

Отзыв официального оппонента

на диссертационную работу Рыжикова Никиты Ильича на тему:
«Экспериментальное исследование динамики захвата частиц и изменения проницаемости
при фильтрации суспензии через пористую среду», представленную на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности
25.00.10 - Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

Процесс фильтрации суспензий через пористую среду широко используется в разнообразных технических системах и технологических схемах. К ним, например, относятся: закачка воды в пласт для поддержания пластового давления, бурение нефте- и газодобывающих скважин, изготовление высокоэффективных фильтров для очистки жидкостей в пищевой, химической и фармацевтической отрасли промышленности.

Однако, несмотря на интенсивное развитие данной проблематики, и наличие широкого набора различных математических моделей и эмпирических соотношений, представленных в литературе, вопрос о правильном выборе той или иной модели и подборе ее определяющих параметров, главными из которых являются параметры, характеризующие захват частиц и снижение проницаемости среды, все еще остается открытым. Из-за большого числа различных механизмов захвата частиц, имеющих место при фильтрации водных и неводных суспензий в пористых средах, процесс фильтрации является многопараметрическим. Следовательно, для достоверной его настройки необходимо использовать комплексные наборы экспериментальных данных.

Представленная диссертационная работа как раз и направлена на проведение экспериментальных исследований процесса фильтрации суспензий в пористых структурах и получения набора данных, необходимых для более точной настройки существующих моделей (адекватного определения их основных параметров). При значительной кольматации пор, твердые частицы перестают внедряться в пористую среду и осаждаются на рабочей поверхности, формируя внешнюю фильтрационную корку. Отметим, что в большинстве работ экспериментальные данные и теоретические модели относятся либо к процессу кольматации, либо к росту внешней фильтрационной корки. Злободневный вопрос об объединении моделей и выработке критерия начала формирования внешней фильтрационной корки слабо освещен в имеющейся литературе и не подтвержден экспериментальными данными. В данной диссертации автором использован комплексный экспериментальный подход к изучению параметров поврежденной околоскважинной зоны, включающий фильтрационный эксперимент по закачке бурового раствора и анализ профиля компонент бурового раствора, удержаных в поровом пространстве. Поэтому

тема диссертационного исследования Рыжикова Н.И. представляется **актуальной** как с чисто научной, так и с практической точки зрения.

Содержание работы.

Диссертация Рыжикова Н.И. представлена на 150 страницах и состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованной литературы из 139 наименований, содержит 84 рисунка и 4 таблицы.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель, задачи, объект и предмет исследования диссертационной работы. Указана также научная новизна и практическая ценность полученных результатов и приведены сведения о личном вкладе автора и аprobации результатов диссертационной работы.

В первой главе автором проведен обзор существующих теоретических и экспериментальных подходов к изучению течения суспензии через пористую среду, механизмов захвата частиц, изменения проницаемости и структуры пористого пространства. Выделены основные теоретические подходы к описанию исследуемых процессов: феноменологический – модель глубокой фильтрации, стохастический и сеточный. Определены основные управляющие параметры, для оценки которых требуются экспериментальные исследования. Показано, что наиболее перспективными методами характеризации процесса кольматации являются оптическое исследование образцов и рентгеновская микротомография высокого разрешения, которые и применялись автором в диссертационном исследовании.

В второй главе приведены условия и изложена процедура проведения фильтрационных экспериментов. Перечислены параметры исследуемых образцов горных пород и суспензий.

В третьей главе подробно описан используемый автором метод анализа рентгеновской компьютерной микротомографии для получения профилей объемной доли захваченных пористой средой частиц. Для расчета профилей концентрации захваченных частиц разработан оригинальный метод анализа гистограмм.

В четвертой главе диссертации изложен метод анализа профиля проникших частиц бентонитовой глины, основанный на их окрашивании и проведен расчет распределения изменения интенсивности цвета на сколе образца после проведения фильтрационного эксперимента. При этом 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 в направлении фильтрации загрязнителя скола использовалась система бразильского теста, при котором цилиндрический образец разрушался постепенным сдавливанием между двух параллельных плоскостей. В среде MATLAB была создана программа анализа цветных фотографий исследованных образцов по трем каналам.

В пятой главе автором представлены данные по акустическому профилированию загрязненных образцов породы, приведены параметры установки и акустического сигнала, а также описан алгоритм определения скорости его распространения. На основе теории Френкеля-Био-Николаевского для распространения упругих волн в пористой среде в одномерном случае в линейном приближении, рассчитана скорость фильтрации в зависимости от концентрации захваченной компоненты суспензии. Отметим здесь, что предложенные в диссертации методы в совокупности с данными фильтрационных экспериментов позволяют корректно выбрать физическую модель для описания процесса кольматации и подобрать её параметры.

В шестой главе представлены значения указанных выше параметров процесса кольматации пористой среды, полученные путем совместного анализа гидродинамических данных фильтрационных экспериментов и найденных профилей концентрации захваченных частиц. Обсуждена применимость различных моделей кольматации. Проницаемость внешней фильтрационной корки, определяющая динамику ее формирования, определялась с помощью исследования течения бентонита через фильтровальную бумагу на фильтр-прессе.

В заключении изложены основные результаты и выводы диссертации.

Проведенное оппонирование диссертационной работы позволило установить, что ряд результатов, полученных автором лично, обладают несомненной **научной новизной**. В первую очередь к новым результатам можно отнести следующие положения и выводы:

1. Алгоритм обработки данных рентгеновской компьютерной томографии для построения распределения концентрации захваченных средой частиц;
2. Метод анализа цифровых изображений сколов образцов горных пород, загрязненных окрашенными компонентами суспензии;
3. Экспериментальное подтверждение значительного влияния проникших в среду частиц на скорость распространения продольной волны в образце песчаника и

новый метод количественной интерпретации профилей скорости вдоль образца для получения распределения частиц;

4. Методика совместного анализа профилей концентрации захваченных из суспензии частиц и гидродинамических данных фильтрационных экспериментов для улучшения достоверности определения параметров моделей.

Практическая значимость данной диссертационной работы обусловлена предложенными ее автором методами характеризации зоны кольматации. Акцент в работе сделан на проблеме повреждения призабойной зоны пласта компонентами буровых растворов, что обуславливает параметры проводимых экспериментов, выбор суспензий и модельных пористых сред. Результаты, полученные описанными методами, могут быть использованы для подбора состава буровых растворов. В комплексе с гидродинамическими данными фильтрационных экспериментов, результаты использования методов, предложенных в диссертации, могут быть использованы для улучшения достоверности настройки параметров используемых моделей и симуляторов процесса фильтрации суспензии в пористой среде.

В пользу высокой практической ценности данной работы также говорит большое количество патентов, поданных соискателем и связанных с тематикой работы (3 патента и 3 патентные заявки). Важным практическим результатом работы является установление автором значений “критической” пористости ($0,1 - 0,13$), при которой частицы перестают внедряться в пористую среду, и начинается формирование внешней фильтрационной корки.

Достоверность результатов работы обусловлена представительным набором лабораторных экспериментальных данных, а также согласованностью теоретических результатов с данными лабораторных экспериментов. Достоверность уравнений аналитической модели обусловлена строгим выводом её положений из фундаментальных законов гидродинамики, физической обоснованностью используемых гипотез и упрощений, а также сопоставлением теоретических предсказаний с экспериментальными данными. Достоверность результатов лабораторного моделирования подтверждается повторяемостью опытов и воспроизводимостью полученных данных в пределах погрешности измерений.

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

- 1) Защищаемые положения и научная новизна, изложенные в автореферате (стр. 5-6) и диссертации (стр. 8-9), практически дублируют друг друга. Их рационально было бы объединить.

- 2) Непонятно, насколько обоснованным при рентгеновском микротомографическом сканировании является использование образца малых размеров диаметром 8 мм и длиной от 1 до 1.5 см вместо стандартного керна (диаметр – 3 см, длина – 6 см)? Как это может влиять на точность определения профиля захваченных пористой средой частиц?
- 3) Несмотря на то, что автор вначале приводит выражение Эйнштейна, вязкость суспензии, по-видимому, считалась в работе постоянной, а между тем она сильно зависит от концентрации взвешенных частиц, в особенности вблизи мест их скопления;
- 4) Из рис.74 диссертации следует, что скорость звука растет при увеличении пористости среды. Это связано с тем, что скорость звука в геологической породе (в песчанике она равна 2920 м/с) ниже, чем в карбиде кремния (11500 м/с), частицы которого захватываются порами. Учитывалось ли при расчетах влагосодержание породы? В случае учета жидкости в порах (в воде скорость звука – 1450 м/с) и малом количестве задержанных частиц должно быть наоборот – скорость звука должна падать с пористостью;
- 5) Имеется большое количество опечаток в диссертации, заметны они и в автореферате (особенно в окончаниях слов); в ряде мест пропущены запятые; есть неудачные выражения – например, «направление жидкости» (рис.1. автореферата); очень мелкие и плохо читаемые надписи на рисунках (например, рис.3-4 диссертации); для английского термина «deep-bed filtration» есть русский аналог – глубокая фильтрация; непонятно зачем автор использует миллидарси в качестве основной единицы проницаемости, если удобнее использовать дарси (например, вместо $k = 2900 \text{ мД}$, удобнее писать $k = 2,9 \text{ Д}$).

Однако отмеченные замечания не снижают высокий научный уровень работы и не могут повлиять на ее общую положительную оценку. Диссидентант проделал огромную по объему работу, разработал и освоил большое количество экспериментальных методик и современное высокотехнологичное научное оборудование. Диссертация Рыжикова Н.И. четко структурирована, ее содержание характеризуется строгостью и последовательностью изложения материала. Текст диссертации удачно проиллюстрирован цветными графиками, фотографиями и таблицами.

Автореферат диссертации Рыжикова Н.И. выполнен с соблюдением установленных требований и с достаточной полнотой и правильно отражает основные положения диссертации.

Основные положения и результаты диссертации прошли необходимую апробацию в выступлениях автора на международных конференциях, нашли отражение в 9 печатных работах, в том числе в 3 статьях в научных изданиях, рекомендованных ВАК.

В целом диссертация Рыжикова Н.И. «Экспериментальное исследование динамики захвата частиц и изменения проницаемости при фильтрации суспензии через пористую среду» является **законченной научно-квалификационной работой**, имеющей теоретическую и практическую ценность и отвечающей требованиям п.9 Положения ВАК о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемых к кандидатским диссертациям.

В представленной работе содержится решение задачи, имеющее существенное значение для развития физических представлений о процессе течения суспензий в пористых средах. Тематика работы соответствует паспорту специальности 25.00.10 “Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых”.

На основании вышеизложенного считаю, что автор диссертационной работы Рыжиков Никита Ильич, безусловно, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых».

**доктор физико-математических наук,
профессор**

А.Н.Филиппов

Подпись Филиппова Анатолия Николаевича, профессора кафедры высшей математики Российской государственного университета нефти и газа имени И.М.Губкина, заверяю:

