

На правах рукописи

**Рыжиков Никита Ильич**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ  
ЗАХВАТА ЧАСТИЦ И ИЗМЕНЕНИЯ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПРИ  
ФИЛЬТРАЦИИ СУСПЕНЗИИ ЧЕРЕЗ ПОРИСТУЮ СРЕДУ**

Специальность 25.00.10 – геофизика,  
геофизические методы поисков полезных ископаемых

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва

2014

Работа выполнена на кафедре «теоретическая и экспериментальная физика геосистем» Московского Физико-Технического Института (Государственного университета)

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук  
Михайлов Дмитрий Николаевич

Официальные оппоненты: Доктор физико-математических наук  
Игорь Алексеевич Гарагаш

Доктор физико-математических наук  
Филиппов Анатолий Николаевич

Ведущая организация: ФГБОУВПО «Башкирский  
государственный университет»

Защита диссертации состоится «16» октября 2014 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.050.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте динамики геосфер Российской академии наук по адресу: 119334, г. Москва, Ленинский проспект, д. 38, корп. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института динамики геосфер Российской академии наук. <http://idg1.chph.ras.ru/>

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета,  
кандидат физико-математических наук

В.А. Рыбаков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность**

При фильтрации суспензии твердых частиц, взвеси глины, а также других дисперсных систем в пористой среде происходит захват (накопление) дисперсных частиц в поровом пространстве, в результате чего фильтрационные характеристики пористой среды существенно ухудшаются. В настоящее время активно развиваются различные теоретические и экспериментальные подходы к исследованию течения суспензии через пористую среду, механизмов захвата частиц, изменения проницаемости и структуры порового пространства.

Закупорка пор твердыми частицами обычно называется кольматацией, а обратный процесс (высвобождение твердых частиц) – суффозией. Область накопления твердых частиц в поровом пространстве обычно называется зоной кольматации или внутренней фильтрационной коркой.

Традиционно для теоретического описания динамики накопления частиц дисперсной фазы в поровом пространстве используются феноменологические модели, основанные на кинетических уравнениях. Зависимость между проницаемостью пористой среды и содержанием частиц дисперсной фазы, захваченных в поровом пространстве, также описывается феноменологическими соотношениями.

На сегодняшний день получено несколько разновидностей феноменологических соотношений для описания течения различного рода дисперсных систем и полимеров. Тем не менее, вопрос о диапазоне применимости полученных зависимостей и их однозначности остается открытым.

Сложность и многопараметричность процесса кольматации вызывают большие затруднения при экспериментальном моделировании этого процесса и интерпретации результатов экспериментов.

При значительной кольматации пор, твердые частицы перестают внедряться в пористую среду и отфильтровываются на входной поверхности. Начинается формирование внешней фильтрационной корки. Однако, в подавляющем большинстве работ экспериментальные данные и теоретические модели относятся либо к процессу кольматации, либо к росту внешней фильтрационной корки. Вопрос об объединении моделей и критерии начала формирования внешней фильтрационной корки слабо освещен в литературе и не подтвержден экспериментальными данными.

Одним из возможных путей решения описанных выше проблем является привлечение дополнительных экспериментальных данных, таких как распределение концентрации захваченных частиц по длине образца, для настройки модели и анализа механизмов захвата частиц в поровом пространстве.

Важное практическое приложение данной задачи – это проблема повреждения околоскважинной зоны пласта под воздействием проникших компонент бурового раствора (или промывочной жидкости). Это особенно актуально для горизонтальных скважин, так как заканчивание большинства из них производится в необсаженном состоянии (без эксплуатационной колонны).

Буровые растворы представляют собой сложные смеси полимеров, твердых частиц (размером от сотен до десятых долей микрон), глин и других добавок, содержащихся в “несущей” жидкости – основе бурового раствора, в качестве которой может выступать вода, нефть или синтетическая жидкость.

В процессе бурения под воздействием избыточного давления фильтрат бурового раствора, а также содержащиеся в нем мелкие частицы, и иные компоненты проникают в околоскважинную зону пласта и ухудшают ее коллекторские свойства. Формируется структура околоскважинной зоны пласта, включающая, в частности, внутреннюю (зона кольматации) и внешнюю фильтрационные корки.

В процессе освоения скважины внешняя фильтрационная корка обычно разрушается, проникшие компоненты бурового раствора частично вымываются из околоскважинной зоны, а ее проницаемость частично восстанавливается. Тем не менее, часть проникших компонентов остается удержанной в поровом пространстве породы, что приводит к существенному различию между исходной и восстановленной проницаемостью.

Наличие зоны с ухудшенными свойствами обуславливает значительные потери пластовой энергии и снижение продуктивности по отношению к природному состоянию пласта, искажает форму индикаторных кривых, влияет на данные испытателей пластов и геофизических приборов, затрудняя их интерпретацию.

Традиционные лабораторные фильтрационные эксперименты по исследованию воздействия суспензии на образец керна позволяют определить только изменение коэффициента проницаемости, которое обусловлено динамикой формирования и разрушения внешней фильтрационной корки на торце керна, а так же и накоплением/выносом компонент бурового раствора в породе.

Для детального изучения процесса кольтации пористой среды в последние годы используются все более сложные экспериментальные подходы. В данной работе использован комплексный экспериментальный подход к изучению параметров процесса кольтации, включающий фильтрационный эксперимент по закачке суспензии и анализ профиля концентрации частиц, захваченных в поровом пространстве. Предложены методы построения профилей концентрации для дисперсных фаз различных суспензий. Разработанный подход позволяет измерить распределение частиц суспензии по длине зерна и оценить глубину проникновения компонент суспензии либо напрямую (если область проникновения соответствующих компонент не превышает размер зерна), либо косвенно, используя известные аналитические решения и оценивая эмпирические параметры, полученных из экспериментальных данных.

**Цель настоящей работы** состоит в создании методов исследования динамики захвата частиц и изменения проницаемости при фильтрации суспензии через пористую среду. В качестве основных задач данного диссертационного исследования можно выделить:

**Основные задачи работы:**

- создание методики проведения фильтрационных экспериментов;
- проведение фильтрационных экспериментов с различными составами суспензий и различными образцами горных пород;
- создание экспериментальных методик для количественной оценки параметров зоны кольтации в образцы горных пород;
- интерпретация экспериментальных данных с использованием полученных количественных параметров зоны кольтации в образцах;

**Научная новизна.**

1. Метод определения кинетики захвата частиц и снижения проницаемости с использованием данных фильтрационных экспериментов и профилей распределения частиц суспензии вдоль исследуемых образцов.
2. Алгоритм анализа данных рентгеновской компьютерной микротомографии загрязненных образцов для получения пространственного распределения частиц суспензии в образце горных пород.
3. Метод окрашивания компонент суспензии с последующим анализом сколов образца для получения распределения проникших частиц суспензии.

4. Экспериментально зарегистрированный эффект влияния проникших твердых компонент суспензии на скорость распространение акустической волны в образце песчаника.
5. Метод количественной интерпретация эффекта изменения скорости распространения акустических волн в образце песчаника из-за проникновения твердых компонент суспензии.

#### **Защищаемые положения.**

1. Метод определения коэффициентов захвата частиц и снижения проницаемости пористой среды с использованием данных фильтрационных экспериментов и профилей распределения частиц суспензии вдоль исследуемых образцов.
2. Алгоритм анализа данных рентгеновской компьютерной микротомографии загрязненных образцов горных пород для получения пространственного распределения частиц суспензии в образце.
3. Метод окрашивания компонент суспензии с последующим анализом сколов образца для получения распределения проникших частиц суспензии.
4. Экспериментально зарегистрированный эффект влияния проникших твердых компонент суспензии на скорость распространение акустической волны в образце песчаника и количественная интерпретация эффекта изменения скорости распространения акустических волн в образце песчаника из-за проникновения твердых компонент суспензии.

**Практическая значимость данной работы** обуславливается распространенностью исследуемого процесса переноса суспензии в пористых средах в различных технических приложениях. В частности, необходимостью анализа повреждения околоскважинной зоны пласта компонентами бурового раствора.

Применение предложенных в данной работе методов позволяет оценить глубину проникновения частиц и степень снижения проницаемости и пористости, что может быть использовано для выбора метода обработки околоскважинной зоны пласта, корректировки данных испытателей пластов и геофизических приборов.

Практическая значимость данной работы во многом обусловлена необходимостью создания математических модели для описания ухудшения фильтрационных свойств околоскважинной зоны пласта из-за проникновения твердых компонентов бурового раствора. Полученные данные могут лечь в основу настройки и проверки указанных моделей. Комбинирование гидродинамических данных экспериментов с параметрами зоны кольматации позволяет существенно ограничить

диапазон параметров моделей, используемых для количественного описания коагуляции, что, в свою очередь, обеспечивает большую достоверность модели.

Результаты данной работы легли в основу 3-х патентов и 3-х патентных заявок.

### **Личный вклад**

Диссертант лично создавал и улучшал методику проведения фильтрационных экспериментов, а так же проводил фильтрационные эксперименты. Принимал участие в разработке метода окрашивания компонент суспензии. Предложил и реализовал методику анализа сколов образцов, через которые был профильтрован окрашенный раствор. Создал метод анализа данных рентгеновской компьютерной микротомографии для получения пространственного распределения захваченных компонентов вдоль образца, основанной на анализе форме гистограмм отдельных сечений. Проводил измерения скорости звука в загрязненных и чистых образцах, зафиксировал эффект влияния проникших компонент суспензии на скорость распространения акустической волны, а также обосновал изменения скорости звука из-за внесенных твердых компонент суспензии. Использовал рассчитанные профили распределения концентрации захваченных компонентов для анализа гидродинамических данных экспериментов. Участвовал в проведении экспериментов по оценке концентрации истекающего полимера с помощью измерения его реологических свойств. Им написано более 2/3 объема публикаций по теме диссертации.

### **Апробация работы.**

По теме диссертации автором опубликовано 9 научных работ, в том числе 3 статьи в рецензируемых журналах (из них 3 в журналах из перечня ВАК), 6 статей в научных сборниках и трудах конференций. Результаты исследований докладывались на семинарах в ИДГ РАН и в Московском Научном Центре Шлюмберже. На российских научных конференциях в Московском Физико-Техническом Институте (2010, 2011, 2013), в РГУ им. Губкина (2013, 2014), в БашГУ (2014), КГТУ (2012). Всего автор принял участие в 7 научных конференциях, из них 2 международных.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка использованной литературы из 139 наименований. Общий объем диссертации составляет 150 страниц, на которых размещено 84 рисунков и 4 таблицы.

**Благодарности.**

Автор выражает глубокую признательность своему научному руководителю к.ф.-м.н. Михайлову Д.Н., коллективу московского научно-исследовательского центра Шлюмберже (Шако В.В., Бурухину А.А., Жарниковой А.В., Надееву А.А., Якимчуку И.В.) за помощь и поддержку в ходе работ по теме диссертации. Автор также признателен Турунтаеву С.Б. и коллективу Института Динамики Геосфер за экспертную оценку работу и ценные советы.

**КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель, задачи, объект и предмет исследования. Дается характеристика научной новизны и практической ценности полученных результатов. Приведены также сведения о личном вкладе автора и апробации результатов диссертационной работы.

**Первая глава** посвящена обзору существующих теоретических и экспериментальных подходов к исследованию течения суспензии через пористую среду, механизмов захвата частиц, изменения проницаемости и структуры порового пространства. Приведен обзор литературы по теоретическому описанию исследуемых процессов, включая классическую (“deep-bed filtration”) модель, стохастические и сеточные модели.

Подробно рассмотрена классическая модель (deep-bed), в рамках которой течение суспензии в пористой среде описывается системой уравнений, состоящей из закона Дарси, уравнения транспорта твердых компонент, уравнения кинетики захвата частиц и выражения для зависимости проницаемости среды  $k$  от объемной доли захваченных частиц  $\sigma$ .

Уравнение определяющее интенсивность захвата частиц коагулянта в поровом пространстве представляется в виде :

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \lambda_0 F(\sigma) w C \quad (1)$$

Здесь,  $w$  – фильтрационная скорость,  $C$  – концентрация частиц в суспензии,  $\lambda_0$  – коэффициент захвата;  $F(\sigma)$  – корректирующая функция, учитывающая зависимость



интенсивности захвата частиц от доли объема пористой среды, занимаемой захваченными компонентами.

Для связи между проницаемостью и объемной долей захваченных частиц наиболее распространены эмпирические зависимости вида (2) (см. Herzig [Herzig, 1970]).

$$\frac{k}{k_0} = \frac{1}{1 + \beta\sigma} \quad (2)$$

А также вида (3), основанная на обобщении уравнения Козени-Кармана [Михайлов, 1987; Шехтман, 1961; Воек, 2012; Herzig, 1970; Tien, 1979].

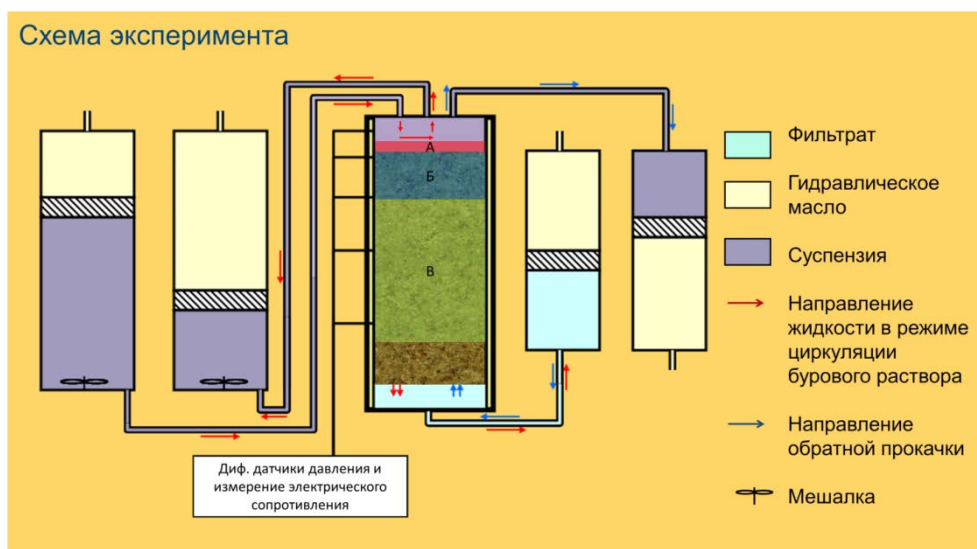
$$\frac{k}{k_0} = \left(1 - \gamma \frac{\sigma}{m_0}\right)^M \quad (3)$$

где  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $M$  – эмпирические параметры.

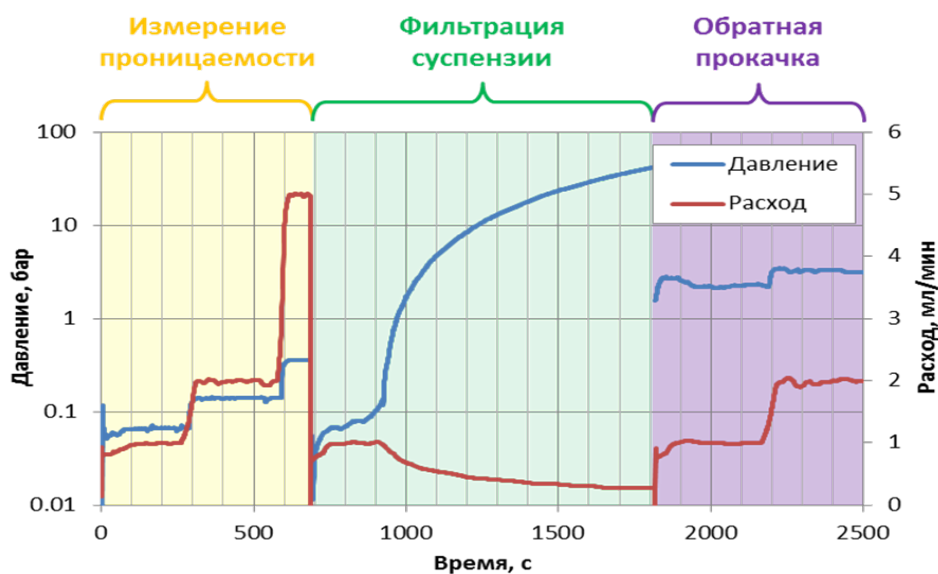
Рассмотрены различные методики фильтрационных экспериментов и методов характеристики процесса коагуляции. Эти методы можно разделить на прямые, которые напрямую характеризуют повреждение пористой среды (путем оценки глубины проникновения и с помощью профиля распределения захваченных частиц) и косвенные, которые могут быть интерпретированы только с использованием какой-либо модели. Среди прямых методов можно выделить рентгеновскую томографию, компьютерную рентгеновскую томографию с разными разрешениями, ЯМР, акустические исследования керна и анализ цвета скола образцов при использовании окрашенных загрязнителей. К косвенным относятся, например, динамические измерения концентрации компонентов исследуемого загрязнителя, вытекающего из образца во время фильтрации.

На основе проделанного литературного обзора были выделены наиболее перспективные методы характеристики процесса коагуляции: оптическое исследование образцов и рентгеновская микротомография. Именно они развивались в рамках предложенной работы.

Во **второй главе** изложены условия и процедура проведения фильтрационных экспериментов. Приведены параметры исследуемых образцов горных пород и суспензий. Схема проведения фильтрационных экспериментов представлена на Рис. 1.. Описана используемая в работе установка ПИК-ИБР, произведенная компанией ООО «Геологика». Последовательность процедур во ходе фильтрационного эксперимента представлена на Рис. 2.



**Рис. 1.** Принципиальная схема экспериментов по прямой и обратной прокачке жидкостей через образцы кернов. Буквами обозначены различные механизмы повреждения горной породы: А – внешняя корка, Б – внутренняя корка, В – проникновение филтраты.



**Рис. 2.** Динамика перепада давления и расхода в ходе фильтрационного эксперимента.

В третьей главе описан используемый метод анализа рентгеновской компьютерной микротомографии для получения профилей объемной доли захваченных частиц.

Томография выполнялась на приборе SkyScan 1172. Для идентификации проникших в пористую среду частиц требуется высокое разрешение 2-3 мкм на воксель (воксель – минимальный элемент трехмерного изображения кубической формы), что достигается малым диаметром сканируемой области (менее 10 мм). Сканирование области внутри образца стандартного керна приводит к высокому

уровню сигнал/шум. Поэтому для сканирования с требуемым разрешением из стандартного образца керна (диаметр – 3 см, длина – 6 см) выпиливались образцы диаметром 8 мм и длиной от 1 до 1.5 см.

Для расчета профилей концентрации захваченных частиц разработан метод анализа гистограмм [Рыжиков, 2013]. Гистограмма сечения томографии – это график статистического распределения элементов цифрового изображения с различной яркостью, в котором по горизонтальной оси представлена яркость, а по вертикали — относительное число пикселей с конкретным значением яркости.

Гистограмма градаций яркости, нормализованная на общее количество составляющих ее пикселей, является функцией плотности вероятности значения серого цвета на выделенном сечении. Согласно [Gonzalez R. C., 1992], такая функция плотности вероятности может быть представлена в виде суперпозиции функций плотности вероятности отдельных подобластей сечения:

$$p(z) = \sum_{i=1}^n p_i(z), \quad (4)$$

где  $z$  – значение яркости,  $p(z)$  – аппроксимация функции плотности вероятности от всего сечения изображения,  $p_i(z)$  – функция плотности вероятности для  $i$ -той подобласти,  $n$  – общее число подобластей, на которое разбивается изображение.

Если представить гистограмму в виде суперпозиции функций плотности вероятности соответствующих отдельным материалам, представленных на сечении (Рис. 3), то площадь под функцией плотности вероятности  $i$ -ой области равна относительной площади, занимаемой соответствующим ( $i$ -м) материалом на сечении.

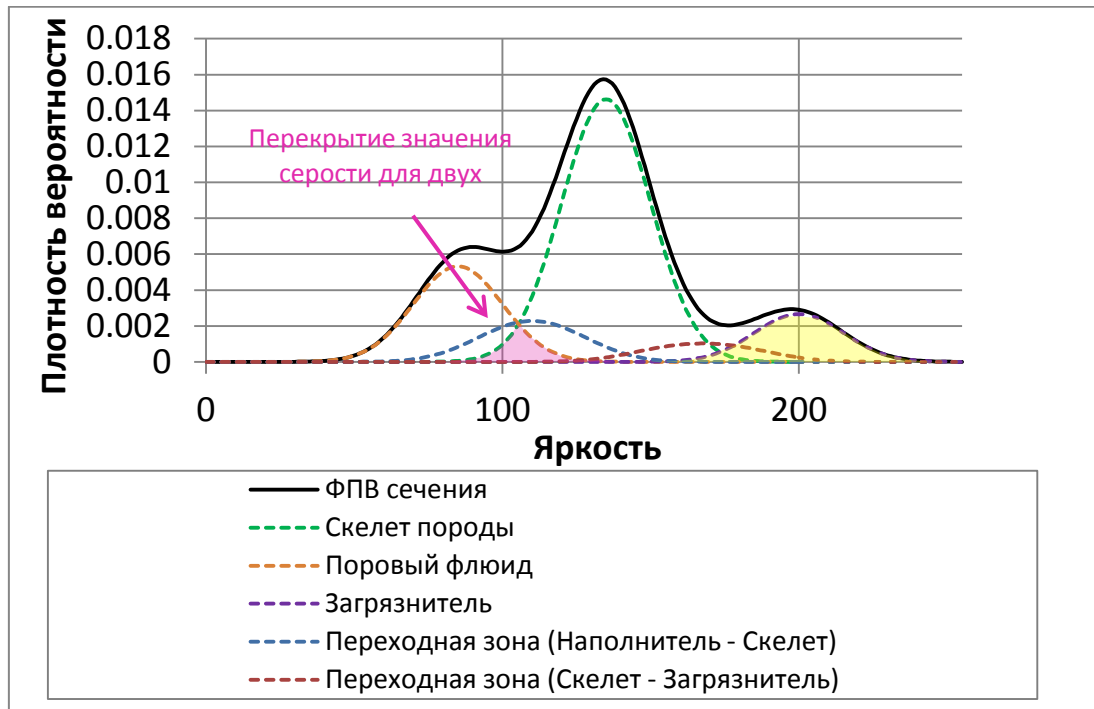
Форма функций плотности вероятности, соответствующая отдельным материалам, может быть представлена в виде гауссианов (5), что подтверждено на наборе калибровочных исследований.

$$p_i(z) = A_i e^{-\frac{(z-\mu_i)^2}{2\sigma_i^2}} \quad (5)$$

Таким образом, для характеристики функции плотности вероятности отдельного материала на сечении требуется три параметра: интенсивность ( $A_i$ ), полуширина ( $\sigma_i$ ) и среднее значения ( $\mu_i$ ).

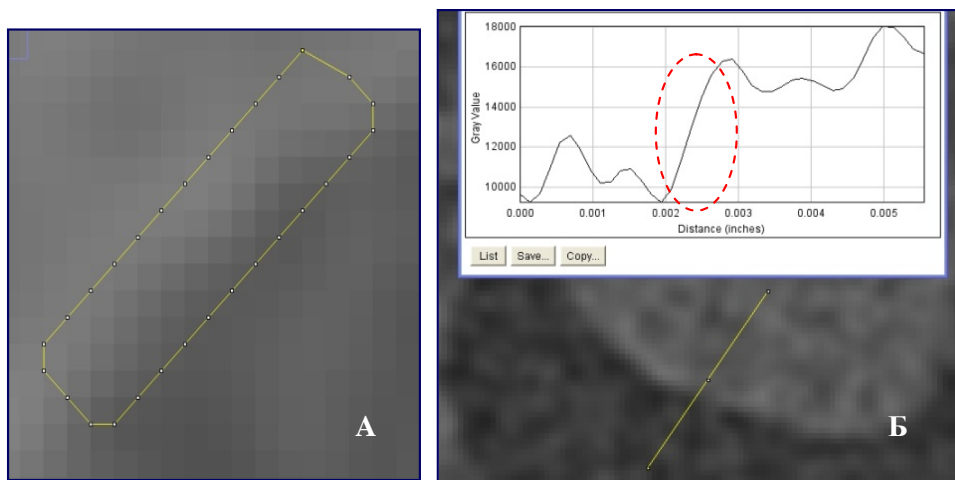
Особенностью данного метода определения относительных площадей материалов, является отсутствие сегментации изображения (представления изображения в черно-белом виде посредством выставления порога), основная

сложность которого состоит в разделении материалов, имеющих перекрытия значений серости (на Рис. 3)



**Рис. 3. Пример гистограммы сечения рентгеновской компьютерной микротомографии**

Области на границе двух материалов называются «переходной зоной», пиксели которой в литературе называются микселями (mixels). Эти области (Рис. 4) имеют собственную функцию плотности вероятности  $p_{ki}$ , параметры которой зависят от параметров функций плотности вероятности граничащих материалов ( $i$ -го и  $k$ -го) и характеризуются только одним параметром – интенсивностью, которая пропорциональна протяжённости границы между материалами.



**Рис. 4. Переходная зона (А) и профиль изменения серости в переходную зону (Б)**

Таким образом, гистограмма отдельного сечения представляется в виде взвешенной суммы гауссианов, соответствующих отдельным материалам, и функций плотности вероятности переходных зон между этими материалами. Для поисков параметров аппроксимации минимизировалась разница между реальной гистограммой  $H(z)$  и аппроксимацией (8).

$$\sum_{j=1}^{j_{hist}} \left| H(z_j) - \sum_{i=1}^n p_i(z_j) - \sum_{i=1, k=1}^{n, i \neq k} p_{ki}(z_j) \right| \rightarrow 0 \quad (6)$$

Число свободных параметров в такой минимизации равно  $3n+n(n-1)/2$ , где  $n$  – количество материалов представленных на сечении. Относительные объемы материалов в сечении  $S_i$  определяются выражением (7), где  $S_{p_i}$  – площадь, занимаемая чистым материалом с индексом  $i$ ,  $S_{p_{ki}}$  – площадь переходной зоны между  $k$ -м и  $i$ -м материалами.

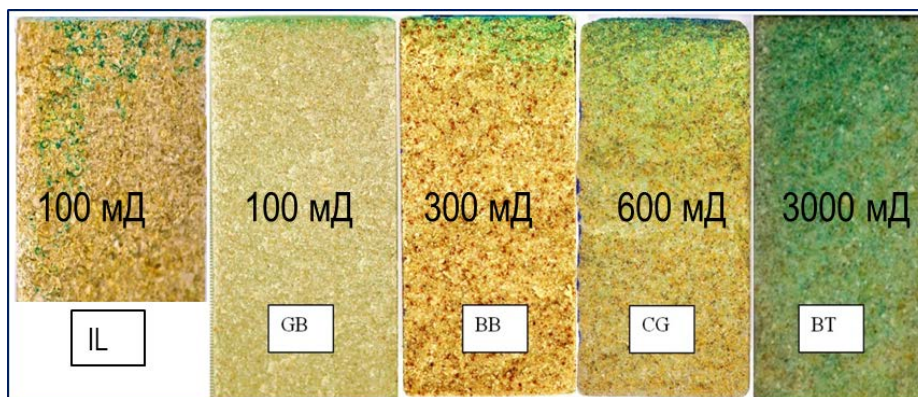
$$S_i = S_{p_i} + \frac{1}{2} \sum_{k \neq i}^{n-1} S_{p_{ki}} \quad (7)$$

Для расчета профиля объемной доли различных компонент вдоль анализируемого образца описанная выше процедура последовательно применяется ко всем сечениям рентгеновской компьютерной микротомографии, причем результаты минимизации для  $l$ -ого сечения используются как начальное приближение при минимизации для  $(l+1)$ -ого сечения. Кроме того, на результат минимизации для  $(l+1)$ -ого сечения накладывается ограничение в виде наперед заданного отклонения  $\varepsilon$  от результатов  $l$ -ого, т.е. для любого параметра минимизации  $A$  должно выполняться условие  $|1 - A_{l+1}/A_l| \leq \varepsilon$ , где  $l$  – порядковый номер сечения, на котором  $A_l$  является решением обратной задачи. В практических расчётах  $\varepsilon$  варьировалась в диапазоне от 3% до 10 %.

Применение предложенного метода для определения параметров захвата частиц описано в шестой главе.

**Четвертая глава** посвящена методу анализа профиля проникших частиц бентонитовой глины, основанному на их окрашивании и расчета распределение изменения интенсивности цвета на сколе образца после проведения фильтрационного эксперимента.

В рамках этого исследования в бентонитовую глину добавлялся краситель бриллиантовый зеленый, который, слабо влияет на фильтрационные и реологические свойства раствора. После добавления красителя проникшая глина легко различалась на сколе исследуемого образца. Для получения ровного скола вдоль направления фильтрации загрязнителя использовалась система бразильского теста, при котором цилиндрический образец разрушается постепенным сдавливанием между двух параллельных плоскостей. При такой конфигурации разрушение целостности образца произойдет в виде трещины, перпендикулярной сдавливающим плоскостям. На Рис. 5 представлены сколы различных образцов после закачки окрашенной суспензии бентонитовой глины.



**Рис. 5. Фотографии сколов образцов с различной проницаемостью через, которые фильтровалась суспензия бентонита. Двумя латинскими буквами зашифровано название породы из которой были сделаны образцы: IL - Indiana Limestone, GB – Grey Berea, BB – Buff Berea, CG – Castlegate, BT – Bentheimer**

В среде MATLAB была создана программа анализа изменения цвета фотографии образцов по трем каналам: красный ( $R$ ), зеленый ( $G$ ) и синий ( $B$ ). Фотография представляется в виде трех двумерных матриц размером  $M \times N$ , соответствующих распределению интенсивности цветов формата RGB:  $R_{ij}$ ,  $G_{ij}$ ,  $B_{ij}$ , где  $i$  – индекс элемента матрицы по направлению вдоль оси фильтрации, а  $j$  – поперек. В качестве характеристики количества проникших частиц окрашенного бентонита  $S_{ij}$  использовалась сумма абсолютных значений изменения цвета относительно фоновых значений (8):

$$S_{ij} = |R_{ij} - R_0| + |G_{ij} - G_0| + |B_{ij} - B_0|, \quad (8)$$

где фоновые значения  $R_0$ ,  $G_0$ ,  $B_0$  полученные на чистом образце.

Для построения профиля распределения частиц  $S_i$  вдоль направления фильтрации матрица  $S_{ij}$  суммируется по  $j$ -ому индексу.

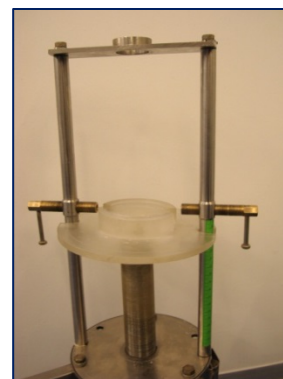
Анализ корреляции между  $\sigma(x)$  и  $S(x)$  выходит за рамки работы, поскольку для определения параметров захвата частиц суспензии необходима только форма профиля  $\sigma(x)/\sigma(x_0)$ . Пример построенного по анализу скола профиля проникшей бентонитовой глины и его использование для анализа данных фильтрационных экспериментов представлен в шестой главе.

**В пятой главе** представлены данные по акустическому профилированию загрязненных образцов, приведены параметры установки и используемого акустического сигнала, описан алгоритм определения скорости его распространения. На основе теории Френкеля-Био-Николаевского рассчитано изменение скорости в зависимости от концентрации захваченной компоненты суспензии на основе теории Френкеля-Био-Николаевского.

Для излучения и приема акустических волн использовались датчики Panametrics V103-RM, апертура датчика равнялась 1.3 см, а основная частота – 1 МГц (Рис. 6). С помощью системы позиционирования (см. Рис. 7) осуществлялось перемещение датчиков и их диаметральный прижим к цилиндрическому образцу.

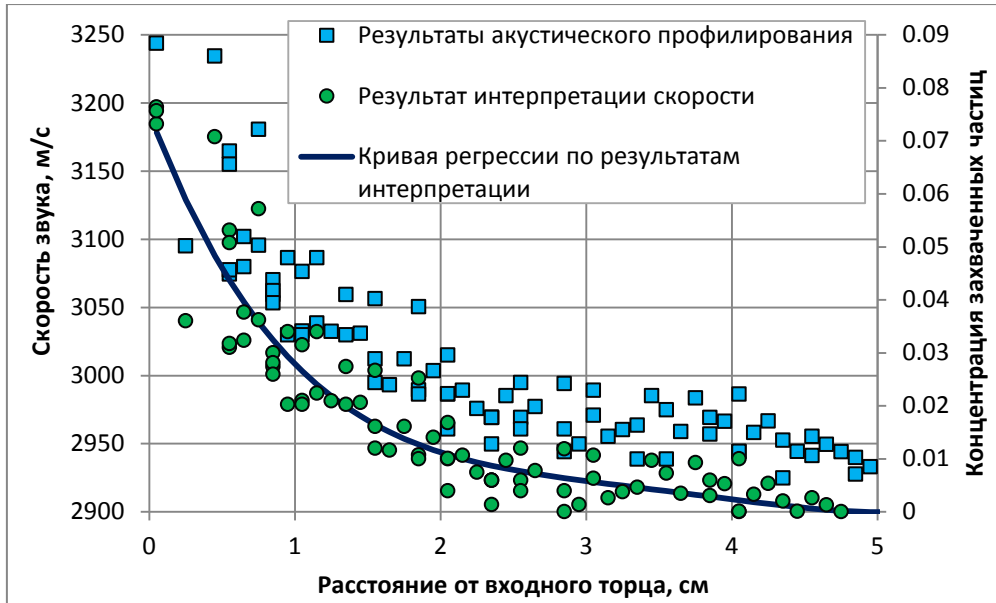


**Рис. 6. Датчики Panametrics V103-RM и латунные держатели (акустические линзы).**



**Рис. 7. Система позиционирования датчиков**

На Рис. 8 синим маркером представлен пример результатов профилирования для образца ВТ11 (песчаник Bentheimer, пористость – 0.23, проницаемость 2900 мД), через который фильтровалась взвесь частиц карбида кремния в полимере (25 г/л частиц SiC и 1 г/л полимер Хантан). Как видно, во входной части образца наблюдается повышение скорости ультразвуковых волн, которое однозначно можно связать с проникновением частиц карбида кремния в пористую среду.



**Рис. 8. Результаты акустического профилирования образца ВТ11. Голубым отмечены результаты профилирования. Зеленые точки соответствуют результатам интерпретации акустического профилирования.**

Для описания изменения скорости распространения акустических волн использовалась система уравнений теории Френкеля-Био-Николаевского для распространения упругих волн в пористой среде в одномерном случае в линейном приближении (9)-(12).

$$\beta \frac{\partial p}{\partial t} - \beta_1 \frac{\partial \sigma_{eff}}{\partial t} + (1 - m_0) \frac{\partial v_1}{\partial x} + m_0 \frac{\partial v_2}{\partial x} = 0, \quad (9)$$

$$(1 - m_0) \rho_{10} \frac{\partial v_1}{\partial t} + (1 - m_0) \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \sigma_{eff}}{\partial x} + \frac{m_0^2 \mu}{k} (v_2 - v_1), \quad (10)$$

$$m_0 \rho_{20} \frac{\partial v_2}{\partial t} + m_0 \frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{m_0^2 \mu}{k} (v_2 - v_1), \quad (11)$$

$$\sigma_{eff} = K_p e_1 + \varepsilon p, \quad K_p = K_b + \frac{4}{3} G; \quad \varepsilon = \beta_1 K_b; \quad \beta = (1 - m_0) \beta_1 + m_0 \beta_2, \quad (12)$$

где индексы 1, 2 - твердая фаза и насыщающая жидкость (газ) соответственно;  $\rho_i$  - плотности фаз;  $v_i$  - массовые скорости;  $e_1$  - продольная деформация матрицы;  $\sigma_{eff}$  - эффективное напряжение Терцаги;  $p$  - давление в насыщающем флюиде;  $m_0$  - пористость;  $k$  - проницаемость;  $\mu$  - вязкость флюида;  $K_b$  - модуль объемной упругости пористой матрицы;  $G$  - модуль сдвига пористой матрицы;  $\beta_i$  - сжимаемости материала, составляющего пористую матрицу, и насыщающего флюида.

Для данной системы искалось решение в виде гармонического сигнала с частотой  $\omega$  и волновым числом  $\xi$ , которое в результате подстановки давало



дисперсионное соотношение (13), являющееся биквадратным уравнением относительно  $\xi$ .

$$a_1 \xi^4 - (a_2 \omega^2 - i a_3 \omega) \xi^2 + a_4 \omega^4 - i a_5 \omega^3 = 0 \quad (13)$$

Два решения этого уравнения характеризуют две продольные волны распространяющихся в пористой среде. Интерес для нас представляет только решение  $\xi$ , соответствующее продольной волне с низким затуханием и высокой скоростью.

Для интерпретации данных сделаны предположения с об увеличении эффективного модуля объёмного сжатия скелета  $K_b$ , выраженного через модуль упругости  $E$  и об уменьшении пористости образца. Были предложены соотношения для изменения свойств образца из-за проникновения твердых частиц (14),(15).

$$m = m_0 - \sigma \quad (14)$$

$$E = E_0 + \alpha \sigma \quad (15)$$

Параметр  $E_0$  определялся из скорости распространения акустических волн в чистом образце, а параметр  $\alpha$  – с помощью данных рентгеновской компьютерной микротомографии, согласно которой, на глубине 5 мм, объемная концентрация частиц  $\sigma$  составляет 5%. Полученная зависимость была использована для восстановления профиля концентрации захваченных частиц вдоль образца, представленного на Рис. 8 (зеленый маркер).

Предложенные методы вместе с гидродинамическими данными фильтрационных экспериментов позволяют корректно выбрать физическую модель для описания процесса кольтации и подобрать её параметры.

В **шестой главе** представлены результаты определения параметров процесса кольтации пористой среды путем совместного анализа данных фильтрационных экспериментов и полученных профилей концентрации захваченных частиц. Обсуждается применимость различных моделей кольтации.

В случае классического описания процесса кольтации с постоянной интенсивностью захвата  $F(\sigma) = 1$  существует аналитическое решение для объемной доли захваченных частиц (16) и для концентрации взвешенных в суспензии частиц (17).

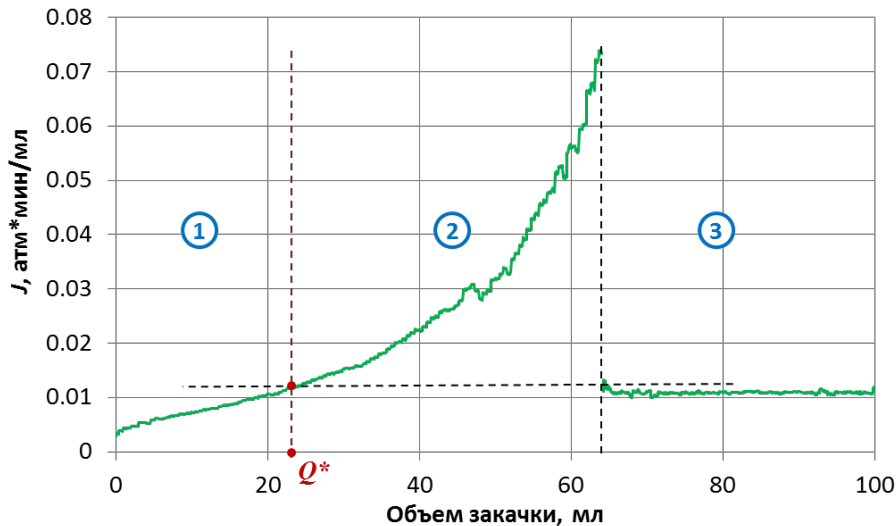
$$\sigma(x) = \begin{cases} \lambda_0 [W_{inj}(t) - xm_0] C_0 \exp(-\lambda_0 x), & \text{если } W_{inj}(t) > xm_0 \\ 0, & \text{если } W_{inj}(t) \leq xm_0 \end{cases} \quad (16)$$

$$C(x) = \begin{cases} C_0 \exp(-\lambda_0 x), & \text{если } W_{inj}(t) > xm_0 \\ 0, & \text{если } W_{inj}(t) \leq xm_0 \end{cases} \quad (17)$$

где  $x$  – координата вдоль оси керна;  $W_{inj}$  – объем закаченной в образец жидкости; отнесенный к площади сечения образца;  $\lambda_0$  – коэффициент захвата.

Предложенный метод состоит в определении коэффициента захвата  $\lambda_0$  из решения (16) для профиля объемной доли захваченных частиц и последующего определения зависимости  $k(\sigma)$ , используя гидродинамические данные фильтрационного эксперимента. Тем самым, полностью описать процесс с точки зрения аналитического решения.

Для анализа данных фильтрационных экспериментов удобно использовать гидравлическое (фильтрационное) сопротивление  $J$ , соответствующее отношению текущего перепада давления  $\Delta p(t)$  к текущему расходу  $q(t)$ . На Рис. 9 представлены гидродинамические данные для эксперимента по закачки суспензии взвешенных частиц карбида кремния через песчаник Bentheimer с последующей обратной прокачкой. Предполагая, что при начале обратной прокачки внешняя фильтрационная корка разрушается практически мгновенно, был соотнесен начальный уровень гидравлического сопротивления при обратной прокачке (обозначен штриховой линией) с уровнем гидравлического сопротивления образца при наличии только внутренней фильтрационной корки. Таким образом в фильтрационных экспериментах определялся объем суспензии  $Q^*$ , потраченный на формирование внутренней фильтрационной корки. В данном случае объем составил  $Q^* = 21-23$  мл.



**Рис. 9.** Динамика гидравлического сопротивления в ходе фильтрационного эксперимента. Образец – песчаник Bentheimer, загрязнитель – взвесь частиц SiC в воде. Цифрами на рисунке обозначены области: 1 – формирование внутренней фильтрационной корки, 2 – формирование внешней фильтрационной корки, 3 – обратная прокачка;  $Q^*$  – объем суспензии, потраченный на формирование внутренней фильтрационной корки

Для описания процесса падения проницаемости при фильтрации на этапе формирования внутренней фильтрационной корки использовалось соотношение (2) и соответствующее ему выражение для гидродинамического сопротивления (18).

$$J_{int} = \frac{\mu}{k_0 A} \left( L + \beta \int_0^L \sigma(x) dx \right), \quad (18)$$

где  $L$  – длина образца;  $\mu$  – вязкость суспензии.

Показано, что для определения параметров захвата частиц суспензии в пористой среде не достаточно использования только данных фильтрационного эксперимента (динамика расхода и перепад давления) и требуется привлечение дополнительной информации

Для точного определения параметра  $\lambda_0$  будем использовать профиль полученный с помощью анализа данных рентгеновской компьютерной микротомографии (Рис. 10).



**Рис. 10. Профиль захваченных частиц карбида кремния в образце песчаника Bentheimer и аппроксимации профиля с помощью выражений (16) и (20).**

Проведенный анализ показал, что данный профиль не может быть аппроксимирован с достаточной точностью с помощью решения (16) при объеме прокачки  $Q^* = 21-23$  мл и заданной концентрации суспензии. Решение (16) позволяет аппроксимировать только часть профиля при  $Q^* = 17$  мл и не воспроизводит резкое изменение доли захваченных частиц вблизи входного торца образца.

Для адекватной аппроксимации всего профиля рассмотрим зависимость интенсивности захвата частиц от доли захваченных частиц в объеме пористой среды в виде (19) [Herzig, 1970; Воек, 2012].

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \lambda_0 C w (1 + b\sigma) \quad (19)$$

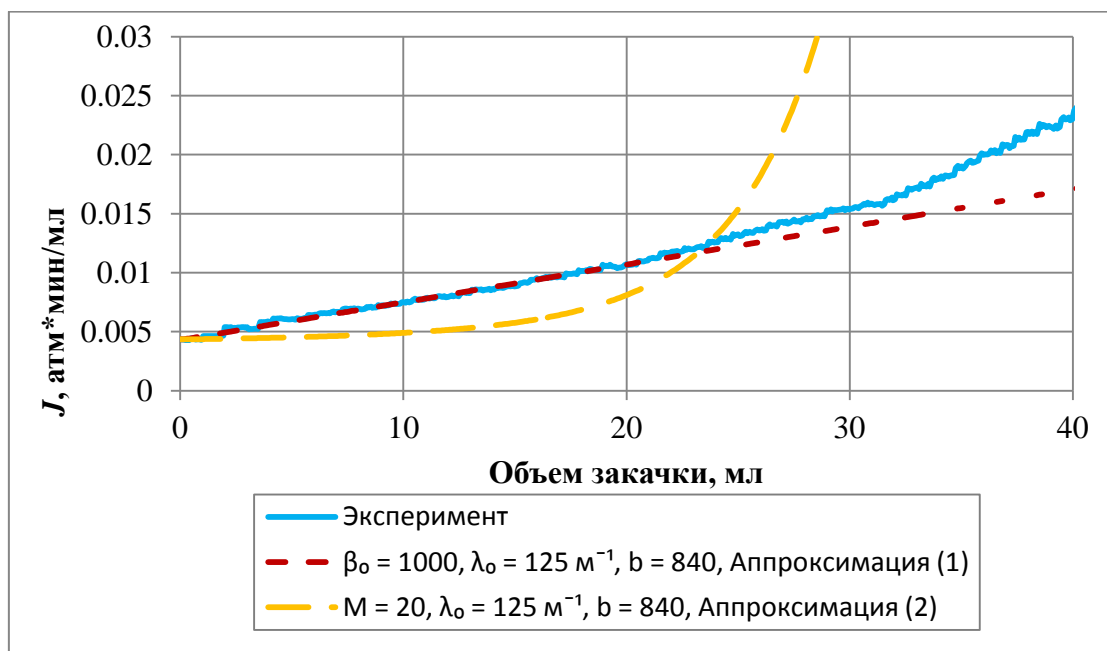
При таком выражении для захвата частиц существует аналитическое решение [Шехтман, 1961; Civan, 2007] (20):

$$\sigma = \begin{cases} -\frac{1}{b} \frac{\exp(-\lambda_0 C_0 b [W_{inj}(t) - xm_0])}{1 - \exp(\lambda_0 x) - \exp(-\lambda_0 C_0 b [W_{inj}(t) - xm_0])}, & W_{inj}(t) \leq xm_0 \\ 0, & W_{inj}(t) > xm_0 \end{cases} \quad (20)$$

Аппроксимация профиля с помощью решения (27) методом наименьших квадратов приведена на Рис. 10 штрих-пунктирной линией. Полученные параметры:  $b = 850$ ,  $\lambda_0 = 120 \text{ м}^{-1}$ .

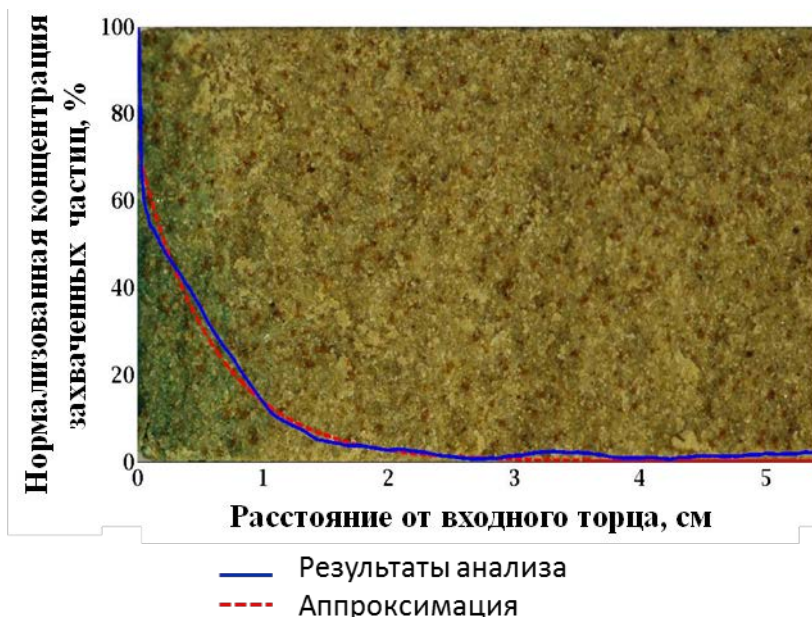
Воспроизведен профиль захваченных частиц и тем самым зафиксированы параметры для уравнения захвата (19). После обоснования модели захвата частиц оценивались параметры снижения проницаемости. На Рис. 11 представлена

аппроксимация данных динамики гидравлического сопротивления от объема закаченной суспензии с помощью выражения (18). Для сравнения представлена аппроксимация этих данных с помощью зависимости (3), которая не может воспроизвести ход кривой гидравлического сопротивления при фиксированных параметрах накопления частиц. Таким образом, профиль позволяет зафиксировать параметры накопления частиц и точно выбрать физическую модель для описания изменения проницаемости пористой среды.



**Рис. 11. Аппроксимация кривой роста гидродинамического сопротивления от объема закачки с помощью выражений для снижения проницаемости (2) и (3), при фиксированных параметрах накопления частиц.**

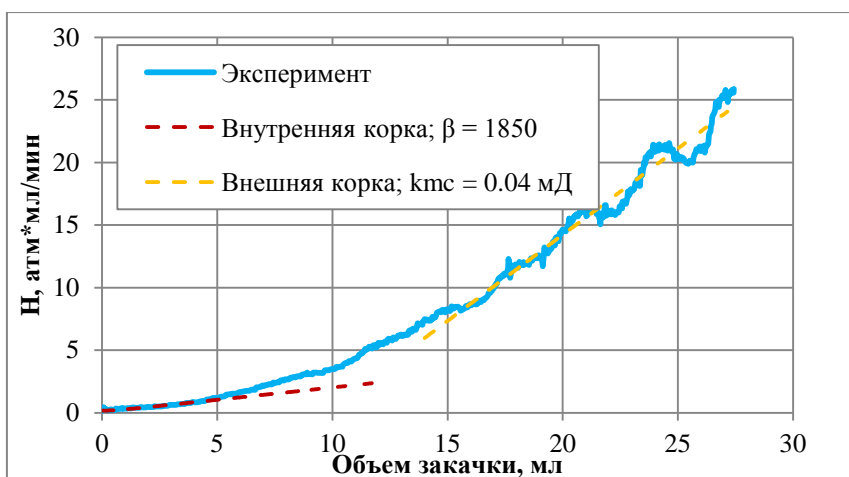
В случае анализа данных по фильтрации бентонитовой глины использовались профили распределения захваченных частиц, полученные с помощью анализа распределения интенсивности цветов на фотографий сколов образцов. На Рис. 12 представлены результаты анализа изменения цвета на сколе образца песчаника Buff Berea после закачки суспензии бентонитовой глины 10 г/л и аппроксимация полученного профиля с помощью аналитического решения (16). Коэффициент захвата для данной задачи составил  $\lambda_0 = 152 \text{ м}^{-1}$ .



**Рис. 12. Результат построения профиля цветовой характеристики проникновения частиц окрашенной бентонитовой глины в образец песчаника Buff Berea.**

По анализу динамики гидравлического сопротивления образца, представленной на Рис. 13, был определен параметр снижения проницаемости  $\beta = 1850$ .

Проницаемости внешней фильтрационной корки, определяющая динамику ее формирования определялся с помощью исследования течения бентонита через фильтровальную бумагу на фильтр-прессе.



**Рис. 13. Динамика гидравлического сопротивления образца песчаника Buff Berea в ходе закачки взвеси бентонитовой глины 10г/л.**

В **Заключении** изложены основные выводы и результаты.

**По теме диссертации опубликованы следующие работы:**

*Рыжиков Н.И., Михайлов Д.Н., Шако В.В.* Метод расчета профилей распределения пористости и объемных долей материалов в пористой среде с помощью анализа данных рентгеновской микротомографии //труды МФТИ. – 2013. – том 5. – № 4(20).

*Михайлов Д.Н., Рыжиков Н.И., Шако В.В.*, «Комплексный экспериментальный подход к определению параметров зоны кольматации продуктивных пластов» //Вестник ЦКР Роснедра. – 2014. – №1.

*Михайлов Д.Н., Рыжиков Н.И., Шако В.В.*, «Комплексный экспериментальный подход к определению параметров проникновения и захвата компонентов бурового раствора и сопутствующего изменения проницаемости породы коллектора //труды РГУ им. Губкина. – 2013. – № 4.

*Михайлов Д.Н., Рыжиков Н.И., Шако В.В.* Комплексный экспериментальный подход к определению кинетики кольматации пористых сред. //Нефтяное Хозяйство, (принято в печать)

*Михайлов Д.Н., Рыжиков Н.И., Шако В.В., Theuveny V.* Комплексный экспериментальный подход к определению изменения свойств пород пласта под воздействием бурового раствора. – SPE-171291-RU – 2014. (принято в печать)

*Михайлов Д.Н., Рыжиков Н.И., Шако В.В.* Комплексный экспериментальный подход для определения влияния проникших компонентов бурового раствора на изменения свойств призабойной зоны. //тезисы конференции «Геофизические исследования в процессе добычи и освоения скважин. Интеллектуальные скважины», 2014.

*Рыжиков Н.И.* Экспериментальное исследование структуры зоны кольматации и кинетики ее формирования. //тезисы 68-ой международной молодежной конференции «Нефть и Газ 2014». – 2014.

*Рыжиков Н.И., Михайлов Д.Н.* Экспериментальное исследование динамики захвата частиц и сопутствующего ухудшения проницаемости при фильтрации суспензии через пористую среду //тезисы XX конференции «Губкинские чтения». – 2013.

*Рыжиков Н.И., Михайлов Д.Н.* Комплекс экспериментальных методов для определения параметров захвата частиц и снижения проницаемости при фильтрации суспензии через пористую среду //тезисы 56-й научной конференции МФТИ. – 2013.

*Рыжиков Н.И., Михайлов Д.Н.* Метод расчета профилей распределения пористости и объемных долей материалов в пористой среде с помощью анализа данных рентгеновской микротомографии //тезисы 54-й научной конференции МФТИ. – 2011.

*Рыжиков Н.И., Михайлов Д.Н.* Расчет профилей твердых компонент пористого образца с помощью рентгеновской томографии //тезисы 53-й научной конференции МФТИ. – 2010.

**Патенты и патентные заявки:**

Патент № WO2012165991 A1 «A method for determination of spatial distribution and concentration of contrast components in a porous or / and heterogeneous sample», выдан 6.12.2012

Патент РФ № 2467315 «Способ определения пространственного распределения и концентрации глины в образце керна», выдан 23.06.2012

Патент РФ № 2013135670 «Способ прогнозирования изменения свойств призабойной зоны пласта под воздействием бурового раствора», выдан 30.05.2014

Заявка РФ № 2013156000 «Способ определения изменений параметров пористой среды под действием загрязнителя», подана 18.12.2012

Заявка РФ № 2013157418 «Способ определения изменения свойств околоскважинной зоны пласта-коллектора под воздействием бурового раствора», подана 25.12.2013

Заявка РФ № 2013157415 «Способ определения распределения и профиля загрязнителя в пористой среде», подана 25.12.2013