

ДИНАМИКА ФИЛЬТРАЦИИ ГОМОГЕННЫХ И ГЕТЕРОГЕННЫХ ФЛЮИДОВ В ТОНКОПОРИСТЫХ СРЕДАХ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ПАРАМЕТРАХ

Шмонов В.М., Лакштанов Л.З., Графчиков А.А., Витовтова В.М. (ИЭМ РАН)

shmonov@iem.ac.ru; shmslava@yandex.ru

Ключевые слова: *проницаемость, пористость, фильтрация, водонасыщенность пород*

Введение

Гетерофазное состояние гидротермальных флюидов является обычным для широкого интервала Т-Р-условий земной коры. Пространственное разделение фаз может приводить к столь значительному изменению фазовых насыщенных (например, водонасыщенности), что в пределах единого потока флюида величина отношения флюид – порода будет претерпевать значительные изменения. Настоящее исследование посвящено особому случаю гетерофазной фильтрации, а именно, двухфазной фильтрации системы вода – газ через контакт пористых сред различной проницаемости. Такая слоистость в реальных условиях является скорее правилом, чем исключением, и имеет место во многих типах стратифицированных пород, причем разница в проницаемостях контактирующих пород может достигать нескольких порядков.

Результаты теоретического моделирования

Предварительный анализ особенностей транспортных процессов при двухфазной фильтрации показывает, что функция водонасыщенности может быть разрывной на границах сред различной проницаемости а) при учете гравитационного поля, б) при учете капиллярных эффектов (разности капиллярных давлений в пористых слоях различной проницаемости) и в) при учете неравновесного выделения газа при фильтрации

Значения водонасыщенности, w , на границах раздела слева и справа от контакта пористых слоев определяются уравнениями

$$w_{n, n+1} = -v\eta/K_n(\text{grad}_{n, n+1} P + \rho_l g \sin \theta)^{-1} \quad \text{и} \quad w_{n+1, n} = -v\eta/K_{n+1}(\text{grad}_{n+1, n} P + \rho_l g \sin \theta)^{-1}$$

где v , η , $\text{grad}_{n, n+1} P$ и ρ_l есть скорость, вязкость, градиент давления и плотность флюида соответственно, K – проницаемость, g – нормальное ускорение и θ – угол смачивания.

Результаты модельных расчетов показали [1,2,3,4], что важнейшим условием возникновения скачка водонасыщенности на контакте пористых слоев различной проницаемости является порядок расположения слоев. Если при фильтрации снизу вверх менее проницаемый слой расположен за более проницаемым, величина возникающего скачка водонасыщенности пренебрежимо мала (менее 0.001), и водонасыщенность постепенно уменьшается в направлении фильтрации практически так же, как если бы вся пористая среда являлась однородной, с проницаемостью, равной таковой для менее проницаемого слоя. При обратном расположении слоев, когда более проницаемый слой расположен за менее проницаемым, на контактах слоев возникают скачки водонасыщенности, то есть значения водонасыщенности слева и справа от границы между слоями различны, и эта разница в зависимости от условий может достигать значительных величин.

Масштабы скачка зависят от проницаемости слоев и соотношения их мощностей. В связи с этим эксперименты были проведены с вертикальным расположением фильтров различной длины и контрастной проницаемости.

Техника эксперимента

Эксперименты проведены на многоэлектродной ячейке, специально разработанной для изучения динамики изменения водонасыщенности породы по электропроводности порового раствора одновременно в нескольких его сечениях [5]. Величину водонасыщенности оценивали по величине электрического сопротивления всего фильтра или его фрагментов. Такой подход позволяет определять локализацию и развитие во времени скачка водонасыщенности. Все опыты проводились при комнатной температуре и давлении флюида до 60 ат. В экспериментах использовались фильтры из гранита (проницаемость $k = n \times 10^{-17} - n \times 10^{-18} \text{ м}^2$; пористость 0.4 - 1.48%) и песчаника (проницаемость $k = 4 \times 10^{-15} \text{ м}^2$; пористость 19%). Фильтры, представляли собой цилиндры диаметром 13.6 мм и высотой от 6 до 28 мм [6]. Чтобы смоделировать влияние

гравитационной составляющей фильтрация проведена снизу вверх с составными фильтрами расположенными вертикально.

Экспериментальные результаты

Эксперименты были проведены с фильтрами, составленными из пары гранит-песчаник (опыт № 1932) и с трехслойными фильтрами гранит-песчаник-гранит (опыт № 1933а и №1935). Ниже приведены результаты экспериментов.

Опыт №1932. В опыте 1932 фильтр был составлен из гранита 3-82а/96 расположенного снизу и песчаника 1р-а расположенного сверху. На боковой поверхности гранита на контакте с песчаником был смонтирован один электрод (№ 4). На боковой поверхности песчаника были смонтированы две пары электродов. Первая пара (№ 3) ближе к контакту песчаника с гранитом, а вторая пара (№ 2) - посередине образца песчаника.

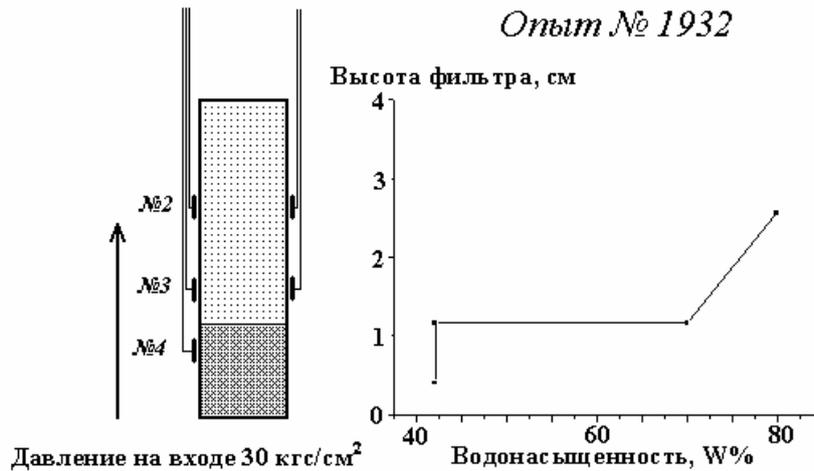


Рис.1.

Электрод (№4) в граните находился на противоположной от электрода (№3) стороне фильтра. Водонасыщенность в песчанике выше, чем в перекрестном сечении песчаник-гранит (линия № 4-3). Это свидетельствует о наличии скачка водонасыщенности на границе гранит - песчаник. Результаты теоретического моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Опыт №1933а. В опыте 1933а образец песчаника 1р-в был помещен между двумя образцами гранитов имеющих близкую проницаемость: 3-82а/96 и 3-773/275. Гранит (3-773/275) находился над песчаником. Измерения проведены при давлении флюида на входе в фильтр 3.9, 6.5, 9.9, 14.5, 19.7, 25.9, 31.2, 38.7 и 55.0 кг/см². При Р выше 10 кг/см² водонасыщенность песчаника оставалась почти неизменной. В тоже время в гранитах фиксировалось устойчивое ее падение, обусловленное ростом количества газовой фазы с ростом давления на входе в фильтр.

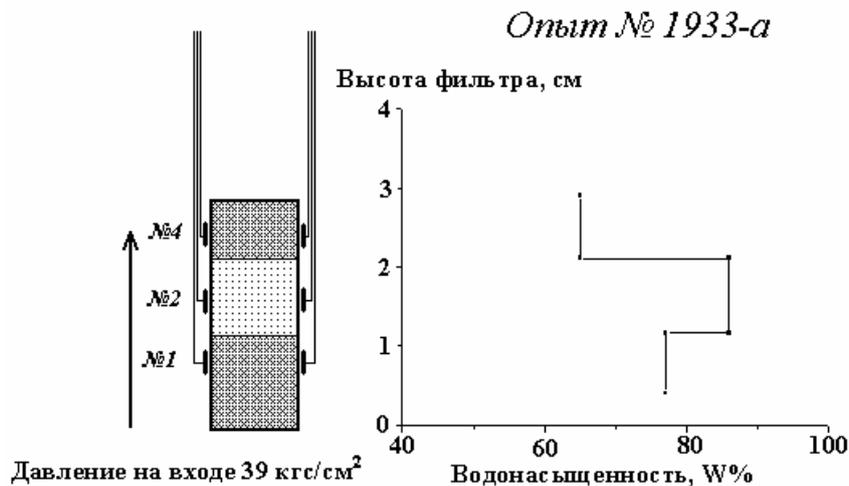


Рис.2.

Тем не менее, измерения зафиксировали более высокую величину водонасыщенности в песчанике по сравнению с таковой в выше- и нижележащих образцов гранитов. Результат оп.1933а показывает наличие скачка водонасыщенности на границах между образцами песчаника и гранита, который хорошо согласуется с теоретически предсказанным.

Опыт №1935. Как уже отмечалось, величина скачка водонасыщенности сильно зависит от соотношения длин первого и последующих фильтров. В опыте 1935 образец песчаника 1р-с был помещен между двумя образцами гранитов (577/1 и 3-8/96), но длина нижнего гранита была больше в два раза, чем в предыдущем опыте, а длина песчаника и верхнего гранита - примерно в два раза меньше. Измерения проведены при Р флюида на входе в фильтр 30.3 кг/см^2 . На рис.3 показано распределение водонасыщенности составного фильтра.

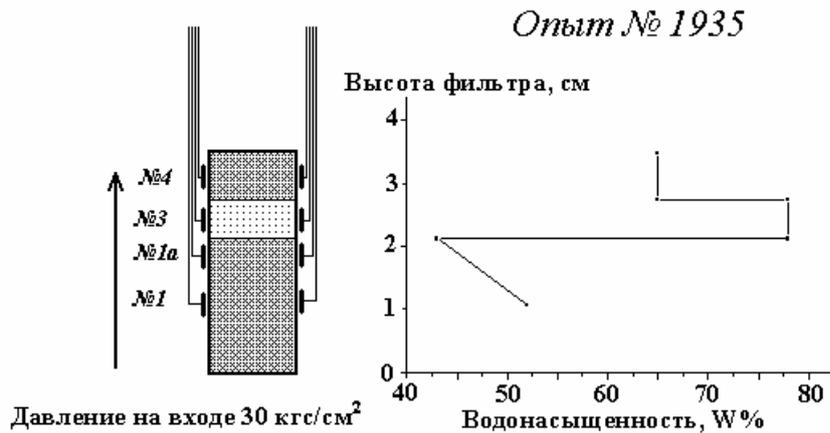


Рис. 3.

Измерения зафиксировали более высокую величину водонасыщенности в песчанике по сравнению с водонасыщенностью выше- и нижележащих образцов гранитов. Однако существуют и отличия от опыта 1933а. Прежде всего, величина водонасыщенности в песчанике (№3) имеет несколько меньшее значение. Но при этом она отличается от водонасыщенности нижнего гранита (№1а) на большую величину, чем в оп.1933а, то есть наблюдается больший скачок водонасыщенности. Результат оп.1935 теоретический вывод о том, что величина скачка водонасыщенности зависит от длины фильтров.

Выводы

1. Результаты экспериментов показывают, что профиль водонасыщенности по длине фильтра, составленного из чередующихся образцов горных пород различной проницаемости, имеет вид, характерный для гравитационного механизма возникновения скачков, а именно, водонасыщенность на контакте со стороны более проницаемого слоя всегда выше.

2. Возникающие на границах скачки водонасыщенности фактически определяют уровень водонасыщенности в пределах отдельных слоев и, таким образом, - возможную многократную смену режимов фильтрации (с породо - на флюидодоминирующий и обратно) в пределах единого фильтрационного потока флюидов.

Исследования проведены при финансовой поддержке проекта РФФИ 08-05-00855, программ ОНЗ РАН №8 и № 16

Литература

1. Лакитанов Л.З., Копылов П.Н. Разделение растворов электролитов при фильтрации через пористые среды // Химия и технология воды. 1975. № 4. С. 8-11.

2. Кошемчук С.К., Алехин Ю.В., Лакитанов Л.З. Результаты исследования процессов гетерофазной фильтрации // В кн.: «Экспериментальные проблемы геологии» // М.: Наука. 1994. С. 556-570.

3. Кошемчук С.К., Магомедов М.А., Алехин Ю.В., Лакитанов Л.З. Процессы разделения при стационарной двухфазной фильтрации в системах газ - вода // Геохимия. 1995. № 3. С. 441-455.

4. Лакиitanов Л.З., Графчиков А.А., Шмонов В.М. Динамика фильтрации гомогенных и гетерогенных флюидов в тонкопористых средах при повышенных параметрах. - Экспериментальные исследования эндогенных процессов. Сборник трудов 2003-2008 гг. // Черногoловка. 2008. С. 264-274.

5. Графчиков А.А., Шмонов В.М. Создание экспериментальной базы для изучения транспортных свойств горных пород и взаимодействия флюид - порода. В кн.: «Геология, геохимия и геофизика на рубеже XX и XXI веков» // М.: ООО «Связь-Принт». 2002. Т. 2. С. 74-75.

6. Шмонов В.М., Витовтова В.М., Жариков А.В. Флюидная проницаемость пород земной коры // М.: Научный Мир. 2002. 216с.

Вестник Отделения наук о Земле РАН - №1(27) 2009

Информационный бюллетень Ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии 2009 года (ЕСЭМПГ-2009)

URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2009/informbul-1_2009/geomaterial-8.pdf

Опубликовано 1 сентября 2009 г.

© Вестник Отделения наук о Земле РАН, 1997 (год основания), 2009

При полном или частичном использовании материалов публикаций журнала, ссылка на «Вестник Отделения наук о Земле РАН» обязательна