для этого последовательно

рассмотрим: на первом этапе – изменение поверхностной энергии взаимодействующих частиц (капель) серы (дисперсная система – эмульсия серы в расплаве битума), а на втором этапе – преодоление межфазной пленки битума между каплями серы.

1. Изменение поверхностной энергии взаимодействующих капель серы.

Рассмотрим две капли серы (рисунок 7), имеющие сферическую форму и в момент времени $t = t_0$ радиусы $R_{1,0}$ и $R_{2,0}$, соответственно (причем $R_{1,0} \neq R_{2,0}$). Толщина межфазной пленки $\delta_0 = 0$. Межфазное поверхностное натяжение в первом приближении принимается равным $\sigma = \sigma_S$ (здесь σ_S – поверхностное натяжение расплава серы на границе «расплав серы – воздух»).

Поверхностная энергия контактирующих капель серы равна:

$$E_S = \sigma_S(S_1 + S_2), \quad (4)$$

где S_i – площадь поверхности i -ой частицы серы ($i = 1; 2$):

$$S_i = 4\pi R_i^2. \quad (5)$$

Условием, характеризующим возможность протекания процесса коалесценции, является минимум поверхностной энергии:

$$E_S = \min. \quad (6)$$

При предположении, что в процессе коалесценции капля серы будет происходить за счет дренажа увеличение объема одной капли и уменьшение другой (рисунок 7), то площадь поверхности новой капли будет равна (при выполнении условия: $R_{1,2}^3 = R_{1,0}^3 + R_{2,0}^3$):

$$S_{1,2} = 4\pi(R_{1,0}^3 + R_{2,0}^3)^{2/3}. \quad (7)$$

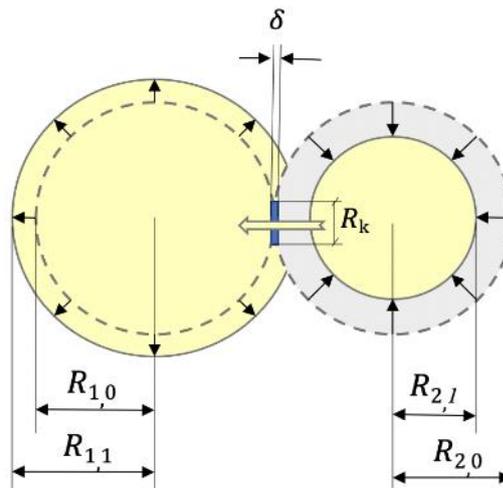


Рис. 7 – Дренаж серы между каплями

Изменение поверхностной энергии рассматриваемой системы с учетом условия (6) можно представить следующим образом:

$$\frac{E_S}{E_{S,0}} = \frac{(R_{1,0}^3 + R_{2,0}^3)^{2/3}}{R_{1,0}^2 + R_{2,0}^2} < 1. \quad (8)$$

При замене $R_{2,0} = \xi R_{1,0}$ формулу (8) можно преобразовать к виду:

$$\frac{E_S}{E_{S,0}} = \frac{(1 + \xi^3)^{2/3}}{1 + \xi^2}. \quad (9)$$

По условию задачи $\xi \neq 1$ и можно принять, что $\xi < 1$. В этом случае в диапазоне изменения коэффициента $\xi = I(0,1]$ значение $E_S/E_{S,0} < 1$ (рисунок 8).

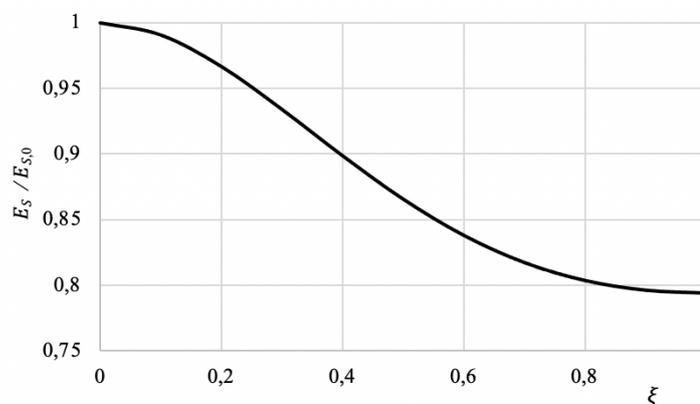


Рис. 8 – Зависимость $\frac{E_S}{E_{S,0}} = f(\xi)$

Отсюда следует, что процесс коалесценции капель серы является энергетически выгодным.

Движущей силой процесса коалесценции капель будет являться избыточное давление Лапласа, возникающее вследствие разницы геометрических размеров капель серы:

$$\Delta P = 2\sigma_S \left(\frac{R_{2,0} - R_{1,0}}{R_{1,0}R_{2,0}} \right) \quad (10)$$

или с учетом замены $R_{2,0} = \xi R_{1,0}$

$$\Delta P = \frac{2\sigma_S}{R_{1,0}} \left(\frac{\xi - 1}{\xi} \right). \quad (11)$$

Зависимость относительного изменения давления $|\Delta P/P_1|$ (здесь P_1 – давление Лапласа в первой частице серы: $P_1 = 2\sigma_S/R_{1,0}$) представлена на рисунке 9, из которого следует, что по мере поглощения одной частицы другой движущая сила процесса коалесценции возрастает. Также полученный результат указывает на то, что при контакте разноразмерных частиц движущая сила процесса возрастает тем сильнее, чем больше различие в размерах частиц.

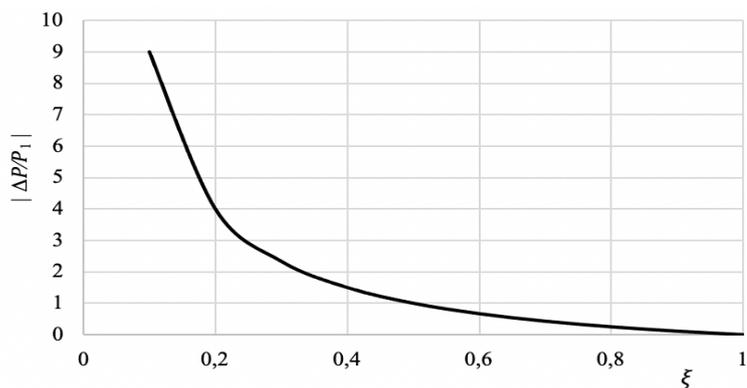


Рис. 9 – Зависимость $|\Delta P/P_1| = f(\xi)$

Таким образом, процесс коалесценции капель серы является энергетически выгодным процессом, движущей силой которого является избыточное давление Лапласа, возникающее вследствие различия геометрических размеров контактирующих частиц.

2. Преодоление межфазной пленки битума

Протекание коалесценции частиц серы возможно при отсутствии межфазной пленки расплава битума. Исследования, проводимые в этой области представлены в работе [18]. Для пленок, для которых выполняется условие:

$$(P_D + P_K) \gg \Pi / \pi R_K^2 \quad (12)$$

(здесь P_D , P_K – динамическое и капиллярное давление ($P_K = \frac{2\sigma}{g\delta}$), действующие в пленке; Π – расклинивающее давление, определяемое как $\Pi = -\frac{AR_k^2}{6\delta^2}$ для сферической и $\Pi = -\frac{AR_k^2}{6\delta^3}$ для деформируемой капле; A – выражает константу Ван-дер-Ваальса – Гаммакера ($A \sim 10^{-21}$ Дж); R_k – радиус поверхности контакта) являются «толстыми», для которых кинетика изменения толщины пленки описывается зависимостью:

$$\delta(t) = \frac{\delta_0}{\sqrt{1 + \beta t}} \quad (13)$$

где β – коэффициент, равный:

$$\beta = \frac{2 P_D g \delta_0}{3 \mu_c R_K^2}, \quad (14)$$

здесь μ_c – динамическая вязкость среды.

Анализ формул (13) и (14) показывает, что при прочих равных условиях параметром, влияющим на величину и скорость утоньшения плёнки, является её толщина, которая зависит от размера частиц и содержания серы:

$$\delta_0 = \bar{d}_S \sqrt[3]{\eta_f / \nu_S} - 1, \quad (15)$$

где \bar{d}_S – средний диаметр частиц серы в эмульсии; η_f – максимальная плотность упаковки частиц ($\eta_f = 0,74$); ν_S – объемная доля серы в эмульсии.

Средний диаметр частиц зависит от условий получения эмульсии. Диапазон изменения диаметра частиц серы может быть вычислен по формуле, представленной в [18]:

– максимальный диаметр:

$$d_{max} = 1,12 \left(\frac{\sigma}{\rho_c} \right)^{0,6} \left(\frac{\mu_c}{\mu_d} \right)^{0,1} \varepsilon_R^{-0,4}; \quad (16)$$

– минимальный диаметр:

$$d_{min} \approx \frac{\rho_c}{\sigma} v_c^2, \quad (17)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения; ρ_c – плотность среды и частиц; μ_d – динамическая вязкость частиц; ε_R – диссипация энергии в единице массы; v_c – кинематическая вязкость среды.

Экспериментальные исследования по получению серных эмульсий в битуме (рисунок 10) показывают, что диапазон изменения диаметров частиц составляет 28...70 мкм.

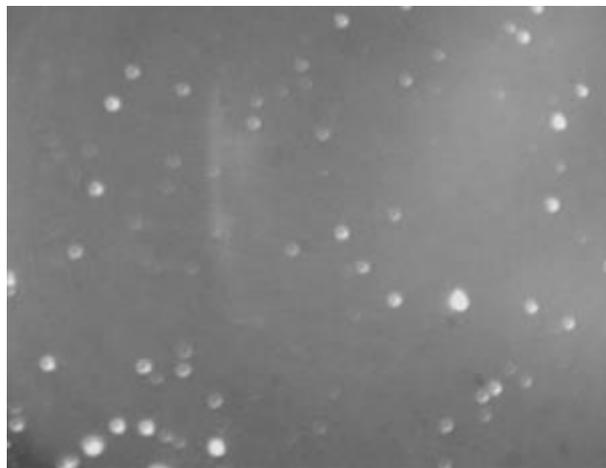


Рис.10 – Фотография серной эмульсии в битуме
(светлые сферы – капли серы)

Анализ формулы (15) показывает, что с увеличением содержания серы относительная толщина прослойки битума закономерно уменьшается. Формулу (13) при предположении о наличии минимальной

термодинамически устойчивой прослойке битума δ_{min} можно преобразовать к виду:

$$t_{max} \approx \frac{\delta_0}{K \delta_{min}^2}, \quad (18)$$

где $K = \frac{2 P_D g}{3 \mu_c R_K^2}$.

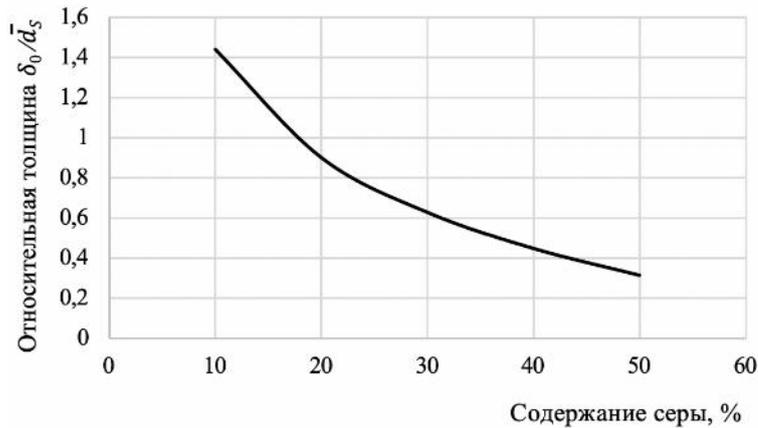


Рис.11 – Зависимость относительной толщины δ_0/\bar{d}_s от содержания серы

Из формулы (18) с учётом данных рисунка (11) следует, что при прочих равных условиях затраты времени на преодоление прослойки битума для серных суспензий с высоким содержанием дисперсной фазы существенно меньше, а вероятность коалесценции частиц серы, которая обратно пропорциональна толщине прослойки битума существенно возрастает.

Таким образом, коалесценция капель серы является энергетически выгодным процессом, движущей силой которого является давление Лапласа, возрастающее с увеличением соотношения размеров контактирующих капель серы. Также с увеличением содержания серы возрастает вероятность преодоления межфазной плёнки битума между каплями серы, что закономерно повышает вероятность образования пространственных структур серы, отрицательно влияющих на трещиностойкость сероасфальтобетона.

Заключение и обсуждение

Разработана модель распределения серы по основным группам состояний, анализ которой демонстрирует, что при увеличении содержания серы в составе серобитумного вяжущего возрастает приведенное содержание физически свободной серы, которая формирует в объеме серобитумных материалов дополнительную дисперсную фазу, повышающих их вязкость. Это повышение закономерно увеличивает показатели свойств серобитумного вяжущего. Причём с повышением температуры эксплуатации/испытания влияние серы возрастает.

Наличие серы, как дисперсной фазы в серобитумном вяжущем, закономерно влияет на механические свойства сероасфальтобетонов: наблюдается повышение показателей механических свойств с увеличением содержания серы. Указанная закономерность нарушается для трещиностойкости сероасфальтобетонов. Сформулировано предположение, что причиной экстремального характера изменения трещиностойкости сероасфальтобетонов с увеличением содержания серы является образование пространственных структур серы, являющейся хрупким веществом. Для установления условий, приводящих к формированию пространственных структур, разработана модель коалесценции капель серы. Анализ указанной модели демонстрирует, что с увеличением содержания серы возрастает вероятность образования пространственных структур серы, снижающих трещиностойкость сероасфальтобетона.

Литература

1. Котлярский Э.В., Гридчин А.М., Лесовик Р.В. Факторы, способствующие разрушению структуры асфальтобетона в процессе эксплуатации дорожных асфальтобетонных покрытий. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (Белгород). 2012. 187 с.

2. Тураев Ф. Т., Бекназаров Х. С., Джалилов А. Т. Исследование модификации дорожного битума элементной серой. *Universum: технические науки*. 2019. (2 (59), С. 65-69.

3. Gladkikh Vitaliy, Korolev Evgeniy, Husid Dmitriy and Sukhachev Ilya. Properties of sulfur- extended asphalt concrete. *MATEC Web of Conferences IPICSE*. 2016. p86. URL: doi.org/10.1051/e3sconf/20199107014.

4. Yang R, Ozer H, Ouyang Y, Alarfaj A, Islam K, Khan M I, Khan K M, and Shalabi F. I. Life-Cycle Assessment of Using Sulfur-Extended Asphalt (SEA) in Pavements. *Airfield and Highway Pavements*. 2019. p183-192.

5. Aditya Kumar Das, Mahabir Panda. Effectiveness of chitin on thermal susceptibility, rheological and ageing resistivity behaviour of sulphur modified bitumen binder. *Road Materials and Pavement Design* 21:7, (2020). P 2005-2023.

6. Плотникова И.А. Использование серы в качестве добавки к нефтяным дорожным битума. *Нефтепереработка и нефтехимия*. – 1984. – № 11. – С.7-9.

7. Andronov Sergey Yuryevich, Vasiliev Yuri Emanuilovich, Timokhin Denis Konstantino-vich, Repin Alexander Mikhailovich, Repina Oksana Vladimirovna and Talalay Victor Vyacheslavovich. Production and use of sulfur-asphalt composite coatings on roads and bridges. *Bulletin of Eurasian Science* 8. 2016. (3 (34)). URL: [//naukovedenie.ru/PDF/104TVN316.pdf](http://naukovedenie.ru/PDF/104TVN316.pdf)

8. Балабанов В. Б, Бурлаков П. А. Асфальтобетоны на серобитумных вяжущих. *International scientific news 2017: XXVIII Международная научно-практическая конференция*. – 2017. – С.124-127.

9. Yeoh David, Boon Koh Heng, Jamaluddin Norwati. Exploratory study on the mechanical and physical properties of concrete containing sulfur. *Journal Technology Sciences & Engineering*. 2015. 77:32) p 179–188.

10. Тураев, Ф.Т., Бекназаров Х.С., Джалилов А.Т. Исследование модификации дорожного битума элементной серой. *Universum: технические науки*. – 2019. – № 2 (59). – С.65-69.

11. Гладких В. А. Сероасфальтобетон, модифицированный комплексной добавкой на основе технической серы и нейтрализаторов эмиссии токсичных газов: дисс. ... канд. техн. наук. Москва. – 2015. 222с.
 12. Исраилова З.С., Цамаева П.С., Страхова Н.А. Влияние химического состава битумов на водостойкость асфальтобетона. Естественные и технические науки. 2008. 5 (37). С. 246-248.
 13. Мартынов А.В., Варченко Е., Медведев И.М. Исследование долговечности асфальтобетонных конструкций в условиях воздействия переменной влажности морского побережья. Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции. 2014. С. 475-481.
 14. Королев Е.В., Баженов Ю. М., Альбакасов А. И. Радиационно-защитные и химически стойкие серные строительные материалы- Пенза, Оренбург: ИПК ОГУ, 2010.- 364с.
 15. Ле Х.Т., Гладких В.А., Королев Е.В., Гришина А.Н. Водостойкость сероасфальтобетона. Результаты исследования и особенности определения. Строительные материалы. 2021. № 3. С. 39-44.
 16. Le H. T., Korolev E. V., Grishina A. N., Gladkikh . V. A. Reasons for reduced moisture resistance of sulfur-extended asphalt concrete. Materials. – 2021. – Vol. 14. – No 23. – DOI 10.3390/ma14237218.
 17. Королев Е. В., Гришина А. Н., Гладких В. А., Ле Т. Х. Модель формирования дополнительного объема порового пространства в сероасфальтобетонах. Промышленное и гражданское строительство. – 2021. – № 7. – С. 16-21. – DOI 10.33622/0869-7019.2021.07.16-21.
 18. Келбалиев Г. И, Расулов С. Р. Математическое моделирование процессов коалесценции и дробления капель и пузырей в изотропном турбулентном потоке (обзор). Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки, 2019. Т. 23, No 3. С. 541–581. doi: 10.14498/vsgtu1664.
-

References

1. Kotlyarskiy E.V., Gridchin A.M., Lesovik R.V. Faktory, sposobstvuyushchie razrusheniyu struktury asfal'tobetona v processe ekspluatatsii dorozhnyh asfal'tobetonnyh pokrytij. [Factors contributing to the destruction of the structure of asphalt concrete in the operation of road asphalt pavements]. Belgorodskiy gosudarstvennyj tekhnologicheskij universitet im. V.G. Shukhova. 2012. p. 187.
 2. Turayev, F.T., Beknazarov, K.S., Dzhililov, A.T. Universum: tekhnicheskiye nauki. 2019. 2 (59), p65-69.
 3. Gladkikh Vitaliy, Korolev Evgeniy, Husid Dmitriy and Sukhachev Ilya. MATEC Web of Conferences IPICSE. 2016. P.86. URL: doi.org/10.1051/e3sconf/20199107014.
 4. Yang R, Ozer H, Ouyang Y, Alarfaj A., Islam K, Khan M I, Khan K M, and Shalabi F. I. Airfield and Highway Pavements. 2019. Pp.183-192.
 5. Aditya Kumar Das, Mahabir Panda. Road Materials and Pavement Design 21:7, (2020). Pp. 2005-2023.
 6. Plotnikova, I.A. Neftepererabotka i neftekhimiya. 1984. № 11. pp. 7-9.
 7. Andronov Sergey Yuryevich, Vasiliev Yuri Emanuilovich, Timokhin Denis Konstantinovich, Repin Alexander Mikhailovich, Repina Oksana Vladimirovna and Talalay Victor Vyacheslavovich. Bulletin of Eurasian Science 8. 2016. (3 (34))) p 107. URL: pnaukovedenie.ru/PDF/104TVN316.pdf
 8. Balabanov V. B, Burlakov P. A. XXVIII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya. 2017. pp.124-127.
 9. Yeoh David, Boon Koh Heng and Jamaluddin Norwati. Journal Technology Sciences & Engineering. 2015. 77:32). pp. 179–188.
 10. Turayev, F.T., Beknazarov KH.S., Dzhililov A.T. Universum: tekhnicheskiye nauki. 2019. № 2 (59). pp. 65-69.
 11. Gladkikh Vitaliy Aleksandrovich. Seroasfal'tobeton, Modifitsirovanniy kompleksnoi dobavkoi na osnove tekhnicheskoi sery i neitralizatorov emiscii
-

toksichnykh gazov [Sulfur asphalt concrete modified with a complex additive based on technical sulfur and toxic gas emission neutralizers] Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [The dissertation for the degree of candidate of technical sciences]. Moskva, 2015. 222p.

12. Israilova Z.S., Tsamayeva P.S., Strakhova N.A. Yestestvennyye i tekhnicheskiye nauki. 2008. 5(37). pp. 246-248.

13. Martynov A.V., Varchenko Ye., Medvedev I.M. Novoye v arkhitekture, proyektirovanii stroitel'nykh konstruktsiy i rekonstruktsii. 2014. pp. 475-481.

14. Korolev E.V., Bazhenov Yu.M., Albakasov A.I. Radiatsionno-zashchitnyye i khimicheski stoykiye sernyye stroitel'nyye materialy [Radiation-protective and chemically resistant sulfur building materials]. Penza, Orenburg: IPK OSU, 2010. 364p.

15. Le H.T., Gladkikh V.A., Korolev E.V., Grishina A.N. Stroitel'nye Materialy. 2021. No.3, pp. 39–44. DOI: doi.org/10.31659/0585-430X-2021-789-3-39-44

16. Le H. T., Korolev E. V., Grishina A. N., Gladkikh . V. A. Materials. 2021. Vol. 14. № 23. DOI 10.3390/ma14237218.

17. Korolev Ye. V., Grishina A. N., Gladkikh V. A., Le T. H. Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo, 2021. No. 7. pp. 16-21. DOI 10.33622/0869-7019.2021.07.16-21.

18. Kelbaliyev G. I, Rasulov S. R. Vestn. Sam. gos. tekhn. unta. Ser. Fiz.mat. nauki, 2019. V. 23, No 3. pp. 541–581. doi: 10.14498/vsgtu1664.