

## НОВЫЙ МЕТОД ЛАБОРАТОРНОГО АНАЛИЗА КЕРНА ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ОРТОТРОПНОЙ И МОНОКЛИННОЙ СИММЕТРИИ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ

М.Н. Кравченко<sup>1</sup>, В.М. Максимов<sup>2</sup>, С.П. Цыбульский<sup>1</sup>  
1 – РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина,  
2 – Институт проблем нефти и газа РАН  
e-mail: dep.ngipg@yandex.ru, privati@list.ru, vmaks@ipng.ru

### Введение

Одной из важных характеристик проводимости коллектора, входящих в уравнение движения флюидов в пористой среде (закон Дарси), является коэффициент проницаемости (или фильтрационных сопротивлений), представляемый в анизотропных средах симметричным тензором второго ранга  $k_{ij}$  (или  $r_{ij}$ ):

$$w_i = -\frac{k_{ij}}{\mu} \cdot \nabla_j p \text{ или } \nabla_i p = -\mu r_{ij} w_j$$

( $\nabla_i p$  и  $w_i$  – компоненты векторов градиента давления и скорости фильтрации соответственно;  $\mu$  – вязкость жидкости).

Анизотропия, определяемая по существующим методикам, может обладать ортотропной или моноклинной симметрией фильтрационных свойств. Для первой из них тензор абсолютной проницаемости имеет диагональный вид с главными значениями  $k_1 \neq k_2 \neq k_3$ . Для моноклинной симметрии фильтрационных свойств проявляется латеральная анизотропия в плоскости напластования, и тензор проницаемости содержит дополнительный «перекрестный» компонент  $k_{12} \neq 0$  [1]. В работе [2] путем теоретического исследования фильтрационных свойств горной породы определены критерии различия между этими группами симметрии в случае нарушения закона Дарси при больших скоростях течения, когда проявляются эффекты асимметрии фильтрационных свойств при изменении направления течения. Для получения дополнительных результатов необходимо проведение новой серии экспериментов.

### Подготовка экспериментов

Развитие методов лабораторного определения фильтрационных свойств анизотропных коллекторов представляет собой актуальную задачу при поиске инновационных подходов к разработке как традиционных, но сложно построенных пластов, так и месторождений нетрадиционных углеводородных ресурсов. Геологические условия формирования коллектора углеводородов существенно влияют на его структуру

и, соответственно, тип анизотропии. В последнее время большое внимание обращено на выявление латеральной анизотропии коллекторов. Лабораторные исследования на керновом материале позволяют установить факт наличия латеральной анизотропии коллектора.

В настоящей работе приведены результаты комплексных лабораторных исследований керна ачимовских отложений по методике [3], которая позволила определить тип симметрии коллектора. Исследования включали в себя измерение скорости прохождения звуковой волны через боковую поверхность полноразмерного керна, изготовление ориентированных образцов 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 [3, 4] подробно описана методика эксперимента по конкретизации типа анизотропии, дан анализ результатов исследований непосредственно образцов породы ачимовских отложений. В данной работе показано, что, помимо установления самого факта анизотропии, необходима конкретизация типа анизотропии путем проведения более подробных гидродинамических исследований на ориентированных образцах, что чрезвычайно важно для более точного описания процесса фильтрации флюида через коллектор.

По методике, использованной ранее в другой работе [4], из полноразмерного образца керна было подготовлено четыре образца стандартного размера (30×30 мм), позволяющие определить тензор 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 проницаемости и задана 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 нелинейного закона фильтрации для моноклинного и ортотропного типа анизотропии. Вывод необходимых формул представлен в статьях [5, 6]. По результатам данного анализа можно судить о принадлежности исследуемого образца керна к определенному типу симметрии фильтрационных свойств.

### Проведение экспериментов

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

Далее проводится 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

#### Значения коэффициента пористости, измеренного по различным направлениям

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 следует из табл. 1, все образцы характеризуются одинаковой пористостью. 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.

Таблица 2

#### Значения коэффициента проницаемости, измеренного по различным направлениям

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

Как следует из табл. 2, максимальное значение коэффициента проницаемости соответствует направлению минимальной скорости прохождения звуковой волны (образец № 2).

В используемой методике образец №4 является контрольным, его измеренную проницаемость можно сравнить с теоретически рассчитанным значением.

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  $45^\circ$  к главным осям, формула 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,  $\alpha, \beta$  – углы поворота к главным направлениям тензора коэффициентов проницаемости. Иными словами, значение проницаемости такого образца равно среднему арифметическому между максимальным и минимальным значениями проницаемости. Так, расчетное значение проницаемости составило 3,92 мД, экспериментальное значение равно 3,74 мД. Различия незначительны, следовательно, теория подтверждается экспериментом.

#### **Новая серия экспериментов**

Вернемся к вопросу о различии между типами анизотропии. В работах [2, 5, 6] был проведен анализ фильтрационных свойств для различных групп симметрий (моноклиная, ортотропная). Рассмотрены нелинейные законы фильтрации для пористых сред, обладающих моноклиной и ортотропной симметрией фильтрационных свойств, и для различных групп симметрий (2, m, 2 : m). Авторами был сделан вывод, что при анализе результатов измерений проницаемости при высоких скоростях фильтрации, когда нарушается закон Дарси, возможно определение типа симметрии исследуемого кернового материала. Было установлено также, что необходимо измерять 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 на реальном керне. Ранее подобные дополнительные серии экспериментов не проводились.

На рис. 1 приведена схема установки, основным элементом которой является кернодержатель, в резиновую манжету которого поочередно помещается каждый из пяти образцов керна. Имитация горного давления для соответствия промышленным условиям производится с помощью насоса, контроль давления осуществляется манометром. Расход газа регулируется с помощью редуктора.

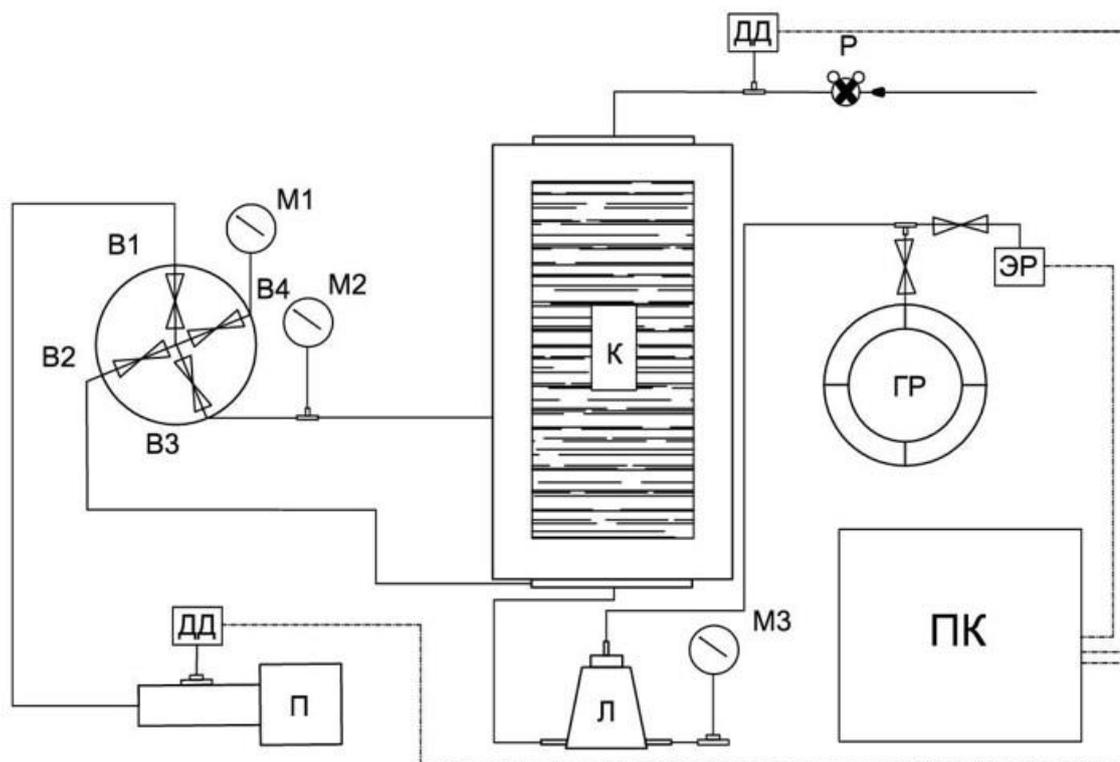


Рис. 1. Схема установки: К – кернодержатель; ГР – газовый расходомер; Р – редуктор; В – вентиль; М – манометр; П – гидравлический пресс; ПК – персональный компьютер; ДД – датчик давления; ЭР – расходомер

В ходе эксперимента значение горного давления соответствовало пластовому для ачимовских отложений (60 МПа). В качестве фильтрата использовался азот. Всего было проведено 10 опытов. Для каждого из ранее подготовленных пяти образцов осуществлялся 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 фиксировалось отклонение от закона Дарси, что соответствует началу фильтрации по нелинейному закону. Затем направление фильтрации азота через образец менялось на противоположное, и эксперимент повторялся.

В ходе проделанных опытов была измерена проницаемость при нелинейной фильтрации для всех 10 случаев. На всех образцах, кроме образца № 1, разница между значениями проницаемости при фильтрации в разных направлениях не проявлялась (менее 0.1 мД, т.е. в пределах погрешности измерения) или не имела какой-либо закономерности. На образце №1, который был изготовлен по направлению максимальной скорости прохождения звуковой волны, разница ощутимо заметна. В табл. 3 приведены результаты измерения расхода ( $Q$ , см<sup>3</sup>/мин) и направленной проницаемости ( $K$ , мД) на образце №1.

Таблица 3

**Результаты фильтрационных экспериментов при различных расходах и направлениях**

№ опыта	$Q$ , см <sup>3</sup> /мин	$K$ , мД прямое направление	$K$ , 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	35,1	2,13	2,26	6,1
5	47	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, дисперсия в значении проницаемости при измерении в разных направлениях составила около 10%. А установленная проницаемость во всех случаях составила около 2 мД.

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

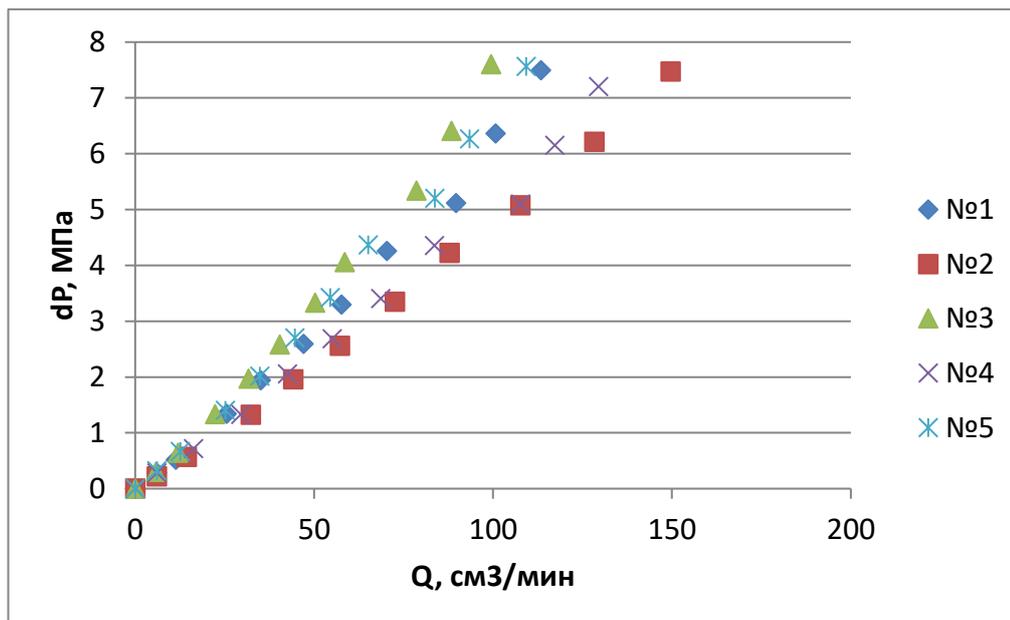


Рис. 2. Результаты эксперимента для всех пяти образцов

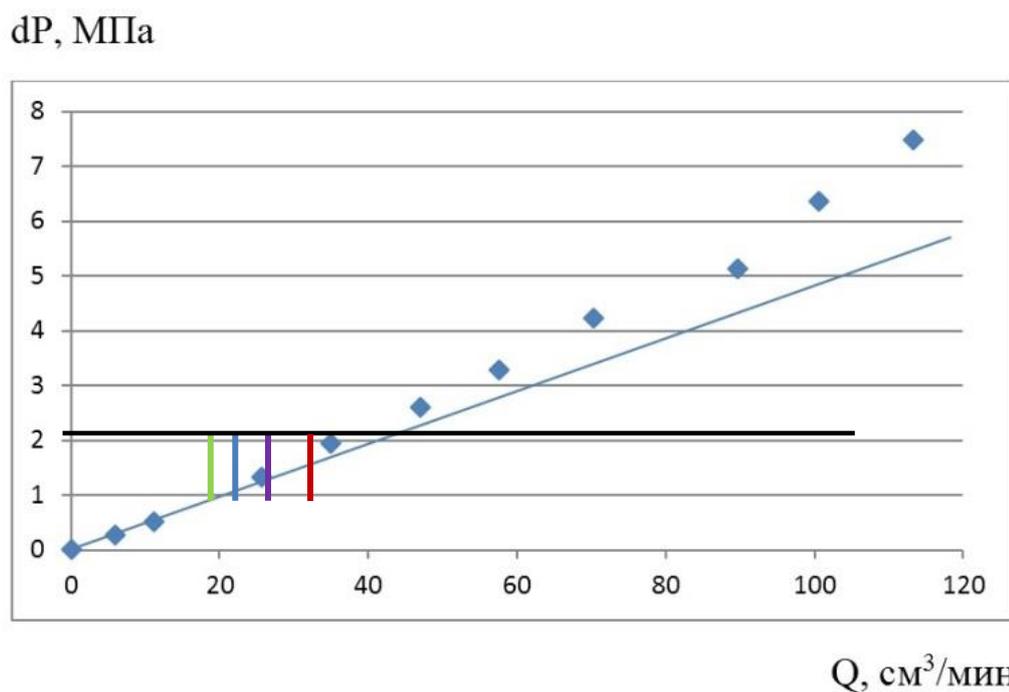


Рис. 3. Отклонение от закона Дарси

Сравнительный анализ зависимости перепада 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 различен, так как значение проницаемости для всех образцов разное.

По теории, описанной в работе [2], можно уточнить тип анизотропии 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 ачимовского керна наблюдается моноклиная симметрия фильтрационно-емкостных свойств.

Исследования фильтрации с нарушением закона Дарси в ачимовских отложениях проводились также и другими авторами [7–8]. 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 о наличии в реальных пластах нелинейной фильтрации, однако не была отмечена связь проведенных гидродинамических исследований с проблемой анизотропии.

*Статья написана в рамках выполнения государственного задания (тема «Исследование термодинамических свойств углеводородных смесей в околокритической области и моделирование гидротермодинамических, физико-химических и геомеханических процессов в геосредах с целью повышения эффективности разработки трудноизвлекаемых запасов нефти и газа», № АААА-А16-116030110081-2).*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Maksimov V.M., Dmitriev N.M., Kuz'michev A.N.* Tensor representation of capillary model of a porous media (theory and experiment) // *Georesourcy = Georesources*. 2016. Vol. 18, No. 3, pt. 1. P. 166–170.
2. *Maksimov V.M., Dmitriev N.M., Dmitriev M.N.* A new approach to determining symmetry groups of filtration properties of porous media in nonlinear filtration laws // *Dokl. Physics*. 2017. Vol. 62, No. 4. P. 190–193.
3. *Dmitriev N.M., Kravchenko 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 p.
4. *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.

5. *Дмитриев Н.М., Максимов В.М.* Нелинейные законы фильтрации для анизотропных пористых сред // Прикл. математика и механика. 2001. Т. 65, № 6. С. 963–970.

6. *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.

7. *Моисеев М.А., Моисеев В.Д., Казак А.В.* и др. Лабораторные исследования высокоскоростной фильтрации газа на образцах керна ачимовских отложений // Территория НЕФТЕГАЗ. 2010. № 8. С. 52–54.

8. *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.