

УТОЧНЕНИЕ ТИПА АНИЗОТРОПИИ СЛОЖНОПОСТРОЕННЫХ КОЛЛЕКТОРОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ФИЛЬТРАЦИИ ПРОПИТКИ

С.П. Цыбульский¹, М.Н. Кравченко¹, В.М. Максимов²
1 – РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина; 2 – ИПНГ РАН
e-mail: vmaks@ipng.ru

Развитие методов лабораторного определения фильтрационных свойств анизотропных коллекторов представляет собой актуальную задачу в плане поиска инновационных подходов к разработке как традиционных, но сложнопостроенных пластов, так и месторождений нетрадиционных углеводородных ресурсов. Геологические условия формирования углеводородов существенно влияют на тип строения коллектора и, соответственно, тип анизотропии коллектора. В последнее время большой интерес обращен к выявлению латеральной анизотропии коллекторов. Лабораторные исследования на керновом материале позволяют установить факт наличия латеральной анизотропии коллектора.

В данной работе приведены результаты комплексных лабораторных исследований керна ачимовских отложений по методике, позволяющей определить тип симметрии коллектора. Исследования включали в себя измерение скорости прохождения звуковой волны через боковую поверхность полноразмерного керна, изготовление ориентированных образцов керна стандартных размеров и гидродинамические эксперименты на керне. Подготовленные из полноразмерного керна образцы были ориентированы по главным направлениям, установленным по результатам первоначального прозвучивания. В предыдущих работах авторов [1–3] подробно описана методика эксперимента по конкретизации типа анизотропии, дан анализ результатов исследований непосредственно образцов породы ачимовских отложений. В данной работе показано, что необходимо не только установить сам факт наличия анизотропии, но и провести более подробные гидродинамические исследования на ориентированных образцах для конкретизации типа анизотропии, что чрезвычайно важно для более точного описания процесса фильтрации флюида через коллектор.

По методике, использованной ранее в других работах [2, 4], из полноразмерного образца керна было подготовлено четыре образца стандартного размера (30x30 мм). Они позволяют определить тензор коэффициентов проницаемости и проверить его выбор. Кроме того, для определения типа симметрии фильтрационных свойств из

полноразмерного образца был высверлен пятый образец. Его ось равно ориентирована относительно главных осей тензора коэффициентов проницаемости и задается в главных осях вектором:

$$\vec{n} = \left(\frac{\sqrt{3}}{3}, \frac{\sqrt{3}}{3}, \frac{\sqrt{3}}{3} \right).$$

Пятый образец необходим для полного анализа нелинейных законов фильтрации для моноклинного и ортотропного типов анизотропии, рассмотренных в [5, 6]. По результатам данного анализа можно будет судить о принадлежности исследуемого образца к определенному типу симметрии фильтрационных свойств.

Оценка результатов экспериментов, проведенных на пяти подготовленных описанным выше способом образцах, позволяет уточнить тип анизотропии.

Далее проводилось несколько серий экспериментов. В первой серии на приборе «Поромер» была измерена пористость. В табл. 1 приведены результаты измерения пористости для пяти образцов Ачимовского месторождения.

Таблица 1

Результаты измерения пористости

Направление / № образца	Max (X) / №1	Min (Y) / №2	45° / №4	Верт. (Z) / №3	№5
Пористость, %	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5

Как видим, все образцы характеризуются одинаковой пористостью (разница в значениях пористости проявлялась только во втором знаке после запятой), что можно отнести к допустимой ошибке эксперимента.

Во второй серии на приборе «Дарсиметр» измерялась проницаемость каждого из пяти образцов. В табл. 2 показаны результаты измерения проницаемости на тех же пяти ориентированных образцах.

Как мы видим, максимальное значение проницаемости соответствует по направлению минимальной скорости прохождения звуковой волны. Это объясняется тем, что скорость распространения звуковой волны по скелету породы выше, чем в поровом пространстве образца, где и происходит фильтрация.

Результаты измерения проницаемости

Направление / № образца	Max (X) / №1	Min (Y) / №2	45° / №4	Верт. (Z) / №3	n_i / №5
Проницаемость, мД	3,70	4,14	3,74	2,73	2,94

По используемой методике, образец №4 является контрольным, так как его проницаемость можно не только измерить, но и рассчитать теоретически.

В общем виде проницаемость вдоль заданного направления определяется по формуле:

$$k_{ij} n_i n_j = k_{(1)} n_1^2 + k_{(2)} n_2^2 + k_{(3)} n_3^2. \quad (1)$$

Поскольку образец №4 был изготовлен под углом 45° к главным осям, формула (1) преобразуется к следующему виду:

$$k_1 \cos^2 \alpha + k_2 \sin^2 \beta = \frac{1}{2}(k_1 + k_2), \quad (2)$$

где k_1 , k_2 – значения проницаемости для образцов №1 и №2 соответственно; α , β – углы поворота к главным направлениям тензора коэффициентов проницаемости. Таким образом, проницаемость образца равна среднему арифметическому максимального и минимального значений проницаемости. Так, расчетное значение проницаемости составило 3,92 мД; экспериментальное значение равно 3,74 мД. Отличия незначительны, следовательно, теория подтверждается экспериментом.

Далее вернемся к вопросу о различии между типами анизотропии. В работах [5, 6] был проведен анализ фильтрационных свойств для различных групп симметрий (моноклинная, ортотропная). Также рассматривались нелинейные законы фильтрации для пористых сред, обладающих моноклинной и ортотропной симметрией фильтрационных свойств, и для различных групп симметрий (2, m, 2:m). Авторами был сделан вывод, что при анализе результатов измерений проницаемости на высоких скоростях фильтрации, где нарушается закон Дарси, можно определить, к какому типу симметрии относится исследуемый керновый материал. Также было установлено, что необходимо измерить проницаемость на образцах в прямом и обратном направлениях. Именно различие между

значениями проницаемости для каждого из пяти образцов может показать принадлежность пористой среды к определенному типу симметрии фильтрационных свойств.

Для проверки данного утверждения был предложен эксперимент, который можно провести на реальном керне. Ранее подобные дополнительные серии экспериментов не проводились.

На рис. 1 (Приложение) показана схема, основным элементом которой является кернодержатель, внутри которого находится резиновая манжета, в которую помещается поочередно каждый из пяти образцов керна. Имитация горного давления для соответствия промышленным условиям создается с помощью насоса и контролируется манометром. Расход газа регулируется с помощью редуктора.

В ходе эксперимента значение горного давления соответствовало пластовому для ачимовских отложений (60 МПа). В качестве фильтрата использовался азот. Всего было проделано 10 опытов. Для каждого из ранее подготовленных пяти образцов проводился фильтрационный эксперимент в двух направлениях: прямом и обратном. Перепад давления на входе и на выходе был одинаков для всех опытов. Расход контролировался с помощью трех электронных высокоточных расходомеров с разным диапазоном действия.

Перед экспериментом образцы были экстрагированы и высушены до постоянного веса. В начале эксперимента азот подавался с небольшим расходом. Далее с определенным шагом расход увеличивался. В определенный момент было зафиксировано отклонение от закона Дарси, что означало начало фильтрации по нелинейному закону. Далее направление фильтрации азота через образец менялось на обратное, и эксперимент повторялся.

В ходе проделанных опытов была измерена проницаемость при нелинейной фильтрации для всех десяти случаев. На всех образцах, кроме №1, разница между значениями проницаемости при фильтрации в разных направлениях не проявлялась (менее 0,1 мД, то есть в пределах погрешности) или не имела какой-либо закономерности. На образце №1, который был изготовлен по направлению максимальной скорости прохождения звуковой волны, разница ощутимо проявилась. В табл. 3 приведены результаты измерения расхода (Q , см³/мин) и направленной проницаемости (K , мД) на образце №1.

Результаты измерения расхода и направленной проницаемости на образце №1

№ опыта	Q, см ³ /мин	К, мД прямое направление	К, мД обратное направление	Разница, %
1	6	2,58	2,57	0,4
2	11,33	2,39	2,56	7,1
3	25,57	2,25	2,4	6,7
4	35,10	2,13	2,26	6,1
5	47,00	2,14	2,27	6,1
6	57,66	2,06	2,27	10,2
7	70,28	1,95	2,15	10,3
8	89,65	2,07	1,89	8,7
9	100,72	1,87	1,72	8,0
10	113,41	1,78	1,95	9,6

Результаты фильтрационных экспериментов для всех пяти образцов также отражены на рис. 2 (прямая фильтрация). Соответственно, разница в значениях проницаемости при измерении в разных направлениях составила около 10%. Установленная проницаемость во всех случаях – около 2 мД.

Отдельно для образца №1 результаты приведены ниже на рис. 3. Как видим, при расходе наблюдается отклонение от линейного закона Дарси. Синяя пунктирная линия показывает, что для образца №1 нарушение закона Дарси происходит при расходе более 25 см³/мин.

Сравнительный анализ зависимости градиента давления от расхода для остальных образцов также представлен на рис. 3. Вертикальными линиями разных цветов показаны значения расходов для каждого из других исследуемых образцов – цвета на рис. 2 и 3 коррелируют. Можно заметить, что данный переход происходит при одинаковом перепаде давления для всех пяти образцов. Расход при этом различается, так как значение проницаемости для всех образцов разное.

По теории, описанной в работах [5, 6], можно уточнить тип анизотропии именно исходя из данных по фильтрации, а именно по измерению проницаемости и нахождению предела выполнимости закона Дарси на всех пяти образцах в различных направлениях. Поскольку эффект асимметрии проявился именно на образце №1, можно предположить, что в исследуемом образце керна наблюдается моноклидная симметрия ФЕС.

Исследования фильтрации с нарушением закона Дарси в ачимовских отложениях также проводились другими авторами [7–9]. В работе [8] было исследовано несколько образцов ачимовских отложений с разной проницаемостью. Эксперимент проводился при пластовых давлении и температуре. По полученным результатам был сделан вывод, что в реальных пластах фиксируется нелинейная фильтрация. Однако не было обращено внимание на связь подобных гидродинамических исследований с проблемой анизотропии. Именно на этот факт необходимо обращать пристальное внимание [10].

Статья написана в рамках выполнения Программы Президиума РАН на 2017 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Dmitriev M.N., Kravchenko M.N.* Rapoport–Leas model for two-phase flow in anisotropic porous media // Proc. 13th Eur. Conf. on the Math. of Oil Recov. (XIII), Biarritz, France, 10–13 Sept. 2012. S.l., 2012. P. 45–57.
2. *Dmitriev N.M., Kravchenko M.N., Dmitriev M.N., Tsybulsky S.P.* Complex research of reservoir properties on cores from Achimov deposits // Exploration and production technical conference and exhibition, 14–16 October 2014, Moscow. SPE 171259. 9 с.
3. *Максимов В.М., Дмитриев М.Н., Кравченко М.Н., Мурадов А.В., Кузьмичев А.Н.* Двухфазная фильтрация в анизотропных средах. Теория и эксперимент // Сборник докладов XI Всероссийского съезда по теоретической и прикладной механике, Казань, 20–24 августа 2015. Казань, 2015. С. 1201–1203.
4. *Кадет В.В., Дмитриев Н.М., Семенов А.А.* Комплексные лабораторные исследования керна для определения фильтрационно-емкостных свойств анизотропных пористых сред // Интеграл. 2006. № 8. Ноябрь–Декабрь. С. 26–27.
5. *Дмитриев Н.М., Мурадов А.А., Семенов А.А.* Нелинейные законы фильтрации для ортотропных пористых сред // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2008. № 5. С. 83–89.
6. *Максимов В.М., Дмитриев Н.М.* Исследование нелинейных законов фильтрации для анизотропных сред, проявляющих моноклидную симметрию фильтрационных

свойств [Электронный ресурс] // Георесурсы, геоэнергетика, геополитика: Электрон. науч. журн. 2014. Вып. 1(9). 12 с. – Режим доступа: <http://www.oilgasjournal.ru> (Дата обращения 18.12.2017).

7. *Лохин В.В., Седов Л.И.* Нелинейные тензорные функции от нескольких тензорных аргументов // ПММ. 1963. Т. 27, вып. 3. С. 393–417.

8. *Моисеев М.А.* и др. Лабораторные исследования высокоскоростной фильтрации газа на образцах керна ачимовских отложений // Территория Нефтегаз. 2010. № 8. С. 52–54.

9. *Лебединец Н.П.* О вытеснении нефти из трещиновато-кавернозных коллекторов при нелинейном режиме фильтрации (в порядке обсуждения) // Нефт. хоз-во. 2011. № 2. С. 68–69.

10. *Максимов В.М., Дмитриев Н.М., Дмитриев М.Н.* Новый подход к определению групп симметрии фильтрационных свойств пористых сред в нелинейных законах фильтрации // Докл. АН. 2017. Т. 473, № 4. С. 426–430.

ПРИЛОЖЕНИЕ

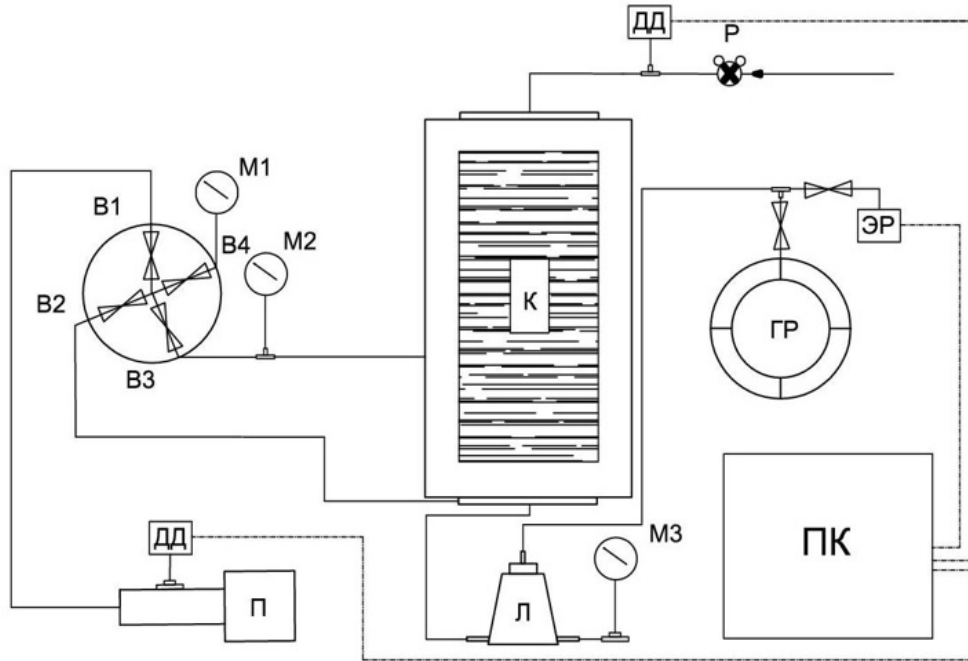


Рис. 1. Схема установки: К – кернодержатель; ГР – газовый расходомер; Р – редуктор; В – вентиль; М – манометр; П – гидравлический пресс; ПК – персональный компьютер; ДД – датчик давления; ЭР – расходомер

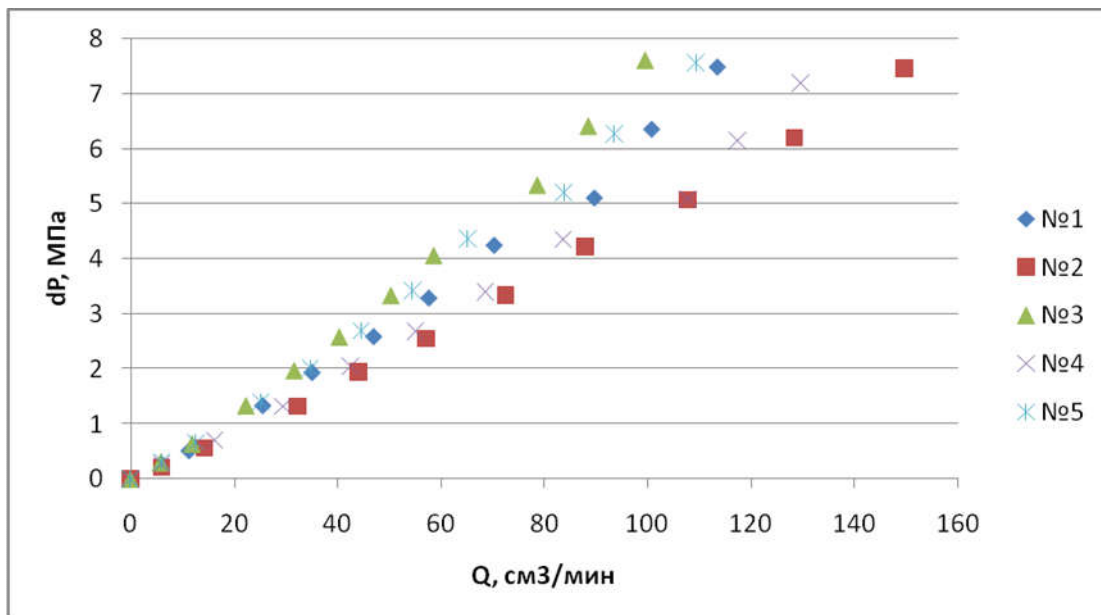


Рис. 2. Результаты эксперимента для всех пяти образцов

dP, МПа

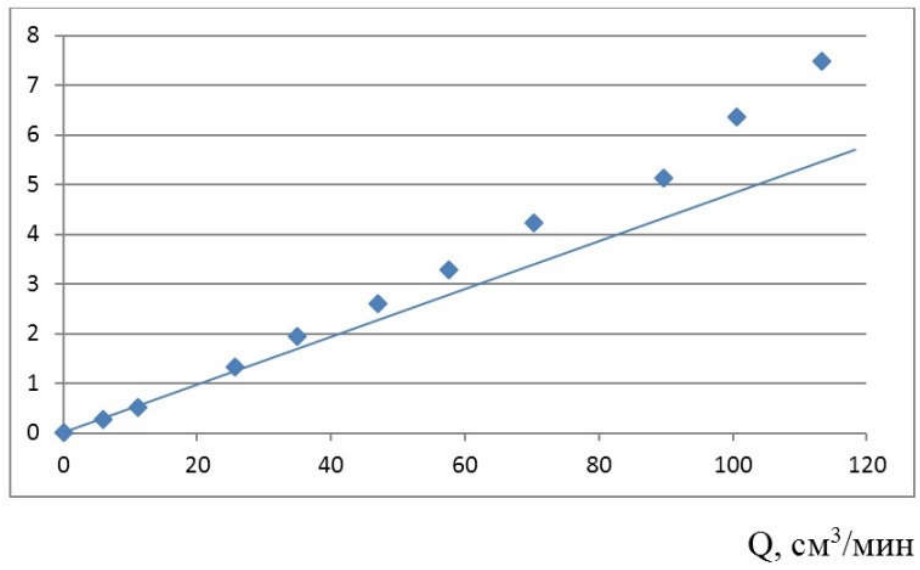


Рис. 3. Отклонение от закона Дарси