

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2024-90-7-40-47>

## ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ АСФАЛЬТОБЕТОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕНТГЕНОВСКОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

© Степан Владимирович Ломов\*, Андрей Игоревич Морковкин

Сколковский институт науки и технологий, Центр добычи углеводородов, Россия, 121205, Москва, Большой бульвар, д. 30, стр. 1; \*e-mail: S.Lomov@skoltech.ru

*Статья поступила 15 декабря 2023 г. Поступила после доработки 17 декабря 2023 г.  
Принята к публикации 23 апреля 2024 г.*

В рамках проекта по утилизации полимерных композиционных материалов с волоконным армированием (стеклопластика) при производстве асфальтобетона разработан механический цифровой двойник образца материала — механическая конечно-элементная модель. В работе представлены результаты исследования микроструктуры асфальтобетона и расчета его эффективных механических параметров с использованием методов рентгеновской микрокомпьютерной томографии (КТ). Представлена последовательность обработки данных для создания цифрового двойника микроструктуры асфальтобетона на основе КТ-изображения, включающая следующие этапы: 1) предварительная обработка; 2) сегментация изображения; 3) анализ морфологии пор и твердых частиц; 4) преобразование сегментированного изображения в модель конечных элементов (КЭ) на основе вокселей. Показано, что разрешения КТ-изображения в 40 мкм достаточно для надежной идентификации параметров микроструктуры асфальтобетона: объемных долей фракций, распределения размеров, формы и положения пор, размеров измельченных хрупких добавок (крошки стеклопластика). КЭ-модель — цифровой двойник материала — после задания характеристик составляющих материала может применяться для моделирования термомеханических и функциональных свойств. Моделирование проиллюстрировано для расчета статистики модулей сжатия и сдвига асфальтобетона с добавлением крошки стеклопластика. Проведен анализ зависимости расчетных упругих характеристик от размера цифрового двойника. Выявлено, что при размере более 10 мм репрезентативность микроструктуры материала достаточна для расчета гомогенизированных свойств. Полученные результаты могут быть использованы для анализа микроструктуры и структурно-зависимых термомеханических свойств асфальтобетонов, предложенная КЭ-модель — для расчета вязкоупругого поведения асфальтобетона и циклических нагрузок.

**Ключевые слова:** асфальтобетон; цифровой двойник; микрокомпьютерная томография.

## STUDY OF THE MICROSTRUCTURE OF ASPHALT CONCRETE USING X-RAY COMPUTED TOMOGRAPHY

© Stepan V. Lomov\*, Andrey I. Morkovkin

Skolkovo Institute of Science and Technology, Center for Petroleum Science and Engineering, 30, str. 1, Bolshoy bulvar, Moscow, 121205, Russia; \*e-mail: S.Lomov@skoltech.ru

*Received December 15, 2023. Revised December 17, 2023. Accepted April 23, 2024.*

A mechanical digital twin (a mechanical finite-element model) of an asphalt concrete sample has been developed in the framework of a project for recycling polymer composite materials with fibrous reinforcement (fiberglass) as an alternative for crushed stone in the asphalt concrete production. A methodology of using X-ray computed tomography (XCT) for analysis of the asphalt concrete microstructure and calculation of the mechanical properties is developed. The data processing chain for developing a digital twin of the asphalt concrete microstructure, based on X-ray micro-computed tomography (XCT) image includes the following steps: 1) image enhancement; 2) image segmentation; 3) analysis of the morphology of pores and solid particles; 4) transformation of the segmented image into a voxels-based finite element (FE) model. It is demonstrated that the XCT resolution of 40  $\mu\text{m}$  is sufficient for a reliable identification of microstructural parameters, i.e., volume fractions of the components, distributions of voids (pores) in size, shape and spatial position, as well as distributions of the crushed brittle additives (fiberglass chips) in size. The FE model constitutes a digital twin of the material, and, after specifying the characteristics of the material components, can be used for simulation of the thermomechanical and functional properties of the material. The developed procedure is exemplified in the calculation of statistics of the compression and shear moduli of the asphalt concrete with addition of crushed fiberglass particles. The dependence of the

calculated elastic properties on the size of the digital twin is studied. It is shown that a model size of 10 mm and more is sufficient for the microstructural representativity and calculation of the homogenization characteristics. The results can be used for analysis of the microstructure and structure-dependent thermomechanical properties of asphalt concrete. The developed finite element model can be used for modelling of the visco-elastic response of asphalt concrete and its behavior under cyclic loading.

**Keywords:** asphalt concrete; digital twin; micro-computed tomography.

Введение

Один из возможных подходов при утилизации дробленых отработавших полимерных композиционных материалов с волоконным армированием и термореактивным связующим, в частности угле- и стеклопластиков, — утилизация их в асфальтобетоне в виде крошки. Для оценки поведения модифицированного таким образом асфальтобетона в различных условиях нагружения необходимы исследование микроструктуры материала и создание его механического цифрового двойника — механической конечно-элементной (КЭ) модели микроструктуры. Такая модель позволяет проводить виртуальные механические испытания (статическое, циклическое, динамическое нагружения, ползучесть и др.), конструировать на основе их результатов состав материала и планировать натурные эксперименты [1, 2].

Исследовать и количественно оценить микроструктуру материалов можно методами рентгеновской микрокомпьютерной томографии (КТ) [3, 4]. При этом для создания цифровых двойников материалов важна возможность преобразования КТ-изображений в КЭ-модели.

В современных 3D КЭ-моделях на основе КТ в основном используют тетраэдрические сетки, соответствующие форме микроструктурных составляющих (наполнителя, битума, пустот), или сетки воксельного типа [5 – 10]. Первые (конформные сетки) приводят к очень большому количеству элементов вследствие необходимости представления тонких объемов битума или мас-

тики между частицами наполнителя. Вторые (сетки воксельного типа) не отражают точно границы фаз, но имеют преимущества простой и вычислительно экономичной структуры КЭ, обладают хорошей репрезентативностью гомогенизированного поведения и, в определенной степени, локальных полей напряжений-деформаций. Отметим, что под гомогенизированным поведением (свойствами, параметрами) понимается механическое поведение материала, рассматриваемого как сплошная среда (без выделения компонент микроструктуры), т.е. поведение, измеряемое при испытании макрообразца материала.

Цель работы — анализ микроструктуры асфальтобетона и расчет его эффективных механических параметров с использованием рентгеновской микрокомпьютерной томографии.

Материалы, методика, оборудование

Данные для создания цифрового двойника микроструктуры асфальтобетона, начиная с КТ-изображения и заканчивая КЭ-моделью в программе Abaqus, обрабатывали с использованием инструментов обработки КТ-изображений (программы Fiji (ImageJ) и VoxTex) [11 – 14]. Структура обработки приведена в табл. 1.

При моделировании использовали образец асфальтобетона с добавками измельченного стеклопластика с волоконным армированием. Окончательную КЭ-модель проверяли, сравнивая ее с экспериментальными результатами.

Таблица 1. Структура обработки данных

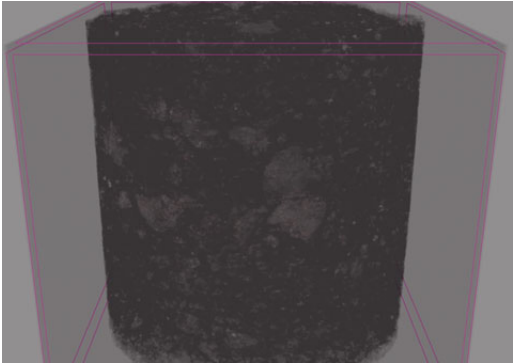
Table 1. Structure of data processing

| Шаг | Процедура                                                                                                    | Результат                                                            |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| 1   | Получение КТ-изображения                                                                                     | Набор несжатых файлов .tiff                                          |
| 2   | Начальная обработка: выделение исследуемого объема, подгонка диапазона значений серого                       | Набор файлов .tiff, проект VoxTex                                    |
| 3   | Определение порогов сегментации                                                                              | Пороги сегментации                                                   |
| 4   | Анализ пустот и добавок                                                                                      | Статистика пустот и добавок (распределение объемов, размеров и форм) |
| 5   | Создание воксельной модели                                                                                   | Воксельная модель                                                    |
| 6   | Настройка порогов и сегментация воксельной модели                                                            | Сегментированная воксельная модель                                   |
| 7   | Присвоение свойств материала компонентам                                                                     | Свойства материалов                                                  |
| 8   | Создание входного файла КЭ (определены материалы и граничные условия)                                        | .inp файл Abaqus                                                     |
| 9   | Обработка модели в Abaqus: чтение .inp файла, корректировка граничных условий, запуск решения, постобработка | КЭ-модель, гомогенизированные механические свойства                  |

Таблица 2. Состав образца асфальтобетона  
Table 2. Composition of the asphalt concrete sample

| Компонент           |                 | % масс. | % об. |    |
|---------------------|-----------------|---------|-------|----|
| Гравий              | 10 – 15 мм      | 35      | 33    | 83 |
|                     | 5 – 10 мм       | 15      | 14    |    |
|                     | 3 – 5 мм        | 10      | 9     |    |
|                     | 0,63 – 3 мм     | 15      | 14    |    |
| Песок               | 0,315 – 0,63 мм | 15      | 14    | 17 |
| Минеральный порошок | менее 0,071 мм  | 5       | 5     |    |
| Битум               | БНД 60/90       | 5       | 12    |    |
| Стеклопластик       | добавка к смеси | 2       | 2     |    |

Таблица 3. Параметры КТ-сканирования и сканированное изображение  
Table 3. Parameters of CT-scanning and scanned image

| Параметр                           | Значение               | Изображение                                                                         |
|------------------------------------|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Увеличение                         | ×5                     |  |
| Размер вокселя                     | 40 мкм                 |                                                                                     |
| Количество срезов                  | 1875                   |                                                                                     |
| Размер среза                       | 2024 × 2024            |                                                                                     |
| Время экспонирования               | 500 мс                 |                                                                                     |
| Количество проекций для усреднения | 3                      |                                                                                     |
| Напряжение                         | 100 кВ                 |                                                                                     |
| Ток                                | 300 мкА                |                                                                                     |
| Режим сканирования                 | Helix                  |                                                                                     |
| Время сканирования                 | 1 ч 40 мин             |                                                                                     |
| Размер 3D-изображения              | 2024 × 2024 × 1875     |                                                                                     |
| Тип файлов                         | tiff, 16 bit, несжатое |                                                                                     |

В табл. 2 представлен состав образца. Объемные доли компонентов определяли по следующим значениям плотностей, г/см<sup>3</sup>: гравий, песок, минеральный порошок — 2,5; битум — 1,0; стеклопластик — 2,0 (без учета пустот). Отметим, что поскольку битум и минеральный порошок смешиваются в связующее (мастику), отдельные фракции на КТ-изображении не разделяются.

Крошку стеклопластика получали путем дробления детали из стекловолокна или эпоксидной смолы. Использовали измельченные фракции, размеры которых соответствовали ситам, применяемым для заполнителей: 1) длина — 5 – 10, диаметр — 0,071 – 0,315 мм (1 %); 2) длина — 10 – 15, диаметр — 0,315 – 0,63 мм (1 %).

Образцы готовили следующим образом:

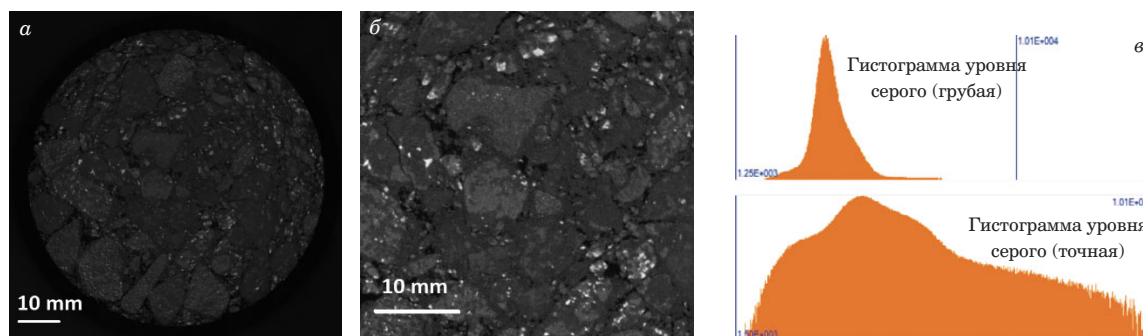
- термостабилизация гравия и песка при 160 °С в течение 12 ч (установка Olab Clarity 136, Россия);
- термостабилизация битума при 150 °С в течение 2 ч (установка PL-HR-saracity, Россия);
- смешивание заполнителей при 150 °С в течение 10 мин (установка ЛС-АБ-10, Россия);
- внесение битума в заполнители и перемешивание при 150 °С в течение 30 мин с постепенным добавлением минерального порошка (установка ЛС-АБ-10, Россия);

- уплотнение смеси в цилиндрические формы (установка ЛО-257, Россия) внутренним диаметром 71,5 мм на виброплатформе СМЖ-538 (Россия) в течение 3 мин;
- прессование образцов в формах под давлением 20 МПа в течение 3 мин на гидравлическом прессе ГХП-10 (Россия);
- охлаждение и выемка из формы.

Размер образцов (диаметр и высота — 71,5 мм), используемых в исследовании, соответствовал действующим требованиям (ГОСТ 9128) [15]. Сканирование проводили с помощью XCT System v|tome|x L240. Параметры КТ-сканирования и сканированное изображение приведены в табл. 3.

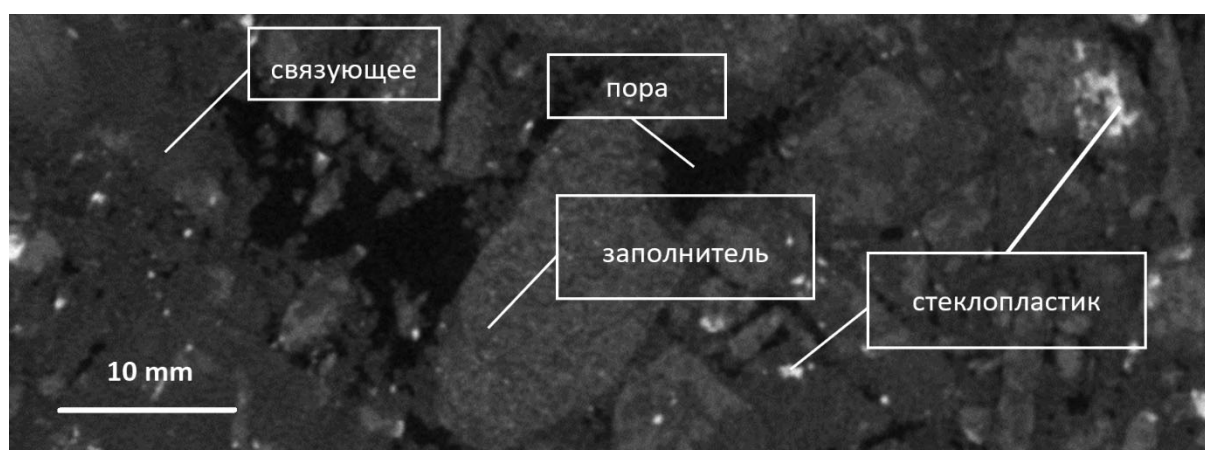
Обработка изображения (рис. 1) включала обрезку исходного изображения (2024 × 2024 × 1875 вокселей) до размера 1000 × 1000 × 1000 вокселей (40 × 40 × 40 мм) (программа Fiji) и настройку диапазона серого (программа VoxTex). Фильтрация изображения не требовалась. Компоненты, входящие в состав материала и видимые на изображении, показаны на рис. 2.

Пороги шкалы серого для сегментации выбирали с использованием инструментов программы Fiji. Для каждого из компонентов (см. рис. 2) определяли область изображения, полностью им



**Рис. 1.** Исходное изображение (а), изображение после обрезки и настройки шкалы серого (б), гистограммы (грубая и точная) уровня серого в линейном и логарифмическом масштабах (в)

**Fig. 1.** The original image (a), the image after cropping and adjusting the gray scale (b), the histogram (rough and fine) of the gray level in linear and logarithmic scales (c)



**Рис. 2.** Компоненты, видимые на КТ-снимке

**Fig. 2.** Components visible on a CT image

покрытую, и исследовали гистограмму шкалы серого. При этом за пороги сегментации принимали границы диапазонов шкалы.

Гистограммы для связующего и заполнителя перекрывались, поэтому границу между ними скорректировали таким образом, чтобы объемные доли компонентов соответствовали значениям, приведенным в табл. 2.

Для компонентов приняли следующие диапазоны серой шкалы: поры — 0–60, связующее — 61–72, заполнитель — 73–130, стеклопластик — 131–255.

### Обсуждение результатов

**Анализ пор и крошки стеклопластика.** Результаты анализа пор, выполненного с использованием функций VoxTex, приведены на рис. 3, 4. Общая пористость составила ~1,5 %, общий объем пор в образце (40 × 40 × 40 мм) — ~1 см<sup>3</sup>. Форму пор оценивали путем подгонки размеров эллипсоидов с осями  $a_1 \leq a_2 \leq a_3$  к объему поры неправильной формы (при равенстве объемов эллипсоида и поры). Все поры компактные (сред-

нее удлинение  $a_3/a_1$  — 1,85), можно выделить мелкую и крупную фракции объемами менее 1 и более 1 мм<sup>3</sup> соответственно.

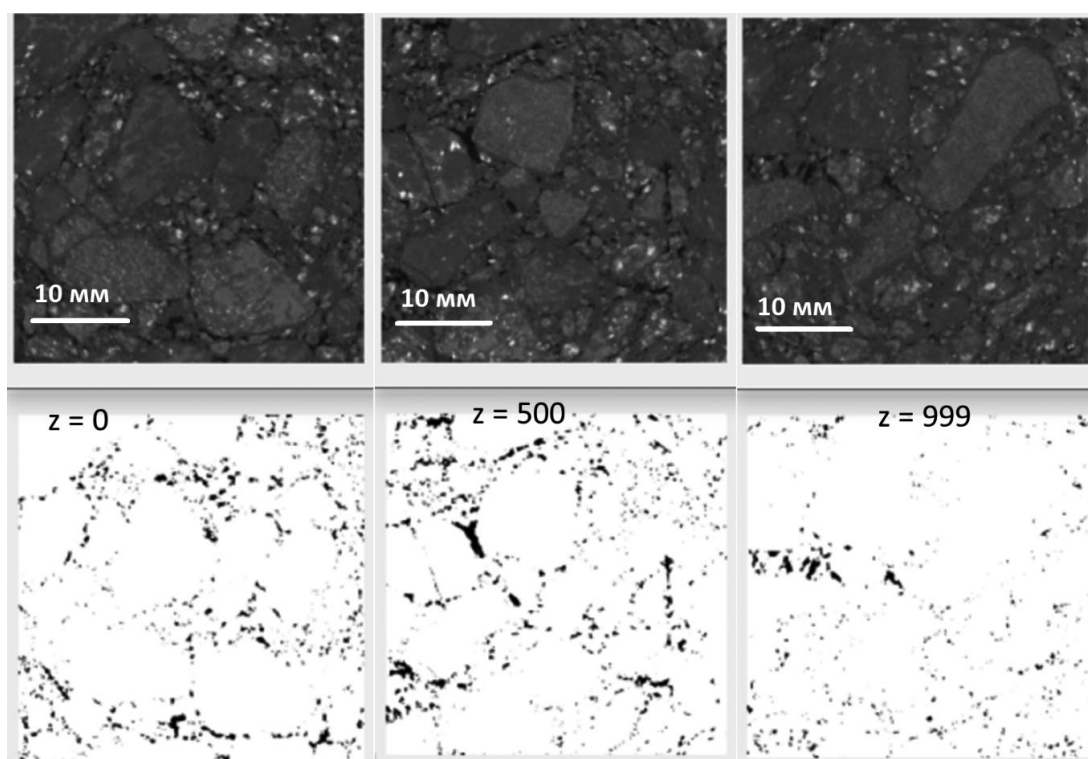
Частицы стеклопластика при добавлении в смесь имели длину 5–15 мм, объем — 1–5 мм<sup>3</sup> и удлинение (отношение длины к ширине) — 10–30. Объемы и форму частиц анализировали следующим образом: в результате сегментации крошки стеклопластика (видимой в виде белых частиц) строили эллипсоиды эквивалентного объема для идентифицированных отдельных объектов. Получили, что общая объемная доля стеклопластика — 1,54 %.

КТ-изображения показывают, что крошка стеклопластика в процессе производства интенсивно разрушается. Вытянутые, волокнистые частицы при смешивании превращаются в компактные короткие частицы.

Удлинение (рис. 5) рассчитывали по формуле

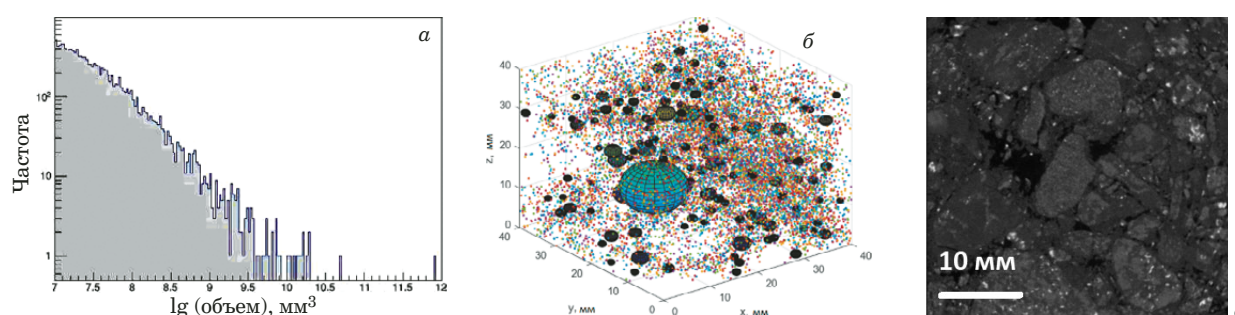
$$\lambda = \frac{a_3}{\sqrt{a_1 a_2}},$$

где  $a_1 \leq a_2 \leq a_3$  — оси эллипсоида.



**Рис. 3.** Сегментированная пористость в трех сечениях образца (координата  $z$  в пикселях)

**Fig. 3.** Segmented porosity in three sections of the sample ( $z$  coordinate in pixels)



**Рис. 4.** Распределение объема пор (логарифмические координаты) (а), пространственное распределение пор (б) (поры объемом более  $1 \text{ мм}^3$  показаны эллипсоидами эквивалентного объема, более мелкие поры объемом  $0,01 - 1 \text{ мм}^3$  — точками, поры размером менее  $0,01 \text{ мм}^3$  не показаны), сечение по самой крупной поре (объем  $\sim 1000 \text{ мм}^3$ ) (в)

**Fig. 4.** Pore volume distribution (logarithmic coordinates) (a), spatial distribution of pores (b) (pores with a volume of more than  $1 \text{ мм}^3$  are shown as ellipsoids of equivalent volume, smaller pores with a volume  $0.01 - 1 \text{ мм}^3$  are shown as dots, pores smaller than  $0.01 \text{ мм}^3$  are not shown), cross section at the position of the largest pore (volume  $\sim 1000 \text{ мм}^3$ ) (c)

Отметим, что такое дробление крошки сильно снижает армирующую способность добавки стеклопластика [16].

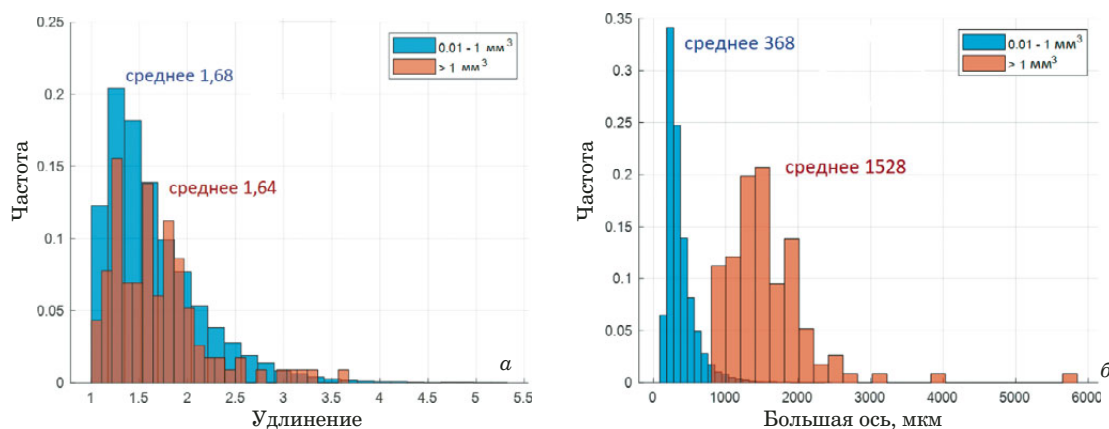
**КЭ-модель.** КТ-изображение преобразовывали в КЭ-модель с использованием программы VoxTex.

Сначала создавали воксельную модель объема. Пиксели — объемные элементы исходного изображения — агрегировались в воксели (массивы  $5 \times 5 \times 5$  пикселей размером  $0,2 \times 0,2 \times 0,2 \text{ мм}$ ). Затем исходный объем  $1000 \times 1000 \times 1000$  пикселей преобразовывали в массив  $200 \times 200 \times 200$  вокселей. Вокселям присваивали средний уровень шкалы серого, что позволяло сег-

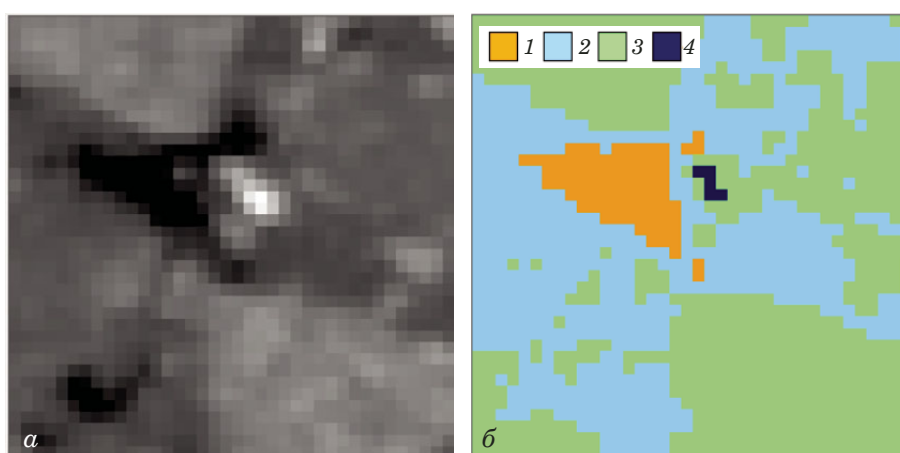
ментировать изображение в соответствии с пороговыми значениями интенсивности. Во время этого процесса воксели определенным образом классифицировали (на пустоты, связующее, заполнитель или стеклопластик в соответствии с уровнем серой шкалы вокселей).

На рис. 6 приведена сегментация КТ-изображения для фрагмента ( $5 \times 5 \times 5 \text{ мм}$ ) полного объема (сечение в центре фрагмента).

Воксельную модель преобразовывали в конечные элементы. В табл. 4 приведены модули Юнга и коэффициенты Пуассона, присвоенные компонентам [17, 18]. Отметим, что свойства связующего (мастики) достаточно неопределенны.



**Рис. 5.** Распределение параметров частиц стеклопластика:  $a$  — удлинение;  $b$  — большая ось эквивалентного эллипсоида  
**Fig. 5.** Distribution of the parameters of fiberglass particles:  $a$  — elongation;  $b$  — major axis of the equivalent ellipsoid



**Рис. 6.** Сегментация КТ-изображения:  $a$  — воксельная модель;  $b$  — сегментированное изображение (1 — пустоты; 2 — связующее; 3 — наполнитель; 4 — частицы стеклопластика)  
**Fig. 6.** CT image segmentation:  $a$  — voxel model;  $b$  — segmented image (1 — voids; 2 — binder; 3 — filler; 4 — fiberglass particles)

Для исследования влияния величины жесткости связующего выбрали диапазон 0,1 – 1 ГПа.

Частицы стеклопластика — трансверсально-изотропный материал, его упругие параметры оценивали по микромеханическим формулам [19]. Ориентацию главной оси анизотропии для каждой частицы стеклопластика выбирали случайным образом, так как они измельчались до «крошек» с малым удлинением.

*Расчеты механических характеристик.* С использованием КЭ-модели рассчитывали модули Юнга и сдвига асфальтобетона (программа Abaqus). Приняли следующие упрощенные граничные условия:

модуль Юнга — средняя деформация растяжения  $\varepsilon = 1\%$ ; при нагрузке в направлении  $x$  перемещения двух противоположных  $X$ -граней составляют  $U_X = 0$  и  $U_X = -X\varepsilon$ ; остальные компоненты смещения и грани свободны; модуль Юнга рассчитывали как  $E_x = \langle \sigma_x \rangle / \varepsilon$ ;

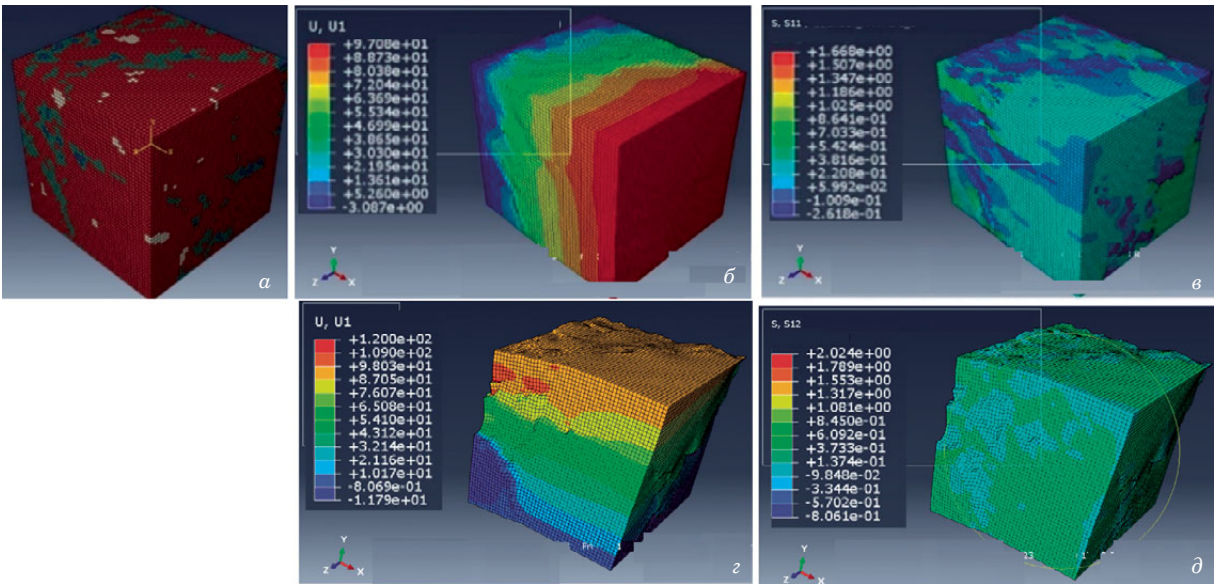
модуль сдвига — средняя деформация сдвига  $\gamma = 1\%$ ; для  $xu$ -сдвига смещения двух противоположных  $X$ -граней составляют  $U_Y = 0$  и  $U_Y = X\gamma/2$ , смещение двух противоположных  $Y$ -граней —  $U_X = 0$  и  $U_X = Y\gamma/2$ ; остальные компоненты перемещения и грани свободны; модуль сдвига рассчитывали как  $G_{xy} = \langle \tau_{xy} \rangle / \gamma$ .

Для одной КЭ-модели расчеты можно проводить по трем направлениям, что дает три значения модулей Юнга и сдвига для материала, близкого к изотропному.

Расчеты проводили следующим образом:

размер объема 1 см — на трех субобъемах с растягивающей нагрузкой в направлениях  $x$ ,  $y$ ,  $z$  и сдвигом в направлениях  $xu$ ,  $xz$ ,  $yz$ , что дает девять значений модулей Юнга и сдвига;

размер объема 1,5 и 2 см — по одному субобъему с растягивающей нагрузкой в направлениях  $x$ ,  $y$ ,  $z$  и сдвигом в направлениях  $xu$ ,  $xz$ ,  $yz$ , что дает три значения модулей Юнга и сдвига.



**Рис. 7.** Распределение материалов (а), растяжение в направлении X (б, в), сдвиг XY (з, д)  
**Fig. 7.** Distribution of materials (a), stretching in X direction (b, c), XY shift (d, e)

На рис. 7 представлены результаты расчетов (программа Abaqus, модель 10 мм). Отметим следующие особенности полей перемещений и напряжений:

- неоднородность перемещений — следствие неоднородности материала и наличия мягких зон в объеме;
- соответствующая неоднородность напряжений;
- искажения формы объема, особенно при сдвиге.

На рис. 8 суммированы расчетные модули упругости (модули растяжения ( $E$ ) и сдвига ( $G$ )) для трех случаев размера модели (в каждом случае рассчитывали три направления нагрузки, а для моделей 10 мм — три варианта объема).

Диапазон расчетных значений  $E \sim 1$  ГПа соответствовал ранее полученным данным экспериментов и моделирования (модуль Юнга матрицы — 0,5 – 1,0 ГПа, содержание матрицы — 3 – 6 %). Рассчитанный модуль асфальтобетона лежал в диапазоне 0,5 – 2,0 ГПа [20]. Результаты

моделирования соответствовали по порядку величины диапазону экспериментально наблюдаемых значений. Отклонения вызваны учетом таких факторов, как трение между крупными агрегатами и отсутствие связи между ними [20]. Данные факторы также играют роль в настоящих расчетах методом КЭ. Это позволяет предположить, что результаты (см. рис. 8) следует рассматривать как верхнюю оценку свойств.

Вариабельность рассчитанных модулей (см. рис. 8):

разброс значений модулей для модели меньшего размера (10 мм) выше, что и ожидалось;

эффективные модули незначительно меняются с размером модели; можно предположить, что даже при размере 10 мм репрезентативность микроструктуры материала достаточна для расчета гомогенизированных характеристик;

изменение модуля связующего в диапазоне 0,1 – 1 ГПа дает разницу модулей упругости около 20 %.

**Таблица 4.** Модуль Юнга и коэффициент Пуассона компонентов  
**Table 4.** Young’s modulus and Poisson’s ratio of components

| Компонент              |                                 | Модуль Юнга, ГПа                                                                                                            | Коэффициент Пуассона |
|------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Заполнитель            |                                 | 40                                                                                                                          | 0,2                  |
| Связующее              |                                 | 0,1 – 1,0                                                                                                                   | 0,25                 |
| Частицы стеклопластика | Эпоксидная смола                | 3                                                                                                                           | 0,4                  |
|                        | Стекловолокно                   | 70                                                                                                                          | 0,25                 |
|                        | Композит (поперечная изотропия) | $E_1 = 37,50; E_2 = E_3 = 9,31$<br>$\nu_{12} = \nu_{13} = 0,33; \nu_{23} = 0,39$<br>$G_{12} = G_{13} = 3,36; G_{23} = 3,36$ |                      |
| Поры                   |                                 | 0,001                                                                                                                       | 0,3                  |

## Заключение

Таким образом, на основе КТ-изображений с использованием существующих методов их обработки предложен подход для создания цифрового двойника микроструктуры асфальтобетона. Показано, что разрешения КТ-изображения в 40 мкм достаточно для надежной идентификации параметров микроструктуры. Исследование пор и твердых (стекловолоконистых) добавок позволяет проанализировать их объемную долю, пространственное распределение и распределение размеров. Так, выявлено, что добавка стеклопластика при перемешивании измельчается в компактные неудлиненные частицы. Получаемые значения модулей упругости и сдвига соответствуют литературным данным.

Разработанная методика может быть использована для анализа микроструктуры и структурно-зависимых термомеханических характеристик асфальтобетонов, КЭ-модель — для расчета вязкоупругого поведения асфальтобетона и циклических нагрузок.

## Финансирование

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда и г. Москвы (№ 22-23-20170, <https://rscf.ru/project/22-23-20170>).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

1. Chen J., Zhang L., Du Y., et al. Three-dimensional microstructure based model for evaluating the coefficient of thermal expansion and contraction of asphalt concrete / *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 284. P. 122764. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122764
2. Wang L., Yao Y., Li J., Tao Y., et al. Review of visualization technique and its application of road aggregates based on morphological features / *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. P. 10571. DOI: 10.3390/app122010571
3. Wevers M., Nicolai B., Verboven P., et al. Applications of CT for non-destructive testing and materials characterization / *Industrial X-Ray Computed Tomography*. 2018. P. 267 – 331. DOI: 10.1007/978-3-319-59573-3\_8
4. Erpalov A. V., Khoroshevskiy K. A., Gadolina I. V. Actual problems of creating digital twins of machine engineering products in terms of durability assessment / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2023. Vol. 89. P. 67 – 75 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2023-89-8-67-75
5. Coleri E., Harvey J., Yang K., et al. Development of a micromechanical finite element model from computed tomography images for shear modulus simulation of asphalt mixtures / *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 30. P. 783 – 93. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.071
6. Shakiba M., Darabi M., Abu Al-Rub R., et al. Three-dimensional microstructural modelling of coupled moisture-mechanical response of asphalt concrete / *Int. J. Pavement Engineering*. 2015. Vol. 16. P. 445 – 466. DOI: 10.1080/10298436.2015.1007239
7. Handle F., Füssl J., Neudl S., et al. Understanding the microstructure of bitumen: A CLSM and fluorescence approach to model bitumen ageing behavior / *Asphalt Pavements*. — CRC Press, 2014. DOI: 10.1201/b17219-68

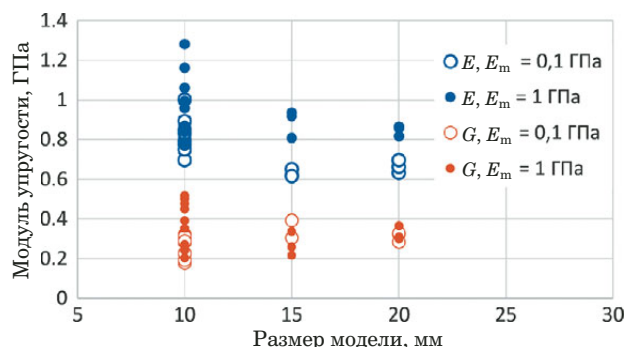


Рис. 8. Расчетные модули упругости КЭ-моделей разных размеров

Fig. 8. Calculated elastic moduli of FE models of different sizes

8. Khan R., Grenfell J., Collop A. Micromechanical modelling of typical Dense Bitumen Macadam (DBM) from laboratory testing and X-ray Computed Tomography (CT) / *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 77. P. 1 – 6. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.028
9. Hu J., Qian Z., Xue Y., Yang Y. Investigation on fracture performance of lightweight epoxy asphalt concrete based on microstructure characteristics / *J. Mater. Civil Eng.* 2016. Vol. 28. P. 04016084. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001594
10. Zhang X., Wan C., Wang D., et al. Numerical simulation of asphalt mixture based on three-dimensional heterogeneous specimen / *J. Central South Univ. Technol.* 2011. Vol. 18. P. 2201 – 2206. DOI: 10.1007/s11771-011-0963-4
11. Schindelin J., Arganda-Carreras I., Frise E., et al. Fiji: an open-source platform for biological-image analysis / *Nat. Meth.* 2012. Vol. 9. P. 676 – 682. DOI: 10.1038/nmeth.2019
12. Straumit I., Lomov S., Wevers M. Quantification of the internal structure and automatic generation of voxel models of textile composites from X-ray computed tomography data / *Composites. Part A*. 2015. Vol. 69. P. 150 – 158. DOI: 10.1016/j.compositesa.2014.11.016
13. Straumit I., Vandepitte D., Wevers M., Lomov S. Identification of the flax fibre modulus based on an impregnated quasi-unidirectional fibre bundle test and X-ray computed tomography / *Composites Sci. Technol.* 2017. Vol. 151. P. 124 – 130. DOI: 10.1016/j.compscitech.2017.07.029
14. Naouar N., Vasiukov D., Park C., et al. Meso-FE modelling of textile composites and X-ray tomography / *J. Mater. Sci.* 2020. Vol. 55. P. 16969 – 16989. DOI: 10.1007/s10853-020-05225-x
15. Botvina L. R., Shuvalov A. N., Tyutin M. R., et al. Effect of the sample size on the mechanical and acoustic characteristics of concrete / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2019. Vol. 85. N 10. P. 55 – 63 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-10-55-63
16. Piggott M. R. *Composite Mechanics. Load-Bearing Fibre Composites*. — Elsevier, 1980. DOI: 10.1016/B978-0-08-024231-6.50009-X
17. Barksdale R. D. *The Aggregates Handbook*. — Alexandria, VA; The National Stone, Sand and Gravel Association, 2013. DOI: 10.1002/9781119643098
18. Du C., Liu P., Sun Y., et al. Characterizing asphalt mixtures with random aggregate gradations based on the three-dimensional locally homogeneous model / *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2022. Vol. 37. P. 1687 – 1702. DOI: 10.1111/mice.12796
19. Chamis C. C. Simplified composite micromechanics equations for hygral thermal and mechanical properties. NASA Technical Memorandum 83320. — NASA, 1983. P. 1 – 19. DOI: 10.1177/073168448700600305
20. Li Y., Metcalf J. Two-step approach to prediction of asphalt concrete modulus from two-phase micromechanical models / *J. Mater. Civil Eng.* 2005. Vol. 17. P. 407 – 415. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2005)17:4(407)