

Изучение пористости частиц проппанта путём анализа его микротомографического изображения

Е.П. Серкова^{1,2}, И.В. Якимчук², И.В. Сафонов²

¹Московский научно-исследовательский центр Шлюмберже, Пудовкина 13, Москва, Россия, 119285

²МГУ им. М.В.Ломоносова, Ленинские горы 1, Москва, Россия, 119991

Аннотация. Проппант – гранулообразный материал с типичным размером от 0,2 до 1,2 мм. Этот материал широко используется в нефтяной и газовой промышленности с целью предотвращения смыкания трещин в скважине, образованных вследствие применения технологии гидравлического разрыва пласта. Проппант с заданными наперед свойствами (размером, формой, плотностью) изготавливают из технической керамики методом спекания. Однако наличие пустот внутри частиц, возникающих при изготовлении, приводит к снижению их прочностных характеристик, что может негативно сказаться на эффективной проводимости проппантной пачки в трещине.

Одним из способов детального изучения связи внутренней пористой структуры частицы с её прочностными свойствами является метод рентгеновской микротомографии, который позволяет наблюдать эту структуру без ее разрушения.

В данной работе представлены методы цифрового анализа трехмерных микротомографических изображений, позволяющие измерить пористость и степень неоднородности её распределения внутри частиц проппанта. Автоматическая пороговая бинаризация применяется для первичного разделения порового и твердого пространства. Для разделения соприкасающихся частиц применяется маркерный метод сегментации по водоразделам. В работе представлены методы, характеризующие однородность радиального и послойного распределения пористости. Корректность методов была проверена на синтетических моделях. Полученные на данный момент результаты свидетельствуют о вероятной зависимости прочностных свойств проппанта от внутренней пористости, однако не подтверждают наличия связи прочности с неоднородностью распределения пор.

1. Введение

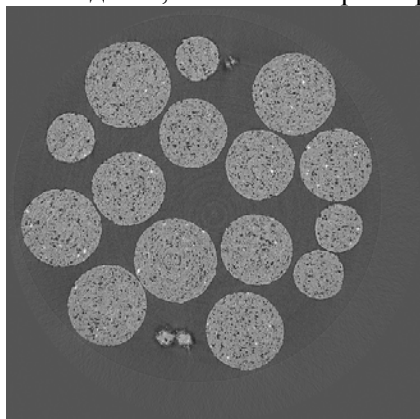
В настоящее время в нефтедобывающей промышленности с целью интенсификации нефтеотдачи месторождения активно используется технология гидроразрыва пласта. Этот метод заключается в создании трещин в горных породах под действием подаваемой в них под давлением жидкости. Вместе с жидкостью в скважину закачивают гранулированный материал (расклинивающий агент или проппант), который расклинивает трещину и тем самым предотвращает ее смыкание.

Гранулы проппанта обычно близки по форме к сферам с типичным диаметром от 0.2 до 1.2 мм. Наиболее дешевым и широко применяемым типом проппанта является песок. В ряде случаев выгодным представляется использование проппантов с повышенной относительно природного песка прочностью зерен, либо пониженной плотности. Такие типы проппанта изготавливают методами, аналогичными используемым при создании пористой технической

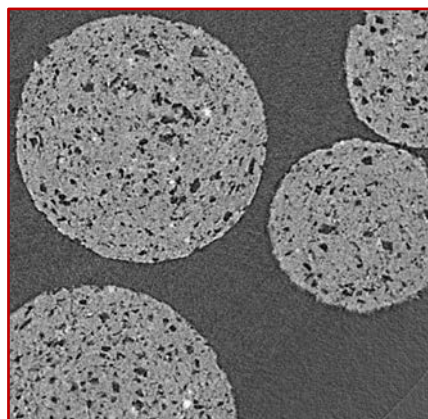
керамики из сырья содержащего оксид алюминия. Пористость частицы проппанта в данной работе понимается как безразмерная величина от 0 до 1, равная отношению суммарного объема пор (пустот) данной частицы ко всему её объему. Однако наличие пустот внутри частиц приводит к снижению их прочностных характеристик, что может негативно сказаться на эффективной проводимости проппантной пачки в трещине. Для детального изучения связи внутренней пористой структуры частицы с её прочностными свойствами необходимо применение методов интроскопии, позволяющих наблюдать эту структуру. Одним из таких методов является рентгеновская микротомография. Суть метода заключается в том, что объект подвергается рентгеновскому облучению с разных сторон, а его двумерные проекции регистрируются на детекторе. Далее на выходе алгоритма реконструкции теневых проекций получается трехмерное изображение.

В данном эксперименте образец поворачивался вокруг вертикальной оси в диапазоне $0^\circ - 180^\circ$ с шагом в 0.1° . Для каждого угла поворота детектор с размером 4000×2096 пикселей регистрировал теневую проекцию образца. Такие параметры детектора позволяют получить размер вокселя равный 1.33 микрона на реконструированном трехмерном изображении. На выходе алгоритма реконструкции собранных теневых проекций получается изображение I (см. рисунок 1) с такими характеристиками:

Размер изображения:	$4000 \times 4000 \times \sim 2000$ вокселей
Размер вокселя:	$1.33 \text{ мкм} \times 1.33 \text{ мкм} \times 1.33 \text{ мкм}$
Память на диске, занимаемая двумерным срезом:	8 MB
Память на диске, занимаемая трехмерным изображением:	15.6 GB



(a)



(б)

Рисунок 1. (а) Слой реконструированного 3D изображения и (б) его фрагмент.

Традиционно при анализе пористости с помощью обработки изображений рассматривают общую пористость, распределение пор по размерам [1] и топологию пустотного пространства, например, в виде сетей пор [2]. Однако, на прочностные свойства проппанта может влиять не только его суммарная объемная пористость, но также и однородность распределения пор внутри отдельной частицы. Для проверки этой гипотезы необходимо исследовать пустоты и однородность их распределения внутри пористого керамического проппанта.

В данной работе предлагаются метрики для анализа равномерности радиального и послойного распределения пор, вычисляемые путем цифрового анализа восстановленных трехмерных микротомографических изображений. Причины выбора именно такой геометрии заключаются в следующем. Технология изготовления керамического проппанта основана на послойном наращивании тела частицы, что делает вероятным радиальные вариации структурных свойств, включая пористость. Интерес к послойному анализу обусловлен желанием оценить корректность применения методов двумерной микроскопии для определения пористости частицы проппанта.

Предлагаемый цифровой анализ включает в себя следующие шаги:

1. Выделение частиц и внутренних пустот на трехмерном изображении

2. Разделение соприкасающихся частиц и присвоение уникального номера каждой частице (индивидуальный анализ)
3. Подсчет и анализ радиального распределения пористости
4. Подсчет и анализ послойного распределения пористости

2. Сегментация микротомографического изображения

Особенность микротомографии состоит в том, что плотные тела поглощают рентгеновское излучение сильнее, чем воздух. Именно поэтому на изображении **I** наблюдается резкий контраст между керамическим пространством и пустотами. В связи с этим простейшим методом, дающим приемлемые результаты выделения частиц на изображении, является метод пороговой бинаризации[3]. Результатом работы алгоритма бинаризации является изображение **I_B**, на котором значение '0' имеют воксели пустотного пространства, а значение '1' – твердого (см. рисунок 2(а)).

Можно заметить, что на исходном изображении частицы касаются друг друга. Для решения задачи маркировки соприкасающихся частиц был выбран метод маркерного водораздела[4]. Алгоритм применяется к изображению **I_B** с 'залитыми' внутренними порами. Результатом работы алгоритма водораздела является изображение, на котором в местах касания двух или более частиц появляется граница – воксели со значением '0'. Области внутри частиц с 'залитыми' внутренними порами маркируются уникальными значениями (см. рисунок 2(б)).

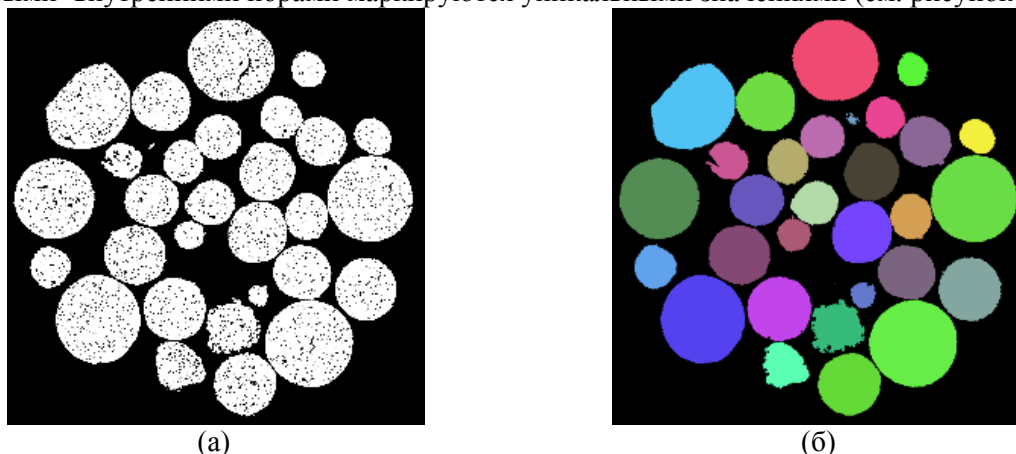


Рисунок 2. (а) результат пороговой бинаризации микротомографического изображения (б) результат работы алгоритма маркерного водораздела с последующей маркировкой частиц.

3. Характеристики пористости на трехмерном изображении

3.1. Виды пористости

Частицы проппанта являются пористыми, причем в зависимости от связи с внешним пустотным пространством поры подразделяют на открытые и закрытые [5]. Пора называется открытой, если она связана с внешним пустотным пространством. И наоборот, пора называется закрытой, если она не связана с фоном. В свою очередь, открытые поры подразделяются на сквозные и тупиковые [5]. Тупиковая пора сообщается только с одной поверхностью тела, заполняется жидкостью или газом при фильтрации, но не влияет на проницаемость пористого материала. Суммарная пористость включает в себя закрытые и открытые поры.

Морфологические операции используются для получения изображений пор разного типа [6].

Изображение **I_{CP}**, содержащее только закрытые поры, может быть получено по формуле(1).

$$I_{CP} = I_{3Dh} - I, \quad (1)$$

где **I**- исходное изображение, **I_{3Dh}** –результат применения алгоритма 'заливки' внутренних порк **I**.

Изображение I_{TP} , содержащее как открытые, так и закрытые поры может быть получено по формуле (2).

$$I_{TP} = I_{2Dh} - I, \quad (2)$$

где I – исходное изображение, I_{2Dh} – результат применения алгоритма ‘заливки’ внутренних пор каждому двумерному слою изображения I .

Изображение I_{OP} , содержащее только открытые поры может быть получено по формуле (3).

$$I_{OP} = I_{TP} - I_{CP} \quad (3)$$

Для того, чтобы классифицировать каждую открытую пору на сквозную или тупиковую, можно применить следующий алгоритм:

1. Пусть I_{OPi} – изображение i -ой связной области в I_{OP}
2. Пусть D_{OPi} – результат дилатации I_{OPi}
3. Найдем связные области на изображении $(D_{OPi} - I_{OPi}) \text{ AND } (\text{NOT } I)$
4. В случае тупиковой поры связная область будет одна

Предлагаемый ниже алгоритм оценки равномерности распределения может быть применен при исследовании всех типов пористости.

Чтобы уменьшить время работы алгоритма, изображение I_B уменьшается в 4 раза методом трехмерного усреднения. Размер уменьшенного изображения $I_D \sim 1000 \times 1000 \times 500$ вокселей. Выполнение следующих шагов приводит к сохранению суммарного объема пустотного пространства при уменьшении разрешения:

1. Каждый воксель на изображении I_B умножается на 100 (I_{100}).
2. Изображение I_{100} уменьшается в 4 раза методом трехмерного усреднения.

Значения вокселей на уменьшенном изображении I_D принадлежат множеству $\{(i/64) \times 100, i \in [0, 64], i - \text{целое число}\}$. По формуле (4) изображение I_D переводится в массив весов.

$$W = \frac{100 - I_D}{100} \quad (4)$$

После такого преобразования воксель на изображении I_D со значением ‘0’ (абсолютно пустой) получает значение ‘1’ в массиве весов; воксель со значением ‘100’ получает значение ‘0’ (абсолютно не пустой); воксели со значениями между ‘0’ и ‘100’ получают значение объемной доли пористости.

В таких обозначениях пористость ϕ области A может быть посчитана по формуле (5)

$$\phi_A = \frac{\sum_A W}{V_A}, \quad (5)$$

где V_A – объем области A .

3.2. Радиальное распределение пористости

Вопрос о распределении пустотного пространства внутри пористых объектов возникает при анализе различных материалов. Например, в статье [7] предлагается алгоритм анализа неоднородности распределения пористости вдоль вертикальной и горизонтальной осей образца асфальта. Пористость V_i считается в M сечениях образца, а индексы неоднородности $HI_{Lat, Ver}$ считаются по формуле (6).

$$HI_{Lat, Ver} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left| \frac{V_i - V_{Avg}}{V_{Avg}} \right| \quad (6)$$

Индексы неоднородности $HI_{Lat, Ver}$ отражают отклонение распределения пустот от среднего значения V_{Avg} . Таким образом, большие значения $HI_{Lat, Ver}$ указывают на высокий уровень неоднородности, нулевое значение индекса возможно только в однородном случае.

В данной работе предлагается мера, которая в отличие от $HI_{Lat, Ver}$ определяет не только степень неоднородности распределения пор внутри объекта, а также «направление дисбаланса» пористости.

Для подсчета радиального распределения пористости каждая частица делится на две области равного объема А и В, как показано на рисунке 3.

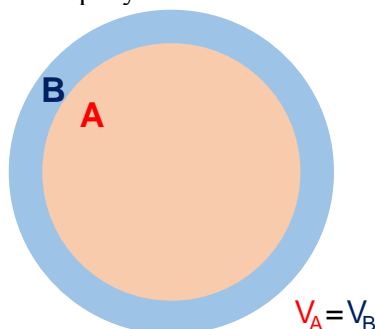


Рисунок 3. Схема деления частицы на шар А и толстую оболочку В равных объемов.

Пористость внутри каждой толстой оболочки (ϕ_A и ϕ_B) считается по формуле (5). Под радиальной неоднородностью пористости понимается величина баланса между ϕ_A и ϕ_B . Для получения относительной оценки баланса производятся преобразования (7), (8).

$$\phi_{\Sigma} = \frac{V_A^{(void)} + V_B^{(void)}}{V_{\Sigma}} = \frac{V_A^{(void)} + V_B^{(void)}}{V_A + V_B} = \frac{V_A^{(void)}}{2V_A} + \frac{V_B^{(void)}}{2V_B} = \frac{\phi_A + \phi_B}{2} \quad (7)$$

$$\phi_B(\phi_A) = 2\phi_{\Sigma} - \phi_A \quad (8)$$

Введем понятие нормализованной пористости $\psi_x = \phi_x / 2\phi_{\Sigma}$, и тогда (8) примет вид (9).

$$\psi_B(\psi_A) = 1 - \psi_A \quad (9)$$

На рисунке 4 представлены зависимости $\phi_B(\phi_A)$ и $\psi_B(\psi_A)$, измеренные при анализе исходного изображения I.

Обе зависимости на рисунке 4 являются информативными. Расстояние от точки до зеленой линии на обоих графиках соответствует степени неоднородности частицы. Чем дальше точка от зеленой линии – тем выше неоднородность. «Направление дисбаланса» пористости определяется принадлежностью точки одной из полуплоскостей (А – под зеленой линией, В – над зеленой линией). Если красная точка принадлежит области А, то соответствующая ей частица более пористая в центре.

Введем числовой параметр $\alpha = 2\psi_A - 1$, который описывает значения неоднородности распределения пористости. Все возможные значения α лежат в интервале $[-1, 1]$. Значение ‘-1’ соответствует случаю, когда вся пористость сосредоточена в толстой оболочке В, ‘0’ – однородный случай, ‘1’ – вся пористость в области А.

3.3. Послойное распределение пористости

При анализе послойного распределения пористости частица делится на две полусферы, как показано на рисунке 5, причем плоскость сечения проводится так, чтобы контраст значений пористости между областями А и В был максимальный. За вектор нормали такой плоскости достаточно принять вектор, который соединяет центр масс анализируемой частицы и центр масс этой же частицы, но с «залитыми» внутренними порами.

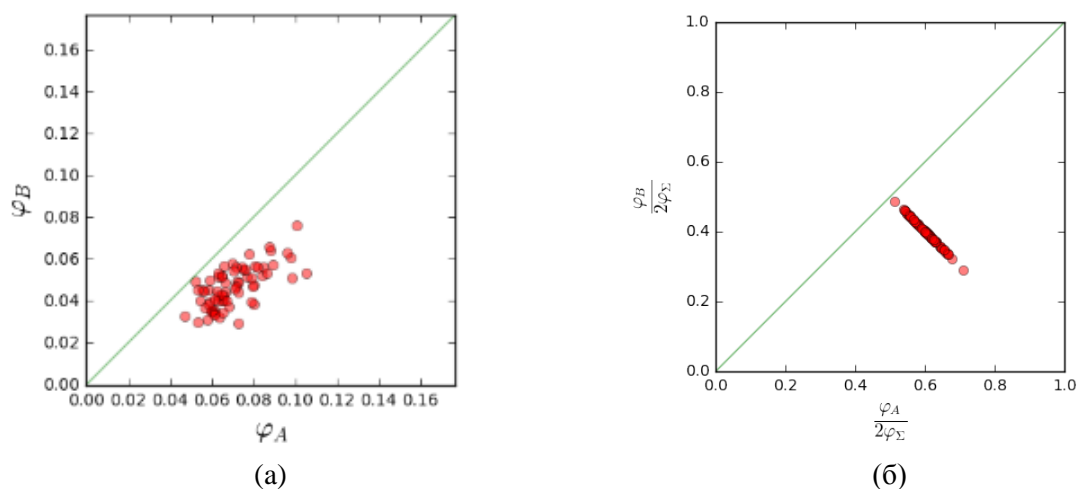


Рисунок 4. (а) График зависимости пористости внутренней оболочки φ_A и внешней оболочки φ_B ; (б) – зависимость после нормализации. Зеленая линия соответствует идеальному однородному распределению пористости частицы. Одна красная точка на графике соответствует одной частице.

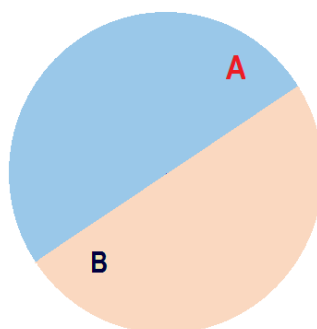
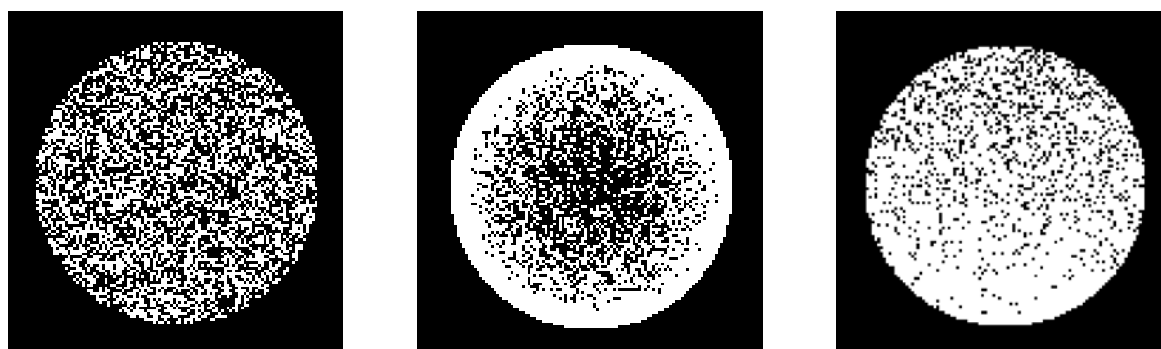


Рисунок 5. Схема деления частицы на две полусферы.

Все рассуждения, проведенные для анализеоднородности радиального распределения пористости справедливы и для послойного анализа. Введенные величины тестируются на трех сферических трехмерных модельных объектах (см. рисунок 6), распределение пористости внутри которых заранее известно.

1. Пористость распределена однородно и равна 0.5.
2. Пористость распределена радиально от 0.8 до 0.
3. Пористость распределена по вертикальной оси с линейным изменением от 0 до 0.3.

На рисунке 7 представлена зависимость $\psi_B(\psi_A)$ для трех модельных объектов. Каждому модельному объекту соответствуют две точки на графике: координаты одной точки получены при радиальном анализе, другой - при послойном. Расстояние от точки до зеленой линии характеризует степень неоднородности распределения пористости при соответствующем анализе. А принадлежность точки одной из полуплоскостей относительно зеленой линии характеризует 'направление' неоднородности. Как и предполагалось, точки, соответствующие радиальному и послойному распределению для модели 1, послойному распределению для модели 2, а также радиальному распределению для модели 3, лежат на зеленой прямой, что соответствует однородному случаю. Значение параметра α для этих распределений равно 0. Радиальный анализ модели 2 выявил особенность распределения пористости должным образом: пористость распределена неоднородно, причем в центральной части ее значение больше, чем на периферии.



Модель 1 Модель 2 Модель 3
Рисунок 6. Модельные объекты для тестирования меры неоднородности.

Для модели 3 неоднородность выявлена при послойном анализе распределения пористости, что также соответствует действительности.

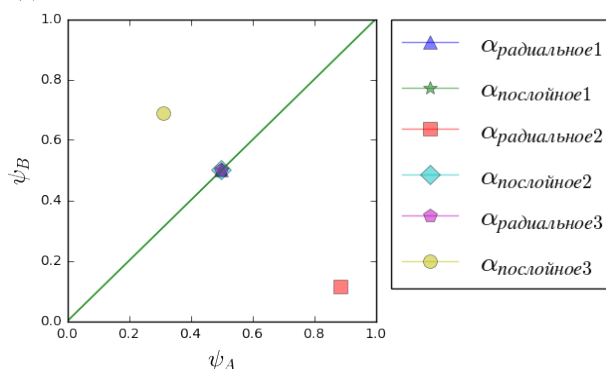


Рисунок 7. Оценка неоднородности пористости модельных объектов.

4. Численные эксперименты

На основе приведенных выше рассуждений был создан алгоритм, который в зависимости от типа анализа неоднородности (радиального или послойного) делит частицу на две толстые оболочки или полусферы, подсчитывает пористость φ внутри каждой и выдает как оценку неоднородности, так и ошибку этой оценки. Был проведен ряд экспериментов для исследования различных свойств полученных зависимостей.

4.1. Эксперимент 1

Частицы проппанта на томографическом изображении могут иметь различный размер. Следовательно, необходимо исследовать поведение алгоритма при анализе объектов разного размера. Для этого создается набор модельных объектов: сферы с различными радиусами из множества $\{10, 20, 45, 60, 85, 100, 120\}$, где 100 вокселей – типичный радиус частицы проппанта. Значения пористостей делятся на три класса: низкая 0-5%, средняя 5-15% и высокая 15-30%. Пористость внутри каждой сферы задается случайным образом так, что φ_A и φ_B имеют все возможные комбинации низкой, средней и высокой пористостей (9 комбинаций для каждой частицы).

Для каждой сферы вычисляются два значения меры неоднородности: α_{expected} и $\alpha_{\text{calculated}}$, где α_{expected} считается по заданным φ_A и φ_B , а $\alpha_{\text{calculated}}$ – результат работы алгоритма. Далее считается величина $\Delta\alpha = |\alpha_{\text{expected}} - \alpha_{\text{calculated}}|$, и строится зависимость этой величины от радиуса модельной сферы.

На рисунке 8 представлена получившаяся зависимость. Как и предполагалось, при достаточно малых объемах величина ошибка подсчета меры неоднородности $\Delta\alpha$ является достаточно большой, а при увеличении радиуса объекта $\Delta\alpha$ стремится к нулю.

В случае послойного анализа для каждой частицы генерируется дополнительно набор случайных векторов, которые задают плоскость сечения между областями А и В.

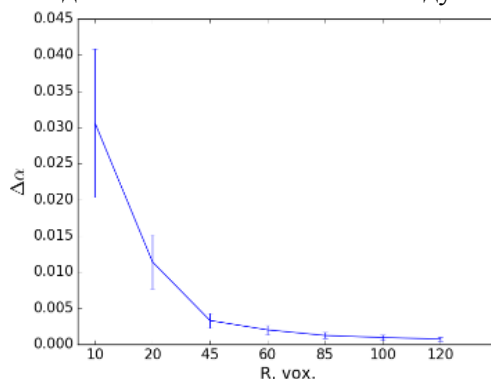


Рисунок 8. Зависимость ошибки определения величины однородности от радиуса сферы.

4.2. Эксперимент 2

Модельный объект строится следующим образом: за основу берется частица керамического проппанта с «залитыми» внутренними порами, случайно выбранная из томографического изображения. Поры внутри частицы распределяются равномерно так, чтобы суммарная пористость частицы совпадала с наперед заданной случайно сгенерированной пористостью от 0% до 30%.

Значение величины α_{expected} для таких объектов равно 0. Для всех объектов алгоритм определил величину $\alpha_{\text{calculated}}$ и величину ошибки $\Delta\alpha$. Как и предполагалось, ошибка определения неоднородности $\Delta\alpha$, которая в данном случае совпадает с величиной $\alpha_{\text{calculated}}$, во всех случаях близка к нулю.

4.3. Эксперимент 3

Теперь под порами будем понимать не единичные пиксели со значением '0', а сферические объекты различного размера, которые помещаются внутрь модельных объектов из эксперимента 2. Поры в объектах располагаются таким образом, чтобы проверить правильность определения алгоритмом «направления контраста» пористости. Действительно, для частиц, у которых явно выражена радиальная зависимость пористости и больше пор расположено в центральной части, алгоритм определил $\alpha_{\text{radial}} > 0$, а значение $\alpha_{\text{layered}} \approx 0$.

5. Результаты

Представленный алгоритм был применен к восьми различным трехмерным микротомографическим изображениям керамического проппанта. Величины неоднородности α_{radial} и α_{layered} подсчитаны для каждой частицы на каждом изображении, а в таблице 1 для каждого изображения представлено среднее значение данных мер среди всех частиц.

Среднее значение α_{radial} для всех образцов является положительным, а, значит, большинство частиц имеют тенденцию быть более пористыми в центральной части. Наиболее неоднородно пористость распределена у частиц на изображении № 4, а наименее неоднородно – на изображениях № 3 и 7.

6. Выводы

Продемонстрированные различия в свойствах неоднородности распределения внутренней пористости частиц проппанта вызывают интерес с технологической точки зрения. Проведённый на имеющемся небольшом наборе образцов анализ отражает взаимосвязь средней внутренней пористости с лабораторно определённой характеристикой прочности, не выявив при этом однозначной зависимости с мерами неоднородности. Тем не менее, предложенные параметры неоднородности планируется использовать в дальнейших исследованиях с большим количеством образцов.

Послойный анализ ожидаемо не выявил заметных отклонений от однородного строения проппанта, показав при этом, что относительная ошибка оценки пористости частицы путём анализа её сечения на двумерном микроскопическом снимке может достигать нескольких десятков процентов (в рассмотренных данных максимальная ошибка была близка к 50%).

Отметим, что разработанный инструмент может применяться для анализа неоднородности распределения не только пор, но и плотных включений внутри тел произвольной формы.

Таблица 1. Меры неоднородности распределения пористости для микротомографических изображений проппанта (μ - среднее значение; σ - среднеквадратичное отклонение).

Изображение №	$\alpha_{\text{радиальное}}$	$\alpha_{\text{послойное}}$
	$\mu \pm \sigma$	$\mu \pm \sigma$
1	0.26 ± 0.15	0.09 ± 0.07
2	0.24 ± 0.09	0.08 ± 0.07
3	0.15 ± 0.04	0.02 ± 0.02
4	0.37 ± 0.10	0.09 ± 0.05
5	0.22 ± 0.09	0.06 ± 0.03
6	0.29 ± 0.10	0.05 ± 0.03
7	0.16 ± 0.18	0.09 ± 0.05
8	0.20 ± 0.08	0.04 ± 0.03

7. Литература

- [1] Vogel, H.J. Quantitative morphology and network representation of soil pore structure / H.J. Vogel, K. Roth // *Advances in water resources*. – 2001. – Vol. 24(3). – P. 233-242.
- [2] Dewers, T.A. Three-dimensional pore networks and transport properties of a shale gas formation determined from focused ion beam serial imaging / T.A. Dewers, J. Heath, R. Ewy, L. Duranti // *International Journal of Oil, Gas and Coal Technology*. – 2012. – Vol. 5(2-3). – P. 229-248.
- [3] Otsu, N. A threshold selection method from gray-level histograms / N. Otsu // *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*. – 1979. – Vol. 9(1). – P. 62-66.
- [4] Safonov, I.V. Segmentation of convex cells with partially undefined boundaries / I.V. Safonov, G.N. Mavrin, K.A. Kryzhanovskiy // *Pattern recognition and image analysis*. – 2006. – Vol. 16(1). – P. 46-49.
- [5] Фандеев, В.П. Методы исследования пористых структур / В.П. Фандеев, К.С. Самохина // *Науковедение*. – 2015. – Т. 7, №. 4(29).
- [6] Soille, N.P. Morphological image analysis: principles and applications / N.P. Soille. – Springer Science & Business Media, 2013.
- [7] Thyagarajan, S. The heterogeneity and mechanical response of hot mix asphalt laboratory specimens / S. Thyagarajan, T. Laith, M. Eyad, B. Fouad // *International Journal of Pavement Engineering*. – 2010. – Vol. 11(2). – P. 107-121.

Analysis of proppant particles porosity based on microCT image processing

E.P.Serkova^{1,2}, I.V.Safonov¹, I.V.Yakimchuk¹

¹Schlumberger Moscow Research, Pudovkina 13, Moscow, Russia, 119285

²Moscow State University, Leninskie Gory 1, Moscow, Russia, 119991

Abstract: The proppant is a granular material with a typical size of 0.2 to 1.2 mm. It is used to prevent the closure of fractures in reservoir created by hydraulic fracturing procedure, which is actively used in the oil and gas industry. Some sorts of proppant are manufactured from porous technical ceramics. Presence of internal voids can dramatically decrease the proppant grain mechanical strength and consequently proppant pack conductivity under natural stress.

For a detailed study of proppant particles' internal porosity structure and its relation to the pack's strength we applied X-ray microtomography (microCT), which allows to observe this structure non-destructively.

In the work, our approaches for digital analysis of reconstructed 3D microCT images for studying the internal voids and the homogeneity of their distribution inside the proppant are presented. An automatic thresholding is used for primary segmentation of pores and particles. We apply 3D marker-controlled watershed to separate individual proppant particles. We propose features for characterization of radial and layered porosity distribution for each particle and homogeneity evaluation. The correctness of our method was tested on synthetic models. Current results indicate probable dependence of proppant strength properties on its internal porosity, but not on the homogeneity of porosity distribution.

Keywords: image segmentation, proppant, microtomography, porosity analysis.