

Распознавание образов

О проблемах при работе с микротомографическими изображениями пористых структур, используемыми для моделирования процессов протекания*

М.В. Григорьев^I, И.В. Назиров^{II}, Е.И. Могилевский^{II}, А. В. Хафизов^{II,III}, М.В. Чукалина^{III,IV}

^I Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов
Российской академии наук, г. Черноголовка, Россия

^{II} Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, г.Москва,
Россия

^{III} Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника»
Российской академии наук, г. Москва, Россия

^{IV} ООО «Смарт Энджинс Сервис», г. Москва, Россия

Аннотация. Цифровое исследование кернов, суть которого составляет потенциально возможное нахождение углеводородов в малоразмерных (микронных) порах и трещинах, занимает значимое место при поиске залежей и составлении планов разбуривания скважин. Применение томографов с высоким пространственным и временным разрешением позволяет не только получать качественно-количественные показатели проницаемости сегментов породы, но и перенести моделирование процессов, происходящих в керне, на пласт целиком. Однако проведение исследований такого рода сопряжено с рядом трудностей. В данной работе рассматриваются в деталях две задачи, с которыми сталкиваются исследователи. Первая – моделирование протекания жидкости через систему капилляров, которой аппроксимируется пористая структура, и вторая – бинаризация серых томографических изображений для использования цифрового бинарного изображения структуры в модельных экспериментах. В рамках первой задачи проанализировано влияние структуры и размера расчетной сетки на скорость и качество моделирования течений. Для проведения моделирования структура, через которую она протекает, должна быть задана как бинарная, а результат компьютерной томографии – это цифровое 3D изображение, представленное в градациях серого и содержащее искажения. Источниками искажений является не только шум, обусловленный аппаратной частью томографического комплекса, но и артефакты реконструкции (влияние программной части комплекса). Обсуждаются результаты сравнительного анализа трех методов бинаризации с использованием модельных томографических цифровых изображений.

Ключевые слова: моделирование, подъем несжимаемой жидкости, структура и размер расчетной сетки, томографические изображения пористых структур, метод Оцу.

DOI: 10.14357/20790279210110

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований РФФИ (гранты № 18-29-26019 и 18-29-26036) в части математического моделирования и при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках государственного задания Федерального научно-исследовательского центра «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук в части томографических измерений.

Введение

Для изучения нефтенасыщенности пластов, исследования свойств создаваемых фильтров [1,2] и оптимизации процессов сбора углеводородов одним из ключевых методов является моделирование фильтрации вязкой жидкости через пористую среду. Часто для описания движения жидкости используют закон Дарси [3], который постулирует пропорциональность локального градиента давления и потока жидкости. Причем коэффициент пропорциональности зависит от вязкости жидкости и параметров пористой среды (коэффициента проницаемости), в частности, от геометрии пор внутри материала [4]. Расчет коэффициента проницаемости по интегральным характеристикам образца, например, через его пористость с помощью уравнения Козени-Кармана [5], дает удовлетворительную точность только в случае однородных пород, однако часто порождает значительную ошибку (на порядки величин) для пород с трещинами. Точное значение коэффициента проницаемости может быть получено исходя из знания полной геометрии образца, которое можно найти, например, в результате томографии. При этом для решения задач о вытеснении одной жидкости другой, определении устойчивости тех или иных режимов течения уже необходимо применение времяразрешающей (4D) томографии.

Существующие методы 4D томографии требуют мощных синхротронных источников, а временное разрешение достигается регистрацией серии квазистатических томограмм, при этом исследуемый образец вращается со скоростью до 150 оборотов в секунду, что принципиально меняет картину течения за счет действия центробежной силы. При медленном вращении образца необходимо учитывать изменение положения жидкости, которое произошло за время между последовательными кадрами. Результаты численного моделирования течения жидкости являются опорной точкой для восстановления нестационарной картины течения и могут служить для верификации алгоритмов 4D реконструкции.

Для проведения модельных расчетов протекания несжимаемых жидкостей в пористых средах среда должна быть представлена как бинарное цифровое изображение. Однако результатом томографической реконструкции является цифровое изображение томографируемого объекта в тонах серого [6]. В результате применения пороговой обработки к такому изображению, когда порог выставляется на основе визуальной оценки серого изображения, получаемое бинарное изображение имеет случайное качество. Это является неприемлемым фактом для проведения моделирования про-

цесса протекания. Возникает вопрос: какой метод выбрать? К сожалению, ответить на этот вопрос заранее, «без примерки» практически невозможно. Методы, прекрасно работающие на одних наборах данных [7], могут оказаться полностью неприменимыми для других [8]. В связи с этим, во второй части работы мы приводим результаты сравнения нескольких методов бинаризации цифровых изображений пористых структур. Сравнение проводилось с использованием изображений фантомов (искусственно сгенерированных цифровых моделей пористых структур), по которым были рассчитаны томографические проекции, затем проведена реконструкция цифровых изображений. Восстановленные цифровые серые изображения были бинаризованы с использованием нескольких подходов. Результаты их применения обсуждаются.

1. Влияние структуры и размера расчетной сетки на скорость и качество моделирования капиллярных течений

При численном моделировании пористых структур поры и каналы внутри образца можно рассматривать как совокупность капилляров. Таким образом, фундаментальным элементом задачи о расчете течения через пористый образец является задача о капиллярном подъеме жидкости. Пусть цилиндрическая трубка радиуса R погружена в жидкость, которая имеет плотность ρ , коэффициент поверхностного натяжения σ , образует с материалом трубки контактный угол θ . Жидкость поднимается за счет сил поверхностного натяжения против силы тяжести (ускорение свободного падения g). Начальная глубина погружения много меньше, чем равновесная высота капиллярного подъема ($H = \rho g R / (2\sigma \cos \theta)$), которая определяется балансом силы тяжести и поверхностного натяжения [9]. Рассматривается приближенное аналитическое решение задачи, а также проводится численное решение с помощью пакета программ OpenFOAM [10] на тетраэдрических и гексаэдрических сетках.

Аналитическое решение получается в предположениях, что течение квазистационарное, в каждый момент времени наблюдается баланс гравитационных, капиллярных и вязких (коэффициент кинематической вязкости ν) сил. Силы трения однозначно определяются значением средней по сечению скорости и радиусом трубки в соответствии с законом Пуазейля. Связь между временем t , прошедшим с начала подъема, и текущим значением высоты столба жидкости внутри трубки h дается соотношением [9]:

$$\begin{aligned}\tilde{t} &= -\tilde{h} - \ln(1 - \tilde{h}), \\ \tilde{h} &= \frac{\rho g R}{2\sigma \cos \theta} h, \quad \tilde{t} = \frac{\rho g^2 R^3}{16\theta \sigma \cos \theta} t,\end{aligned}\quad (1)$$

В пакете программ OpenFOAM – одном из наиболее распространенных инструментов для моделирования течений жидкости и газа – реализован решатель уравнений движения двухфазных сред interFoam на основе метода конечных объемов. В рамках этого метода необходима дискретизация расчетной области на ячейки, после чего для каждой ячейки записываются законы сохранения массы, импульса и, если необходимо, энергии. Шаг по времени делается на основе анализа значений искомых функций (плотности, скорости, давления) в соседних ячейках. Разные фазы разделяются с помощью индикаторной функции α от координат и времени, равной 0, если ячейка занята одной фазой (жидкостью) и 1, если другой (воздухом). Относительно индикаторной функции решается уравнение переноса. Капиллярное давление вычисляется на основе градиента индикаторной функции, значения плотности и динамической вязкости вычисляются как линейные комбинации параметров фаз с коэффициентами α и $1 - \alpha$.

Рассмотрено два способа дискретизации области: с помощью триангуляции Делоне (область разбивается на тетраэдры, при этом максимизируется минимальный угол в полученных тетраэдрах, алгоритм реализован в программе Gmesh [11]) и с помощью последовательного деления элементов сетки, состоящей из прямоугольных параллелепипедов (алгоритм snappyHexMesh пакета программ OpenFOAM). Сравниваются полученные в результате расчетов зависимости объемной доли жидкости внутри трубки от времени, объемная доля пропорциональна высоте столба.

Использовались по три сетки каждого типа, параметры которых указаны в табл. 1. Указано время в минутах, требуемое для моделирования одной секунды течения. Вычисления производились на компьютере с процессором Intel Core i5 с частотой 2.3 GHz. Физические параметры численного эксперимента: $\rho=1000\text{кг/м}^3$, $g=10\text{м/с}^2$, $R=10^{-4}\text{м}$, $\sigma=0.02\text{кг/с}^2$, $\nu=10^{-6}\text{м}^2/\text{с}$, $\theta=45^\circ$. Результаты расчетов показаны на рис. 1.

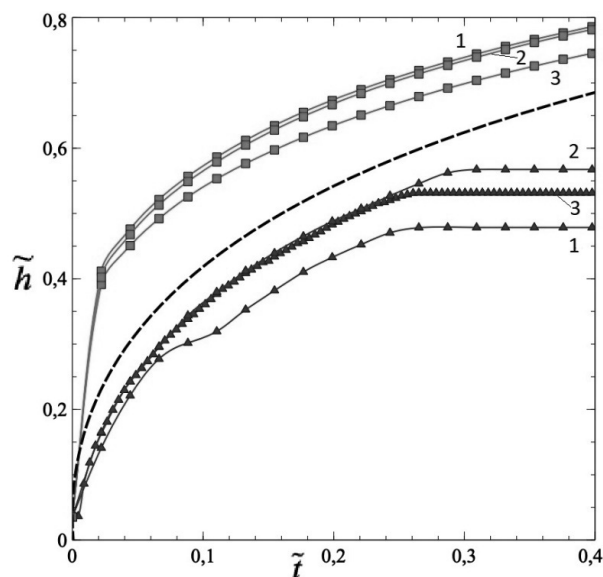


Рис. 1. Высота подъема жидкости по трубке в зависимости от времени, рассчитанная по аналитической формуле (1) в безразмерных переменных указана пунктирной линией; сплошные линии – результаты численного эксперимента с использованием триангуляции Делоне (треугольные маркеры) и гексаэдрической сетки (квадратные маркеры). Цифрами 1,2,3 отмечены результаты вычислений для сеток, соответствующих строкам таблицы

Так как при триангуляции Делоне вблизи границы области возникают тетраэдры достаточно большого размера, а значение индикаторной функции едино для каждого конкретного элемента сетки, в зависимости высоты от времени, полученной таким образом, возникают физически необоснованные резкие скачки. Кроме того, невозможность точной аппроксимации кривизны границы раздела приводит к стабилизации уровня капиллярного подъема на высоте меньшей, чем соответствует физическим параметрам. При близких значениях числа ячеек тетраэдрической и гексаэдрической расчетных сеток, построение первой занимает меньшее время, однако требует большего времени для расчетов течения. При увеличении числа ячеек сетки численное решение стремится к аналитическому решению независимо от метода построения сетки.

Табл. 1

№	Гексаэдрическая сетка		Тетраэдрическая сетка	
	количество ячеек	время расчета	количество ячеек	время расчета
1	4163	12	7524	288
2	6290	18	9856	212
3	15761	184	14603	1587

Таким образом в работе были рассмотрены разные структуры и размеры расчетной сетки для нахождения оптимального способа решения задачи о капиллярном подъеме вязкой несжимаемой жидкости по тонкой вертикальной трубке. В ходе исследования было выявлено, что гексаэдрические сетки позволяют проводить более быстрые и точные расчеты.

2. Сравнение методов бинаризации цифровых томографических изображений пористых структур

В качестве генератора модельных пористых объектов нами использовался метод *generators.blobs* из библиотеки *PoreSpy* [12,13]. В ней пространственная конфигурация пор определяется двумя параметрами: пористость и дисперсность (*blobiness*). Пористость определяется как отношение количества вокселей пор к числу вокселей всего объема изображения. Дисперсность отвечает за средние размеры пор: чем выше значение дисперсности при фиксированной пористости, тем меньше характерные размеры пор. Очевидно, что для получения фантома со структурой, близкой к рассматриваемому физическому образцу, нужно извлечь параметры пористости и дисперсности из экспериментальных данных.

Были рассмотрены следующие варианты бинаризации исходного изображения для последующего определения пористости:

1. Бинаризация Оцу (БО) без дополнительной постобработки бинарного изображения.
2. БО+: БО с последующим удалением закрытых пор (предполагаем, что в измеряемом образце их нет) и «висячих камней» [12], т.е. вокселей материала не имеющих связей с матриксом пористой структуры.
3. БО с последующими комбинациями бинарных операций размыкания $O(I)$ и замыкания $C(I)$ в [14], где I – изображение после БО. Структурные элементы, применяемые в данных операциях представлены на рис 2. В случае несимметричных структурных элементов, операции

производятся для всех возможных значений ориентации элемента в пространстве. В результате имеется множество бинаризованных изображений. За итоговое изображение, принимается медианное усреднение всех вокселей с одинаковыми координатами (индексами) для изображений из этого множества.

Применение алгоритмов 1–3 производилось не только для неотфильтрованных исходных изображений, но и после гауссовой ($\sigma=1$) и усредняющей (с ядром $3 \times 3 \times 3$ вокселей) фильтрации [14].

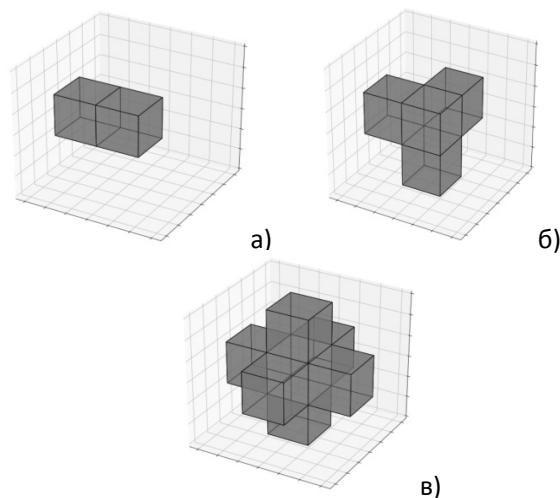


Рис. 2. Структурные элементы, использованные для операций размыкания и замыкания: би-структура (а), тетра-структура (б) и гепта-структура (в)

Численные эксперименты производились на фантомах объемом $300 \times 300 \times 300$ вокселей с пористостями $p=50, 30$ и 10% и на их модельных микротомографических реконструированных изображениях (180 углов с шагом 2°), полученных по алгоритму из [12]. Уровень шума МКТ-изображений определяется интенсивностью I_0 источника излучения (в у.е.): чем выше значение интенсивности, тем менее зашумлено изображение. Для каждого фантома были рассчитаны три эксперимента

Табл. 2

Фильтр	Параметр	БО	БО+	O(C(I))		
				тетра-структура	гепта-структура	би-структура
Без фильтра	MAPE, %	153,35	146,37	36,60	18,87	111,94
	T, с	0,77	4,07	10,09	1,87	27,62
Гаусс	MAPE, %	4,65	3,78	4,74	8,45	4,73
	tT с	3,52	6,00	11,70	4,49	25,03
Усредняющий	MAPE, %	0,74	8,67	0,23	7,13	3,75
	tT с	2,59	5,04	10,68	3,56	23,96

с $IO=1000, 1500, 3000$. Усредненные по всем полученным модельным объектам результаты работы алгоритмов представлены в табл. 2, где MAPE (mean absolute percentage error [15]) – метрика, которая показывает относительное отклонение рассчитанной пористости от пористости фантома, а T – время работы алгоритма (компьютере с процессором Intel Core i7-6500U с частотой 2.5 GHz).

Из таблицы видно, что наилучшую точность ($MAPE=0,23\%$) показывает метод определения пористости после размыкания/замыкания тетра-структурой бинаризованной картинке с предварительной фильтрацией усредняющим фильтром. Однако этот алгоритм уступает по скорости работы другим вариантам. Следующий по точности ($0,74\%$) вариант – определение пористости по обработанному усредняющим фильтром изображению с бинаризацией без постобработки. По времени работы он в 4 раза быстрее самого точного варианта, что позволяет нам предложить его, как наиболее оптимальный вариант.

Заключение

В данной статье рассмотрены два важных вопроса, с которыми приходится сталкиваться исследователям при попытке сравнить экспериментальные результаты, поступающие из томографической системы во время проведения фильтрационных экспериментов с керном, с результатами моделирования. Моделирование динамических процессов не может проводиться без учета строгих ограничений на вычислительные ресурсы и время проведения вычислений. В работе проведено исследование влияния структуры и размера расчетной сетки на скорость и качество моделирования капиллярных течений, результаты которого должны учитываться при планировании динамических экспериментов протекания несжимаемой жидкости через пористые структуры. Причем, создание бинарного представления самой такой структуры из восстановленного цифрового томографического серого изображения реальной структуры является нетривиальной задачей, о чем свидетельствуют представленные во второй части статьи результаты.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований РФФИ (гранты № 18-29-26019 и 18-29-26036) в части математического моделирования и при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках государственного задания Федерального научно-исследовательского центра «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук в части томографических измерений.

Литература

1. *Анализ пористой структуры* на основе адсорбционных данных / Н. Н. Гаврилова, В. В. Назаров. М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева. 2015. 132 с.
2. *Казанский Н.Л., Мурзин С.П., Трегуб В.И., Меженин А.В.* Применение фокусаторов излучения при формировании нанопористых структур твердокристаллических материалов // Компьютерная оптика. 2007, Т. 2, № 31, С. 48-51.
3. *Динамика многофазных сред.* Нигматулин Р.И. Часть 2 - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. 1987. 360 с.
4. *Хейфец А.Л.* 3D модели и алгоритмы компьютерной параметризации при решении задач конструктивной геометрии (на некоторых исторических примерах) // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2016. Т. 16. № 2. С. 24-42.
5. *Маскет М.* Течение однородных жидкостей в пористой среде. - М.-Ижевск: Ин-т комп. исследований. 2004. 628 с.
6. *Чукалина М.В., Бузмаков А.В., Ингачева А.С., Поволоцкий М.А., Шабельникова Я.Л., Асадчиков В.Е., Букреева И., Николаев Д.П.* Анализ результатов томографической реконструкции с сильнопоглощающими включениями по проекциям, собранным в полихроматических условиях // Информационные технологии и вычислительные системы. 2020. №3. С.49-61.
7. *Поволоцкий М.А., Кузнецова Е.Г., Уткин Н.В., Николаев Д.П.* Сегментация регистрационных номеров автомобилей с применением алгоритма динамической трансформации временной оси. // Сенсорные системы. 2018. Т. 32. № 1. С. 50-59.
8. *Grigoriev Maxim, Buzmakov Alexey, Uvarov Valerii, Ingacheva Anastasiya, Shvets Eugenii.* Segmentation criteria in the problem of porosity determination based on CT scans // Proceedings Volume 11433, Twelfth International Conference on Machine Vision (ICMV 2019); 114331E (2020).
9. *Fries N., Dreyer M.* Dimensionless scaling methods for capillary rise /Journal of Colloid and Interface Science. 2009. V. 338. P. 514–518.
10. *Official home of The Open Source Computational Fluid Dynamics Toolbox Openfoam* <https://www.openfoam.com/> Просмотрено: 04.11.2020.
11. *Official home of the open source 3D finite element mesh generator Gmsh* <https://gmsh.info/> Просмотрено: 04.11.2020.
12. *Grigoriev M., Khafizov A.V. et al.* Robust Technique for Representative Volume Element Identification in Noisy Microtomography Images of

- Porous Materials Based on Pores Morphology and Their Spatial Distribution // The 13-th International Conference on Machine Vision (ICMV 2020), International Society for Optics and Photonics. <http://arxiv.org/abs/2007.03035>.
13. *Gostick J., Khan Z.A., Tranter T.G. et al.* PoreSpy: A Python Toolkit for Quantitative Analysis of Porous Media Images // Journal of Open Source Software. 2019. V. 4(37). P. 1296.
14. *Gonzalez R., Woods R.* Digital Image Processing / Upper Saddle River – N.J.: Prentice Hall. 2002. 1192 p.
15. *De Myttenaere A., Golden B., Le Grand B., Rossi F.* Mean absolute percentage error for regression models. Neurocomputing. 2016. Jun 5;192:38-48.

Григорьев Максим Валентинович. Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов Российской академии наук, Московская область, г. Черноголовка. Научный сотрудник. Кандидат физико-математических наук. Количество печатных трудов: 63. Область научных интересов: рентгеновская оптика, рентгеновская томография. E-mail: grimax@iptm.ru

Назиров Исмаил Видади оглы. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва. Студент. Область научных интересов: капиллярная гидродинамика. E-mail: nazirovi.v@gmail.com

Могилевский Евгений Ильич. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва. Кандидат физико-математических наук. Доцент. Количество печатных трудов: 32. Область научных интересов: течения вязкой жидкости со свободной границей. E-mail: Evgeny.mogilevskiy@math.msu.ru

Чукалина Марина Валерьевна. Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук, г. Москва. Старший научный сотрудник. Кандидат физико-математических наук. Количество печатных трудов: 163. Область научных интересов: прямые и обратные задачи в микроскопии и томографии. E-mail: chukalinamarina@gmail.com

Хафизов Анвар Валиевич. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва. Магистрант. Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук, г. Москва. Инженер-исследователь. Количество публикаций: 4. Область научных интересов: рентгеновский имиджинг, анализ данных, компьютерное зрение. E-mail: Khafizov.A@crys.ras.ru

Using microtomographic images of porous structures to simulate flow processes: arising problems

M.V. Grigoriev^I, I.V. Nazirov^{II}, E.I. Mogilevskiy^{III}, A.V. Khafizov^{II,III}, M.V. Chukalina^{III,IV}

^I Institute of Microelectronics Technology and High-Purity Materials of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russia

^{II} Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

^{III} Federal Research Center “Crystallography and photonics” of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^{IV} Smart Engines Services LLC, Moscow, Russia

Abstract: Digital core study, the essence of which is the potential for finding hydrocarbons in small-sized (micron) pores and fractures, takes an important place in the search for deposits and drawing up plans for drilling wells.

Keywords: modelling, information systems development, human factor, Human Reliability Assessment, reliability, human error probabilities

DOI: 10.14357/20790279210110

References

1. *Analysis of the porous structure on the basis of adsorption data.* / N. N. Gavrilova, V. V. Nazarov. M.: D. I. Mendeleev Russian State Technical University, 2015 – 132 p. – (in Russian).
2. *Kazanskiy N.L.* Application of focusators for the forming nanoporous structures of solidcrystalline materials / N.L. Kazansky, S.P. Murzin, V.I. Tregub, A.V. Mezhenin // *Computer Optics.* – 2007. – Vol. 31, No. 2. – pp. 48-51. – (in Russian).
3. *Dynamics of multiphase media.* / Nigmatulin R. I. Part 2-M.: Nauka. Phys.-mat. lit., 1987. – 360 p. – (in Russian).
4. *Kheifets A.L.* 3D models and algorithms of computer parametrization in solving problems of constructive geometry (on some historical examples) / *Bulletin of the South Ural State University. A series “Computer technologies, management, radio electronics (Chelyabinsk: Publishing house of SUSU) – 2016. – Vol. 2 – pp 24–42.*
5. *Masket M.* Flow of homogeneous liquids in a porous medium. - M.-Izhevsk: In-t comp. research, 2004. 628 p.
6. *Chukalina M.V., Buzmakov A.V., Ingacheva A.S., Povolotsky M.A., Shabelnikova Ya.L., Asadchikov V.E., Bukreeva I., Nikolaev D.P.* Analysis of the results of tomographic reconstructed images with highly absorbing inclusions from projections collected under polychromatic conditions. // *Information technologies and computing systems* 2020, №3, P.49-61.
7. *Povolotsky M.A., Kuznetsova E.G., Utkin N.V., Nikolaev D.P.* Segmentation of car registration numbers using the algorithm of dynamic transformation of the time axis. // *Sensor systems.* 2018, Vol. 32, № 1. P. 50-59.
8. *Grigoriev Maxim, Buzmakov Alexey, Uvarov Valerii, Ingacheva Anastasiya, Shvets Eugenii.* Segmentation criteria in the problem of porosity determination based on CT scans // *Proceedings Volume 11433, Twelfth International Conference on Machine Vision (ICMV 2019); 114331E (2020).*
9. *Fries N., Dreyer M.* Dimensionless scaling methods for capillary rise / *Journal of Colloid and Interface Science* V. 338. 2009. P. 514–518.
10. *Official home of The Open Source Computational Fluid Dynamics Toolbox Openfoam* <https://www.openfoam.com/> Просмотров: 04.11.2020
11. *Official home of the open source 3D finite element mesh generator Gmsh* <https://gmsh.info/> Просмотров: 04.11.2020
12. *Grigoriev M., Khafizov A.V. et al.* Robust Technique for Representative Volume Element Identification in Noisy Microtomography Images of Porous Materials Based on Pores Morphology and Their Spatial Distribution // *The 13-th International Conference on Machine Vision (ICMV 2020), International Society for Optics and Photonics.* <http://arxiv.org/abs/2007.03035>.
13. *Gostick J., Khan Z.A., Tranter T.G. et al.* PoreSpy: A Python Toolkit for Quantitative Analysis of Porous Media Images // *Journal of Open Source Software.* 2019. V. 4(37). P. 1296. DOI: 10.5281/zenodo.2633284.
14. *Gonzalez R., Woods R.* Digital Image Processing / Upper Saddle River – N.J.: Prentice Hall, 2002. 1192 p. ISBN:978-0-13-168728-8.
15. *De Myttenaere A., Golden B., Le Grand B., Rossi F.* Mean absolute percentage error for regression models. *Neurocomputing.* 2016 Jun 5;192:38-48.

Grigoriev M.V. Research fellow at IMT RAS. 142432, Russia, Moscow Region, Chernogolovka, ul. Academician Osipyan, d. 6. PhD in Phys.-Math. Number of publications: 63. Research interests: x-ray optics, x-ray tomography. E-mail: grimax@iptm.ru

Nazirov I.V. Student, Faculty of Mechanics and Mathematics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Leninskie gory, 1. Number of publications: 0. Research interests: capillary hydrodynamics. E-mail: nazirovi.v@gmail.com

Mogilevskiy E.I. Associate professor, Faculty of Mechanics and Mathematics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Leninskie gory, 1, PhD in Phys.-Math. Number of publications: 32. Research interests: viscous liquid flows with free boundaries. E-mail: Evgeny.mogilevskiy@math.msu.ru

Chukalina M.V. Senior researcher, FSRC Crystallography and photonics RAS. Moscow, Leninskii pr., 59. PhD in Phys.-Math. Number of publications: 163. Research interests: direct and inverse problems in microscopy and tomography. E-mail: chukalinamarina@gmail.com

Khafizov A.V. Got bachelor degree in NRNU MEPhI in 2020, majoring in Materials Science and Engineering. Currently is Master student in Lomonosov Moscow State University (Department of Solid State Physics) and also works as the engineer-researcher at the IC FSRC “Crystallography and Photonics” RAS. Number of publications: 4. Research interests are X-ray imaging, Data Science, Computer Vision. Email: Khafizov.A@crys.ras.ru