УДК 665.775.4:535.135 DOI: 10.33622/0869-7019.2020.12.86-92

Исследование фрактальной структуры межфазного слоя битума на поверхности минерального порошка

Светлана Юрьевна ШЕХОВЦОВА, кандидат технических наук, доцент, e-mail: shehovtsovasyu@mgsu.ru

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337 Москва, Ярославское ш., 26

Евгений Валерьевич КОРОЛЕВ, доктор технических наук, профессор, проректор по учебно-методической работе, e-mail: korolevev@nocnt.ru

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» (СПбГАСУ), 190005 Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4

***Аннотация**. Проанализированы методы изучения параметров структуры строительных материалов с помощью фрактальных множеств. Предложен метод определения фрактальной размерности в асфальтобетоне для основной структурирующей бинарной системы «минеральный наполнитель—битумное вяжущее». Интенсивность взаимодействия происходящих межфазовых процессов оценивали по площади поверхности контакта и адсорбционной активности минерального компонента, структурированность бинарной системы определяли по показателю сопротивления сдвиговому усилию. Используя уравнение А. Эйнштейна, рассчитывали толщину адсорбционно связанной прослойки. Для изучения возможной фрактальной структуры образованного межфазного слоя применяли метод анализа самоподобных структур. Установлено, что в начальный момент образования межфазного слоя в бинарной системе «минеральный наполнитель — битумное вяжущее» его прочность характеризуется количеством адсорбирующихся молекул и их агрегатов, что свидетельствует о том, что структура межфазного слоя проявляет фрактальные свойства.*

***Ключевые слова**: фракталы, структура, межфазный слой, минеральный порошок, битумное вяжущее.*

RESEARCH OF THE FRACTAL STRUCTURE OF THE INTERFACIAL LAYER OF BITUMEN ON THE SURFACE OF MINERAL POWDER

Svetlana Yu. SHEKHOVTSOVA, e-mail: shehovtsovasyu@mgsu.ru

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow 129337, Russian Federation

Evgeniy V. KOROLEV, e-mail: korolevev@nocnt.ru

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2-ya Krasnoarmeyskaya ul., 4, Saint Petersburg 190005, Russian Federation

***Abstract**. Methods for studying the structure parameters of building materials using fractal sets are considered and analyzed. A method for determining the fractal dimension for the main structuring binary system in asphalt concrete — "mineral filler-bituminous binder" is proposed. The intensity of interaction between the occurring interphase processes was judged by the contact surface area and the adsorption activity of the mineral component. The structure of the binary system was evaluated by the index of resistance to shear force. Using the Einstein equation, the thickness of the adsorption-bound layer was calculated. To study the possible fractal structure of the formed interfacial layer, the method of self-similar structures analysis was used. It is established that at the initial moment of formation of the interphase layer in the binary system "mineral filler-bituminous binder", its strength is characterized by the number of adsorbing molecules and their aggregates, which indicates that the structure of the interfasial layer exhibits fractal properties.*

***Key words**: fractals, structure, interfacial layer, mineral powder, bituminous binder.*

© ШЕХОВЦОВА С. Ю., КОРОЛЕВ Е. В., 2020

Исходным условием появления фракталов как реальных объектов является неравновесность системы. Эволюционные процессы в необратимой системе происходят в направлении возрастания энтропии (стрела времени) [1—3]. Данные процессы нельзя полностью отождествлять с релаксацией системы, однако необратимые явления (диффузия, кинетика и т. д.) можно представить в виде непрерывных кинетических процессов. Это утверждение справедливо в том случае, когда фазовая плотность будет непрерывной. Необходимый рост энтропии сопровождается увеличением объема занимаемой фазовой жидкости. Таким образом, фазовая жидкость должна быть растягиваемой, а степени свободы — статистически связанными.

Расширение пространства состояний (сопровождающее энтропию) вступает в противоречие с необходимостью сохранения непрерывности «фазовой

жидкости», которая заполняет топологическое пространство. Не успевая за расширением пространства состояний, она должна разорваться, что сопровождается образованием множества разрывных структур (кластеров), в пределах которых сохраняется непрерывность движения.

Данные множества образуют фрактальные структуры внутри топологического пространства. При этом у сформировавшейся фрактальной жидкости плотность будет равна нулю, что автоматически отвечает условию независимости степеней свободы

$$\frac{d\rho(q,P,t)}{dt}=0, \quad (1)$$

где ρ — фазовая плотность, г/см^3; q — координаты; P — импульсы; t — время.

Таким образом, фрактальные множества — это многомасштабные неравновесные структуры, которые являются иерархически соподчиненными статистическими ансамблями и занимают лишь часть топологического пространства. А фракталом служит самоподобное множество с размерностью, меньше топологической, и плотностью, равной нулю [4, 5].

Представления о фракталах [1—3, 5] и моделях, основанных на них, достаточно быстро проникли в различные области естественных наук, в том числе и технических [5—10]. Было показано, что ряд реальных физических явлений диффузионной природы носят фрактальный характер [3]. Так, Б. Н. Тарасевич высказывает предположение о фрактальной структуре межфазного слоя, образующегося на границе раздела жидких несмешивающихся фаз [11]. Автором рассмотрен межфазный слой желатины, а на основании анализа зависимости значений (полученных экспериментальным путем) натурального логарифма предельного напряжения сдвига от натурального логарифма толщины межфазных слоев желатины в системе с бензолом и четыреххлористым углеродом была рассчитана фрактальная размерность, что подтверждает его выдвинутое предположение.

Метод определения фрактальной размерности, используемый в данной работе, рассмотрим для бинарной системы «минеральный наполнитель — битум», где на поверхности минерального компонента происходит структурирование битума. Активность взаимодействия на границе раздела фаз данной системы во многом определяет качество асфальтобетона и его способность сопротивления эксплуатационным агрессивным факторам [12, 13]. Об интенсивности данного процесса можно судить по площади поверхности контакта и адсорбционной активности минерального компонента.

Наибольший вклад в удельную поверхность минеральных компонентов асфальтобетона вносит минеральный порошок. Увеличение дисперсности материала приводит к повышению его активности при контакте с битумом, что способствует возрастанию объема структурированного битума в граничных слоях и, как следствие, увеличению его вязкости [14].

На вязкость дисперсной системы оказывают влияние как количество дисперсной фазы, так и форма частиц. При этом на поверхности частиц образуется межфазный слой, состоящий из адсорбционного и кинетического слоев: кинетический слой характеризует влияние формы частицы и вязкости дисперсионной среды, а адсорбционный слой — только физико-химическую активность дисперсной фазы.

Толщину межфазного слоя на границе раздела «минеральный порошок — битум» определяли по методике [15]. Далее устанавливали диапазон объемной степени наполнения минерального наполнителя, при котором выполняется закон А. Эйнштейна и можно вычислить толщину межфазного слоя. При образовании такого слоя формально увеличивается объемное содержание дисперсной фазы на $\Delta\varphi$. Запишем уравнение А. Эйнштейна в виде:

$$\eta_{ek}=\eta_o[1+\alpha_o(\varphi_o+\Delta\varphi)] \quad (2)$$

$$\text{или } \eta_{ek}=\eta_u+\alpha_o\eta_o\Delta\varphi,$$

где $\eta_u=\eta_o[1+\alpha_o\varphi_o]$ — уравнение А. Эйнштейна; η_o — вязкость дисперсионной среды; α_o — коэффициент формы сферической частицы, $\alpha_o=2{,}5$; φ_o — объемная доля наполнителя.

Приращение объемной доли дисперсной фазы составит

$$\Delta\varphi=\frac{\eta_{ek}(\varphi_o)-\eta_u}{\varphi_o\alpha_o}.$$

При замене

$$\varphi_i=N_f\frac{\pi}{6}d_f^3 \text{ и } N_f=N_{f,o}$$

получим

$$\Delta\varphi=\varphi_o\left[\left(\frac{d_f}{d_{f,o}}\right)^3-1\right].$$

Толщину межфазного слоя находим посредством замены $d_f=d_{f,o}+2h$ и $d_f=6/S_u\rho_f$:

$$h=\frac{3}{S_u\rho_f}\left(\sqrt[3]{\frac{\eta_{ek}(\varphi_o)-\eta_o}{\varphi_o\alpha_o\eta_o}+1}-1\right), \quad (3)$$

где ρ_f — плотность материала дисперсной фазы; S_u — удельная поверхность дисперсной фазы.

Аналогично при учете влияния формы частицы и адсорбционного слоя на коэффициент α $(\alpha>\alpha_o)$ запишем:

1. Физико-механические показатели свойств минеральных порошков

Показатель	Требования ГОСТ	Кварцевый наполнитель	МП-1	Диатомит	Диатомит-600*
Зерновой состав, % по массе, мельче:					
1,25 мм	Не менее 100	100	100	100	100
0,315 мм	Не менее 90	100	99,3	100	92,4
0,071 мм	От 70 до 80	95,2	75,5	97,7	86
Площадь удельной поверхности, м²/кг	Не нормируется	1022	461	1113	681
Плотность истинная, г/см³	Не нормируется	2,73	2,82	2,11	2,2
Влажность, % по массе	Не более 1	1,8	2,3	2	1

* Диатомит-600 — диатомит, обработанный при температуре 600 °С.

$$\left(\frac{d_f}{d_{f,o}}\right)^3 = \frac{1}{\alpha\varphi_o}\left(\frac{\eta_{ek}(\varphi_o)}{\eta_o} - 1\right),$$

отсюда

$$h = \frac{3}{S_u\rho_f}\left(\sqrt[3]{\frac{1}{\alpha\varphi_o}\left(\frac{\eta_{ek}(\varphi_o)}{\eta_o} - 1\right)} - 1\right). \quad \textbf{(4)}$$

Подобная формула предложена в работе [13]:

$$h = \frac{10^4}{\rho_f S_u}\left(\frac{\alpha}{\alpha_m} - 1\right),$$

где α, α_m — коэффициенты, вычисляемые на основании измерения вязкости соответственно исследуемой дисперсной системы и модельной системы «наполнитель — среда», в которой среда не образует совсем или образует на поверхности частиц сольватную оболочку ничтожно малой толщины.

Недостаток представленной методики — предположение об идентичности формирования слоев в различных дисперсионных средах, т. е. сопоставление в поведении системы проводится не с идеальной системой, описываемой уравнением А. Эйнштейна (в формулах (3)—(4) идеальная система характеризуется «1»), а с некоторой модельной системой. Кроме того, возникают определенные сложности в подборе модельной дисперсионной среды (в этом случае необходимо иметь среду с аналогичной зависимостью вязкости в исследуемом диапазоне температур и лиофобную к поверхности минерального компонента). Только реализация указанных требований к дисперсионной модельной среде позволяет вычислить значения толщины адсорбционного слоя дисперсионной среды.

Аналогично с использованием формул (3) и (4) при очевидном предположении

$$h_a = h - h_k,$$

где h_a — толщина адсорбционного слоя; h_k — толщина кинетического слоя,

получим:

$$h_a = \frac{3}{S_u\rho_f}\left(\sqrt[3]{\frac{\eta_{ek}(\varphi_o) - \eta_o}{\varphi_o\alpha_o\eta_o} + 1} - \sqrt[3]{\frac{\eta'_{ek}(\varphi_o) - \eta'_o}{\varphi_o\alpha_o\eta_o} + 1}\right), \quad \textbf{(5)}$$

$$h_a = \frac{3}{S_u\rho_f}\left(\sqrt[3]{\frac{1}{\alpha\varphi_o}\left(\frac{\eta_{ek}(\varphi_o)}{\eta_o} - 1\right)} - \sqrt[3]{\frac{1}{\alpha'\varphi_o}\left(\frac{\eta'_{ek}(\varphi_o)}{\eta'_o}\right) - 1}\right), \quad \textbf{(6)}$$

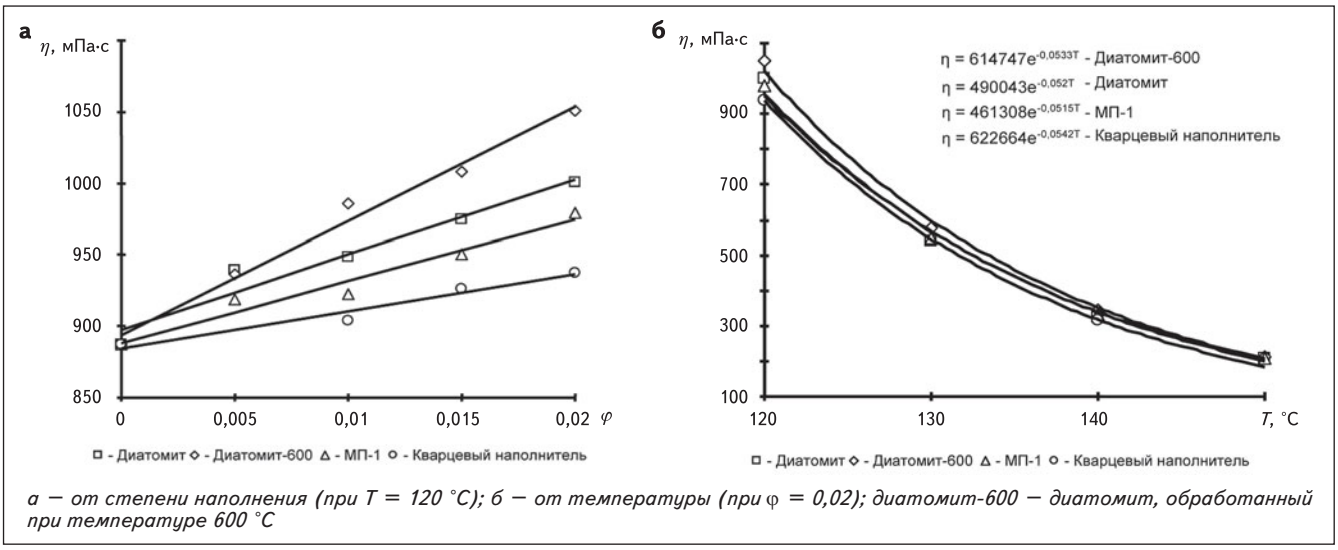
здесь индексом «'» обозначена модельная система.

Устранение этого недостатка методики [16] возможно следующим образом. Кинетический слой зависит в основном от вязкости дисперсионной среды и формы частиц дисперсной фазы. Очевидно, что с увеличением температуры вязкость дисперсионной среды уменьшается. В модельной системе при $\eta_o \to 0$ (или для многокомпонентной дисперсионной среды к $\eta_o \to \eta_{o,\min}$, где $\eta_{o,\min}$ — вязкость высокоподвижной компоненты) толщина кинетического слоя также $h_k \to 0$.

В работе [17] авторами показано, что в интервале объемного содержания дисперсной фазы $\varphi \in$ [0; 0,05] выполняется уравнение А. Эйнштейна, поэтому в данной работе в дальнейшем расчет толщин слоев проводился при объемной степени наполнения 2 %.

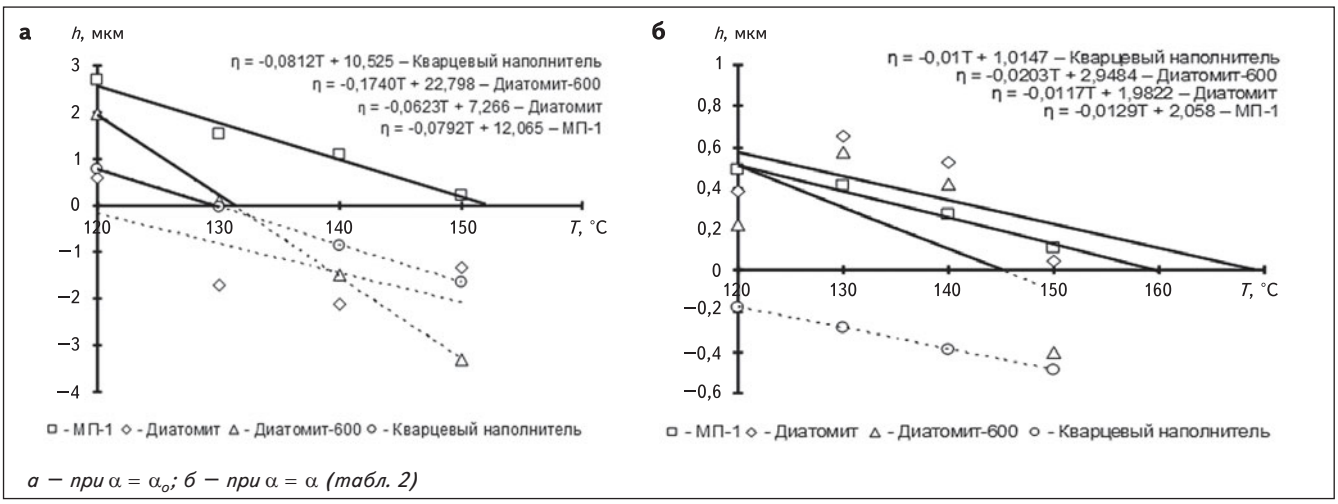
В качестве минеральных исследовали наполнители, свойства которых представлены в *табл. 1.*

Рассматриваемые минеральные порошки различаются по зерновому составу, а следовательно, по удельной площади поверхности частиц, характеризующей потенциальную площадь границы раздела фаз с битумом, по которой происходят физико-химические процессы взаимодействия. Вид дисперсной фазы и температура также оказывают влияние на вязкость системы *(рис. 1).*



а — от степени наполнения (при T = 120 °C); б — от температуры (при φ = 0,02); диатомит-600 — диатомит, обработанный при температуре 600 °C

Рис. 1. ***Зависимость вязкости дисперсной системы***



а — при $\alpha = \alpha_o$; б — при $\alpha = \alpha$ (табл. 2)

Рис. 2. ***Зависимость толщины оболочки битума от температуры***

Уравнение зависимости вязкости от степени наполнения при проведении аппроксимации имеет вид $y = kx + b$ или в соответствии с уравнением А. Эйнштейна $\eta = \alpha\eta_o\varphi + \eta_o$, где $k = \alpha\eta_o$ и $b = \eta_o$, угловой коэффициент, характеризующий влияние дисперсной фазы, равен $\alpha = k/b$. Значения коэффициентов представлены в *табл. 2*.

По полученным экспериментальным зависимостям вязкости дисперсной системы «битум — минеральный компонент» выполнены расчеты толщин слоев: по формулам (1) и (2) — общей толщины, а по формулам (3) и (4) — адсорбционного слоя. При проведении эксперимента с дисперсной системой «касторовое масло — минеральный компонент» подбиралась температура, при которой вязкость касторового масла будет соответствовать вязкости битума *(табл. 3, 4)*.

Анализ результатов расчета толщин слоев битума по сравнению с идеальной системой (уравнение А. Эйнштейна) и с модельной системой показывает, что для некоторых наполнителей толщины имеют отрицательные значения. Указанный факт физически абсурден, так как это возможно только при растворении наполнителя. Отсюда очевидно, что отрицательные значения толщин фактически указывают на отсутствие слоя битума на поверхности минерального компонента (причем как адсорбционного, так и кинетического слоя).

Для определения толщины слоя битума важно определить температуру, при которой толщина кинетического слоя мала ($h_k \to 0$). С этой целью необходимо определить минимальную вязкость битума. При условии многокомпонентности битума примем, что минимальную вязкость битума обеспечивают маловязкие масла. В данном случае в качестве модели масла примем вязкость касторово-

2. Значения коэффициентов уравнения зависимости вязкости от степени наполнения

Коэффициент	Температура, °С	Наполнитель			
		Кварцевый наполнитель	МП-1	Диатомит	Диатомит-600
k	120	2595,4	4319,7	5252,9	7989,6
b		884,6	888,3	897,56	893,89
α		2,93	4,86	5,85	8,94
k	130	1294,1	2109,2	1585,3	3439,1
b		504,62	506,2	510,15	509,25
α		2,56	4,17	3,11	6,75
k	140	588,5	1222,2	867,95	1732,3
b		305,9	307,0	308,39	308,63
α		1,92	3,98	2,81	5,61
k	150	305,94	687,6	775,5	936,1
b		193,88	194,5	195,36	194,80
α		1,58	3,54	3,97	4,81

3. Толщина слоев битума на поверхности минерального компонента (при α_o = 2,5)

Наполнитель	Общая толщина межфазного/адсорбционного слоя, мкм, при температуре, °С			
	120	130	140	150
Кварцевый наполнитель	0,777/0,79	−0,037/−0,025	−0,847/−0,834	−1,661/−1,649
Диатомит	0,595/0,732	−1,708/−1572	−2,127/−1,991	−1,342/−1,205
Диатомит-600	1,97/2,308	0,074/0,412	−1,483/−1,145	−3,309/−2,971
МП-1	2,69/2,69	1,51/1,51	1,08/1,08	0,192/0,192

Примечание. Общую толщину межфазного слоя определяли по формуле (1), толщину адсорбционного слоя — по формуле (3).

4. Толщина слоя битума на поверхности минерального компонента (фактор формы частиц α)

Наполнитель	Общая толщина межфазного/адсорбционного слоя, мкм, при температуре, °С			
	120	130	140	150
Кварцевый наполнитель	−0,185/−0,145	−0,285/−0,245	−0,385/−0,345	−0,485/−0,445
Диатомит	0,387/0,656	0,656/0,925	0,525/0,794	0,041/0,309
Диатомит-600	0,219/0,723	0,578/1,082	0,17/0,92	−0,405/0,345
МП-1	0,488/0,522	0,413/0,447	0,272/0,306	0,106/0,14

Примечание. Общую толщину межфазного слоя определяли по формуле (2), толщину адсорбционного слоя — по формуле (4).

го масла *(рис. 2)*. Минимальная вязкость касторового масла наблюдается при температуре 140 °С: $\eta_{o,\min}$ = 5,34 мПа·с. Температуру, при которой битум имеет $\eta_{o,\min}$, рассчитывали по формуле

$$T^* = \ln(a/\eta_{o,\min})/b = 220\ ^\circ\text{C}, \quad (7)$$

где a, b — эмпирические коэффициенты зависимости $\eta_o = f(T)$.

Анализ данных *(см. рис. 2)* показывает, что при температуре T^* толщины слоев битума на минеральном компоненте имеют отрицательные значения. Это свидетельствует о том, что на поверхности исследуемых минеральных компонентов не образуется адсорбционного слоя битума значимой (определимой реологическим методом) толщины.

Сопоставление полученных данных с теоретическими результатами [17, 18] подтверждает хорошую сходимость и воспроизводимость предлагаемой методики определения толщины структурированного битума и физико-химической активности минерального компонента.

Для изучения возможной фрактальной структуры образованного межфазного слоя использовали метод анализа самоподобных структур, который применим для размеров порядка ангстрем и выше, и заключается в определении зависимости некоторого свойства $L(\varepsilon)$ от геометрического параметра ε:

$$L(\varepsilon) \sim \varepsilon^D, \quad (8)$$

где D — размерность фрактала.

В логарифмической системе координат зависимость $L(\varepsilon)$ от ε представляет прямую, тангенс угла наклона которой дает значение фрактальной размерности [19]. Подобный подход используется для расчета размерности многих самоподобных структур в различных научных областях [20].

Логарифмическая зависимость $\ln P$ предельного напряже-

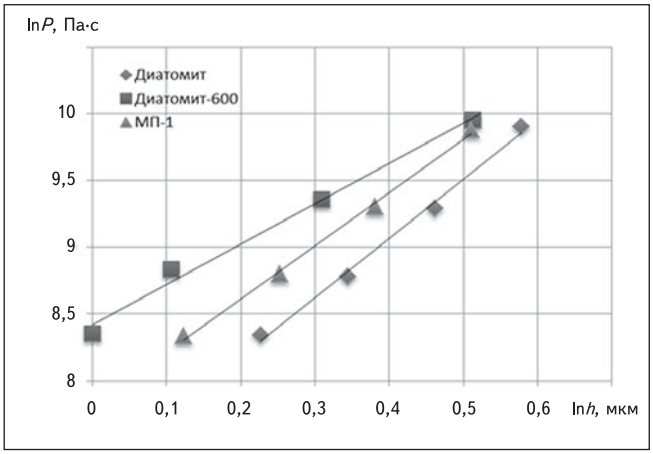


Рис. 3. ***Логарифмическая зависимость толщины межфазного слоя битума от предельного напряжения сдвига***

ния сдвига в бинарной системе «битум—минеральный наполнитель» от $\ln h$ толщины межфазного слоя приведена на *рис. 3*. Значения, полученные экспериментальным путем, укладываются на прямые $\ln P = 3{,}99 \ln h + 7{,}81$ для границы с минеральным порошком МП-1, на $\ln P = 4{,}44 \ln h + 7{,}29$ — с диатомитом и на $\ln P = 3{,}03 \ln h + 8{,}42$ — с диатомитом-600. Размерность фракталов для границы с МП-1 составляет 2,99, для границ с диатомитом и диатомитом-600 — соответственно 2,44 и 2,03.

Вывод

Проанализированы различные методы изучения параметров структуры строительных материалов с помощью фрактальных множеств. Предложен метод определения фрактальной размерности для основной структурирующей бинарной системы в асфальтобетоне «минеральный наполнитель—битумное вяжущее». Интенсивность взаимодействия межфазовых процессов оценивали по площади поверхности контакта и адсорбционной активности минерального компонента. Структурированность бинарной системы определяли по показателю сопротивления сдвиговому усилию. С помощью уравнения А. Эйнштейна рассчитана толщина адсорбционно связанной прослойки. В результате расчетов было установлено, что минеральный наполнитель из кварца характеризуется отрицательным значением толщин как адсорбционного, так и кинетического слоя во всем исследуемом диапазоне температур, что свидетельствует об отсутствии слоя битумного вяжущего на поверхности минерального компонента. Диатомиту-600 свойственна аналогичная зависимость только при температуре свыше 150 °С. Максимальную общую толщину межфазного и адсорбционного слоя имеет минеральный наполнитель из диатомита, что свидетельствует о наибольшей интенсивности происходящих процессов структурированности.

Полученные результаты с использованием метода анализа самоподобных структур свидетельствуют о том, что в начальный момент образования межфазного слоя в бинарной битумной системе его прочность характеризуется количеством адсорбирующихся молекул и их агрегатов, т. е. структура межфазного слоя проявляет фрактальные свойства. После достижения предельной толщины слоя h_{max} (более 100 мкм) его прочность определяется процессами структурирования, и представленная зависимость теряет линейность.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. *Хайтун С. Д.* От эргодической гипотезы к фрактальной картине мира. Рождение и осмысление новой парадигмы. М. : Ком Книга, 2007. 256 с.
1. Khaytun S. D. *Ot ergodicheskoy gipotezy k fraktalnoy kartine mira. Rozhdenie i osmyslenie novoy paradigmy* [From the ergodic hypothesis to the fractal picture of the world. Birth and understanding of a new paradigm]. Moscow, Kom Kniga Publ., 2007. 256 p. (In Russian).
2. *Федер Е.* Фракталы. М. : Мир, 1991. 260 с.
2. Feder E. *Fraktaly* [Fractals]. Moscow, Mir Publ., 1991. 260 p. (In Russian).
3. Фракталы в физике : Труды IV Международного симпозиума по фракталам / под ред. Л. Пьетрено, Э. Тозатти. М., 1988. 672 с.
3. *Fraktaly v fizike* [Fractals in physics]. Trudy IV Mezhdunarodnogo simpoziuma po fraktalam. Moscow, 1988. 672 p. (In Russian).
4. *Займан Дж.* Модели беспорядка. М. : Мир, 1982. 591 с.
4. Zaytman Dzh. *Modeli besporjadka* [Models of disorder]. Moscow, Mir Publ., 1982. 591 p. (In Russian).
5. Mandelbrot B. B. *The Fractal geometry nature* [Природа фрактальной геометрии]. N.Y., 1983. 327 p.
6. Фракталы в прикладной физике / под ред. А. Е. Дубнова. Арзамас, 1995. 16 с.
6. *Fraktaly v prikladnoj fizike* [Fractals in applied physics]. Arzamas, 1995. 16 p. (In Russian).
7. *Смирнов Б. М.* Физика фрактальных кластеров. М. : Наука, 1991. 160 с.
7. Smirnov B. M. *Fizika fraktal'nyh klasterov* [Physics of fractal clusters]. Moscow, Nauka Publ., 1991. 160 p. (In Russian).
8. Jelčić Ž., Ocelić Bulatović V., Rek V., Jurkaš Marković K. Relationship between fractal, viscoelastic, and aging properties of linear and radial styrene–butadiene–styrene polymer-modified bitumen [Взаимосвязь фрактальных, вязкоупругих и стареющих свойств

линейного и радиального стирол–бутадиен–стирольного полимер-модифицированного битума]. *Journal of Elastomers & Plastics*, 2016, vol. 48, no. 1, pp. 14-46.

9. Villani M. M., Scarpas A., de Bondt A., Khedoe R., Artamendi I. Application of fractal analysis for measuring the effects of rubber polishing on the friction of asphalt concrete mixtures [Применение фрактального анализа для измерения влияния полировки резины на трение асфальтобетонных смесей]. *Wear*, 2014, vol. 320, no. 1, pp. 179–188.
10. Hou Y., Sun F., Sun W., Guo M., Xing C., Wu J. Quasibrittle fracture modeling of preflawed bitumen using a diffuse interface model [Моделирование квазихрупкого разрушения предварительно расплавленного битума с использованием модели диффузной границы раздела]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, article ID 8751646. Available at: https://doi.org/10.1155/2016/8751646 (accessed 29.09.2020).
11. *Тарасевич Б. Н.* О фрактальной структуре межфазных слоев // Вестник Московского университета. Серия 2. Химия. 1998. Т. 39. № 2. С. 132–133.
11. Tarasevich B. N. On the fractal structure of interfacial layers. *Vestnik Moskovskogo universiteta, iss. 2, khimiya*, 1998, vol. 39, no. 2, pp. 132–133. (In Russian).
12. Li J., Liu Z., Li J. et al. Fractal characteristics of continental shale pores and its significance to the occurrence of shale oil in China: A case study of Biyang Depression [Фрактальные характеристики континентальных сланцевых пор и их значение для залегания сланцевой нефти в Китае: пример Биянской депрессии]. *Fractals*, 2018, vol. 26, no. 02, article ID 1840008, 11 p.
13. Garkin A. I., Daniel A., Korolev E. V. The choice of a kinetic model of degradation of composite materials. Process parameters [Выбор кинетической модели деградации композиционных материалов. Параметры технологического процесса]. *Journal Review of Industrial and Applied Mathematics*, 2008, vol. 15, no. 3, pp. 459–460.
14. *Бахрах Г. С.* К оценке толщины адсорбционно-сольватного слоя битумов на поверхности частиц // Коллоидный журнал. 1969. Т. 39. № 1. С. 8–12.
14. Bachrach G. S. To estimate the thickness of the adsorption-solvate layer of bitumen on the surface of the particles. *Kolloidnyy zhurnal*, 1969, vol. 39, no. 1, pp. 8–12. (In Russian).
15. *Иноземцев С. С., Поздняков М. К., Королев Е. В.* Исследование адсорбционно-сольватного слоя битума на поверхности минерального порошка // Вестник МГСУ. 2012. № 11. С. 159–167.
15. Inozemtsev S. S., Pozdnyakov M. K., Korolev E. V. Investigation of the adsorption-solvate layer of bitumen on the surface of mineral powder. *Vestnik MGSU*, 2012, no. 11, pp. 159–167. (In Russian).
16. Shekhovtsova S. Yu., Korolev E. V., Inozemtcev S. S. et al. Method of forecasting the strength and thermal sensitive asphalt concrete [Метод прогнозирования прочности и термочувствительности асфальтобетона]. *Magazine of Civil Engineering*, 2019, vol. 89, iss. 5, pp. 129–140.
17. Vysotskaya M. A., Shekhovtsova S. Yu. The application of nanostructured modifier additives based on zeolitebearing tuffs in asphalt [Применение наноструктурированных модифицирующих добавок на основе цеолитсодержащих туфов в асфальтобетоне]. *Materials Science Forum*, 2020, no. 974 MSF, pp. 471–476.
18. *Гезенцвей Л. Б.* Асфальтовый бетон из активированных минеральных материалов. М. : Стройиздат. 1971. 255 с.
18. Gezentsvey L. B. *Asfal'tovyy beton iz aktivirovannykh mineral'nykh materialov* [Asphalt concrete made of activated mineral materials]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1971. 255 p. (In Russian).
19. *Иванова В. С., Бапанкин В. С., Бунин И. Ж., Оксогоев А. А.* Синергетика и фракталы в материаловедении. М. : Наука, 1994. 384 с.
19. Ivanova V. S., Bapankin V. S., Bunin I. Zh., Oksogoev A. A. *Sinergetika i fraktaly v materialovedenii* [Synergetics and fractals in materials science]. Moscow, Nauka Publ., 1994. 384 p. (In Russian).
20. Pan Y., Li J., Yang T. et al. Optimization of gradation design of recycled asphalt mixtures based on fractal and Mohr-Coulomb theories [Оптимизация градационного проектирования переработанных асфальтобетонных смесей на основе фрактальной и мор-кулоновской теорий]. *Construction and Building Materials*, 2020, vol. 248, no. 11864.

Для цитирования: *Шеховцова С. Ю., Королев Е. В.* Исследование фрактальной структуры межфазного слоя битума на поверхности минерального порошка // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 12. С. 86–92. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.12.86-92.

For citation: Shekhovtsova S. Yu., Korolev E. V. Research of the Fractal Structure of the Interfacial Layer of Bitumen on the Surface of Mineral Powder. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2020, no. 12, pp. 86–92. (In Russian). DOI: 10.33622/0869-7019.2020.12.86-92.

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ! С ПОЛНЫМИ ТЕКСТАМИ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ **«ПРОМЫШЛЕННОЕ И ГРАЖДАНСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО»** в 2009–2019 гг., МОЖНО ОЗНАКОМИТЬСЯ НА САЙТЕ ЖУРНАЛА: **PGS1923.RU** В РАЗДЕЛЕ «АРХИВ».