

# Теоретические и экспериментальные методы идентификации группы симметрии (типа анизотропии) фильтрационных свойств в низкопроницаемых средах

**В.М. Максимов**

Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва

E-mail: vmaks@ipng.ru

**Аннотация.** Представлена систематизация результатов исследования анизотропного керн. Дана классификация типов анизотропии и их тензорное представление. Предложены принципиальные схемы определения компонент тензора проницаемости на керне. Проведен теоретический анализ фильтрационных свойств пористых сред для ортотропной и моноклинной групп симметрии и предложены специальные лабораторные эксперименты и критерии для установления их различия. Даны результаты лабораторных экспериментов на нелинейном законе фильтрации.

**Ключевые слова:** анизотропная среда, керн, тензор проницаемости, типы анизотропии, нелинейная фильтрация, ортотропная и моноклинная симметрия, асимметрия фильтрационных свойств.

**Для цитирования:** Максимов В.М. Теоретические и экспериментальные методы идентификации группы симметрии (типа анизотропии) фильтрационных свойств в низкопроницаемых средах // Актуальные проблемы нефти и газа. 2019. Вып. 3(26). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2019-26.art3>

## Введение

При освоении глубокозалегающих горизонтов критерием нефтегазоносности являются результаты опробования скважин и характеристики их производительности. Но это служит лишь необходимым условием. Даже отсутствие притока не может быть основанием для вывода об отсутствии коллектора. На больших глубинах в околоскважинной области происходит интенсивное изменение природных фильтрационных свойств, что отражается на процессах фильтрации и результатах опробования скважин. Поэтому исследование сложной анизотропной структуры порового пространства является важным элементом для установления наиболее эффективного направления воздействия на околоскважинную зону.

## 1. Классификация типов анизотропии и их тензорное представление

Одной из важных характеристик проводимости коллектора, входящих в уравнение движения флюидов в пористой среде (закон Дарси), является коэффициент абсолютной

проницаемости (или фильтрационных сопротивлений), представляемый в анизотропных средах симметричным тензором второго ранга  $k_{ij}$  (или  $r_{ij}$ ):

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

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

Анизотропия свойств пористой среды определена самим видом тензора  $k_{ij}$ . Для изотропных сред проницаемость одинакова по всем направлениям, т.е. тензор представляется в виде:

$$(k_{ij}) = k \delta_{ij} = \begin{pmatrix} k & 0 & 0 \\ 0 & k & 0 \\ 0 & 0 & k \end{pmatrix}, \text{ где } k \text{ – скалярное значение проницаемости.}$$

Другие возможные типы анизотропии и их представление можно охарактеризовать тензорами следующих видов [1]:

*Трансверсально-изотропная симметрия*

$$k_{ij} = k_1 \delta_{ij} + k_3 B_{ij}$$

$$(k_{ij}) = \begin{pmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_1 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 \end{pmatrix} \quad (\text{«а»})$$

*Ортотропная симметрия*

$$k_{ij} = k_1 a_i a_j + k_2 c_i c_j + k_3 b_i b_j$$

$$(k_{ij}) = \begin{pmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 \end{pmatrix} \quad (\text{«b»})$$

*Моноклиная симметрия*

$$k_{ij} = k_{11} a_i a_j + k_{13} (a_i b_j + b_i a_j) + k_{22} c_i c_j + k_{33} b_i b_j$$

$$(k_{ij}) = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & 0 \\ k_{12} & k_{22} & 0 \\ 0 & 0 & k_{33} \end{pmatrix} \quad (\text{«с»})$$

*Триклинная симметрия*

$$k_{ij} = k_{11} a_i a_j + k_{12} (a_i c_j + a_j c_i) + k_{31} (a_i b_j + a_j b_i) + k_{23} (b_i c_j + b_j c_i) + k_{22} c_i c_j + k_{33} b_i b_j$$

$$(k_{ij}) = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{12} & k_{22} & k_{23} \\ k_{13} & k_{23} & k_{33} \end{pmatrix} \quad (\ll d \gg)$$

Здесь  $k_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) – главные значения тензора  $k_{ij}$ ;  $B_{ij}$  – базисный тензор, задающий симметрию анизотропных текстур;  $a_i, c_j, b_k$  – компоненты ортов кристаллофизической системы координат  $e_i$ , для которых приняты обозначения:  $a = e_1, c = e_2, b = e_3$ .

Первый тип матриц («а») задает фильтрационные свойства трансверсально-изотропной пористой среды, у которой проницаемость в поверхностях напластования одинакова и отличается от проницаемости в направлении, перпендикулярном к поверхностям напластования. Так как матрица имеет диагональный вид, то главные направления тензора коэффициентов проницаемости известны априори: одно – перпендикулярно слоистости, два других – в плоскости слоистости.

Второй тип анизотропии («b») задает пористую среду, у которой, как и в первом случае, известны направления всех главных осей матрицы  $k_{ij}$ , но проницаемости по всем главным направлениям различны. Этот тип анизотропии называется ортотропным.

В третьем типе неизвестно положение двух главных осей, в последнем – положение всех главных осей («с» и «d», соответственно).

Третий тип анизотропии («с») задает пористую среду, в которой необходимо определить 4 компоненты тензора проницаемости. В этом случае известно положение одной из главных осей, и нужно определить положение двух других (один угол поворота лабораторной системы координат  $Oxuz$  относительно известной главной оси  $Oz$ ) и три главных значения тензора  $k_{ij}$ . Этот тип анизотропии называют моноклинной симметрией фильтрационных свойств.

В самом общем случае («d») задача сводится к определению шести компонент матрицы коэффициентов проницаемости при неизвестном направлении всех главных осей. Решение этой задачи принципиально возможно, но требует значительного увеличения числа направлений для измерения проницаемости. Этот тип анизотропии называют триклинной симметрией фильтрационных свойств.

При лабораторном измерении компонент тензора абсолютной проницаемости  $k_{ij}$  на первом этапе определяется тип анизотропии и направления главных осей тензора.

Для решения этой задачи обычно используют инструментальную технику: акустические преобразователи для регистрации скорости прохождения ультразвуковых

волн через боковую поверхность цилиндрического образца керна или специальную установку для измерения деформаций при одноосном сжатии керна.

В наших исследованиях использовался первый из этих методов. Измерения скорости ультразвуковых волн проводятся в нескольких плоскостях, перпендикулярных оси симметрии керна. Количество измерений зависит от длины исследуемого образца. В результате аппроксимации данных измерений получается замкнутая кривая (рис. 1).

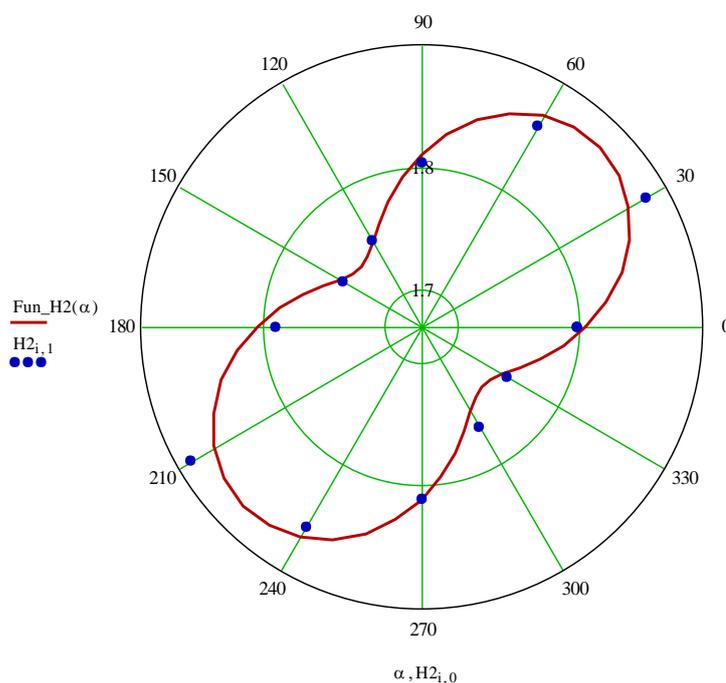


Рис. 1. Профиль скоростей прохождения ультразвуковых волн

Главные направления симметричных тензоров 2-го ранга, задающих материальные свойства, совпадают с направлениями экстремальных значений скорости ультразвуковых волн. При этом максимальным значениям скоростей волн соответствуют наименьшие значения проницаемости, и наоборот.

Таким образом, определяются главные оси тензора  $k_{ij}$  в плоскости напластования; вертикальная ось  $Oz$ , перпендикулярная оси симметрии керна, также предполагается главной (при дальнейших исследованиях это предположение обосновывается). При этом устанавливается факт наличия латеральной анизотропии  $k_{12} \neq 0$  либо ее отсутствия и, следовательно, определяется тип анизотропии.

## 2. Принципиальные схемы определения компонент тензора проницаемости на керне

После установления типа анизотропии определяются число и направление выпиливания образцов для лабораторных измерений на предварительно подготовленных образцах керна. При измерениях вдоль главных направлений тензора  $k_{ij}$  векторы скорости фильтрации и градиента давления – коллинеарны (сонаправлены) так же, как и в случае изотропной пористой среды. Поэтому при лабораторных измерениях можно пользоваться стандартными методиками [2, 3] без поправок на анизотропию. При этом проницаемость вдоль соответствующего главного направления определяется по измеренному расходу при разности давлений  $\Delta p$  на торцах образца керна по формулам:

$$k = \frac{Q\mu L}{\omega\Delta p} \text{ – для жидкости; } k = \frac{2\mu_{\text{г}}Q_{\text{ат}}L}{\omega} \cdot \frac{p_{\text{ат}}}{p_1^2 - p_2^2} \text{ – для газа,}$$

где  $\Delta p = p_1 - p_2$ ,  $Q$  – объемный расход;  $\mu$  и  $\mu_{\text{г}}$  – динамическая вязкость жидкости и газа, соответственно;  $Q_{\text{ат}}$  – расход газа при атмосферном давлении  $p_{\text{ат}}$ ;  $L$  и  $\omega$  – длина и площадь сечения образца. Если направление измерений  $n_i$  не совпадает с главным (для контрольного образца), то проницаемость вычисляется по формуле для направленной проницаемости  $k(n_i) = k_{ij}n_in_j$ , где  $n_i$  – направления главных осей.

Ниже приводятся четыре варианта схем для лабораторного определения компонент тензора  $k_{ij}$ .

1) *Трансверсально-изотропная симметрия фильтрационных свойств.* В этом случае латеральная анизотропия отсутствует, и задача сводится к определению двух главных значений тензора  $k_{ij}$  (см. формулу «а»). Минимальное число образцов равно двум. Измерения проводятся в плоскости изотропии фильтрационных свойств и в перпендикулярном к ней направлении. Схема измерений приведена на рис. 2.

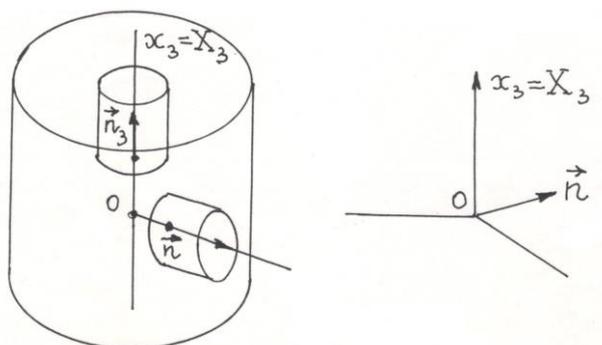


Рис. 2. Схема измерений для трансверсально-изотропной симметрии

2) *Ортотропная симметрия.* Здесь имеет место латеральная анизотропия в плоскости напластования. Известны направления всех трех главных осей тензора  $k_{ij}$ . Поэтому для задания фильтрационных свойств достаточно определить три главных значения тензора  $k_{ij}$  (см. формулу «b»). Для решения задачи необходимы три образца, выпиленных вдоль главных направлений. Принципиальная схема измерений дается на рис. 3.

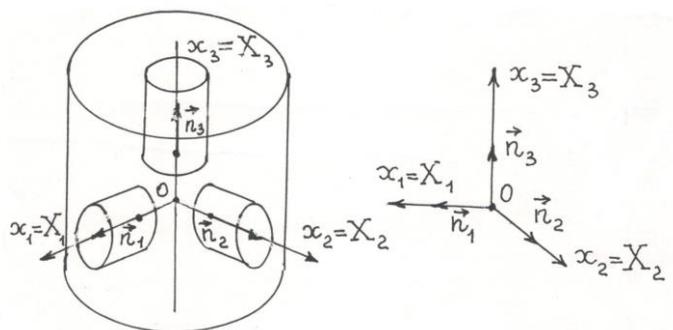


Рис. 3. Схема измерений для ортотропной симметрии

3) *Моноклиная симметрия.* В этом случае известно направление одной главной оси, перпендикулярной плоскости напластования. Имеет место латеральная анизотропия, и требуется определить четыре компоненты тензора  $k_{ij}$  (см. формулу «с»). Направления двух главных осей в плоскости напластования определяются после «прозвучивания» образца керна. Формально, минимально необходимое число образцов равно трем (для измерений вдоль главных осей), как и в предыдущем случае. Но для обоснования того, что ось симметрии керна совпадает с главным направлением  $k_{ij}$ , выпиливается еще один образец в направлении  $\vec{n}_4$  в плоскости латерали (рис. 4). Для удобства это направление можно выбрать под углом  $45^\circ$  между двумя главными направлениями в плоскости напластования. Таким образом, минимальное число измерений равно четырем (см. рис. 4).

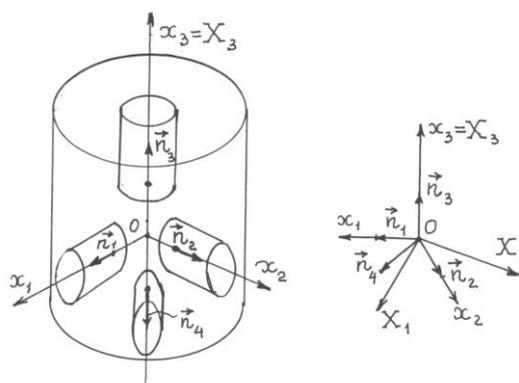


Рис. 4. Схема измерений для моноклиной симметрии

4) *Триклинная симметрия фильтрационных свойств.* Это – самый общий случай матрицы («d»), где не известно направление всех главных осей тензора  $k_{ij}$ , и задача состоит в определении его шести компонент. Минимальное число образцов равно шести для измерений вдоль шести независимых направлений. Направления выпиливания образцов можно выбрать следующим образом: два – взаимоперпендикулярно в плоскости напластования и одно – перпендикулярно плоскости напластования; три других – в перпендикулярных плоскостях, образованных тремя первыми направлениями под углом  $45^\circ$  между каждой парой. Но результаты измерения в произвольных направлениях дают корректное значение проницаемости, если известны главные оси тензора  $k_{ij}$ . Для обоснования правильности определения главных направлений необходимо, чтобы исходный керн был ориентирован, и потребуются значительно увеличить число направлений измерений выпиленных образцов. Задача становится технически весьма трудоемкой и существенно осложняется ее математическая часть.

После определения компонент тензора абсолютной проницаемости для различных типов анизотропии можно провести детальное исследование связей между тензорами абсолютной и фазовых проницаемостей в анизотропных средах [1, 4, 5].

### **3. Специальные эксперименты для подтверждения критериев различия ортотропной и моноклинной симметрии фильтрационных свойств**

Напомним, что для ортотропной симметрии тензор проницаемости имеет диагональный вид с различными главными значениями проницаемости. Для групп моноклинной симметрии проявляется латеральная анизотропия в плоскости напластования, и тензор проницаемости содержит дополнительный «перекрестный» компонент  $k_{12} \neq 0$  (см. «с»). Стандартные исследования керна по линейному закону Дарси не позволяют различить эти два типа анизотропии. Для установления критериев различия было проведено полное исследование фильтрационных свойств для всех групп моноклинной и ортотропной симметрий. В результате было установлено [6], что эта задача может быть решена при исследованиях ФЕС горной породы при нарушении закона Дарси для больших скоростей течения. В этом случае проявляются эффекты асимметрии ФЕС при изменении направления течения на противоположное. Это связано с тем, что в нелинейный закон фильтрации в качестве коэффициента при квадрате скорости входит тензор третьего ранга, который и определяет асимметрию нелинейных фильтрационных свойств для групп симметрии  $\{2\}$ ,  $\{m\}$  и  $\{2:m\}$ , соответствующих

моноклинному типу анизотропии. Таким образом, были установлены критерии различия этих двух типов анизотропии и предложена процедура проведения экспериментов. Комплексный анализ исследований образцов керна в условиях нестационарного вытеснения проведен в работе [7], который не позволил выявить вышеуказанные критерии.

Эксперименты проводились на созданной фильтрационной установке, где был выполнен комплекс лабораторных исследований керна ачимовских отложений при реальных пластовых условиях (60 МПа) с использованием азота в качестве фильтрата. Из полноразмерного керна были подготовлены пять образцов стандартного размера (30 x 30 мм), три из которых ориентированы по главным направлениям тензора проницаемости, совпадающими с осями  $Oxuz$ . Четвертый образец вырезается под некоторым углом к осям  $Ox$  и  $Oy$  в плоскости напластования. Пятый образец высверливается из полноразмерного керна так, что его ось равно ориентирована относительно главных осей тензора проницаемости. Этот образец необходим для полного анализа нелинейного закона фильтрации, соответствующего моноклинному и ортотропному типам анизотропии.

Всего было проделано 10 весьма трудоемких опытов, выполненных аспирантом С.П. Цыбульским. Для каждого из ранее подготовленных пяти образцов проводился фильтрационный эксперимент в двух направлениях: прямом и обратном (противоположном). Перепад давлений был одинаков для всех опытов. Расход контролировался электронными высокоточными расходомерами.

По мере постепенного увеличения расхода фиксировался момент отклонения от закона Дарси, т.е. начало фильтрации по нелинейному закону. Далее направление фильтрации азота через каждый образец менялось на противоположное, и эксперимент повторялся. В ходе опытов была измерена проницаемость для всех десяти случаев. На всех образцах, кроме № 1, разница между значениями проницаемости при фильтрации в разных направлениях не проявлялась или не имела какой-либо закономерности. На образце № 1, который был изготовлен по направлению максимальной скорости прохождения звуковой волны, разница в значениях проницаемости при измерении в разных направлениях составила более 10%, а его установленная проницаемость во всех случаях была около 2 мД. Табличные и графические результаты измерений показали, что теоретически установленный критерий удовлетворяется. Поскольку эффект асимметрии

проявился именно на образце № 1, то можно предположить, что в исследуемом образце керна ачимовских отложений наблюдается моноклиная симметрия ФЕС с явной демонстрацией латеральной анизотропии. Определение латеральной анизотропии имеет важное значение для выбора эффективного направления воздействия на околоскважинную зону с целью увеличения производительности скважин.

Проведенная серия специальных экспериментов, на нелинейном законе фильтрации, весьма трудоемкая и затратная по времени, была проведена впервые. Но для ее верификации и внедрения в систему лабораторных исследований керна потребуется повторение экспериментов на образцах керна различного минерального состава и разных условий залегания (в том числе в низкопроницаемых, глубоко залегающих горизонтах).

*Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований президиума РАН № 8 «Минеральные ресурсы для высокотехнологичной промышленности и энергетики» (подпрограмма «Углеводороды с глубоких горизонтов в «старых» нефтегазодобывающих регионах как новый источник энергоресурсов: теоретические и прикладные аспекты»).*

#### **Литература**

1. Дмитриев Н.М., Максимов В.М. Определяющие уравнения двухфазной фильтрации в анизотропных пористых средах // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 1998. № 2. С. 87–94.
2. Добрынин В.М., Ковалев А.Г., Кузнецов А.М. Фазовые проницаемости коллекторов нефти и газа. М.: ВНИИОЭНГ. 1988. 56 с.
3. ОСТ 39-235-89. Нефть. Метод определения фазовых проницаемостей в лабораторных условиях при совместной стационарной фильтрации. М.: Миннефтепром. 1989. 36 с.
4. Дмитриев Н.Н., Максимов В.М. О структуре тензоров коэффициентов фазовых и относительных проницаемостей для анизотропных пористых сред // Доклады РАН. 1998. Т. 358, № 3. С. 337–339.
5. Рассохин С.Г. Относительные фазовые проницаемости при фильтрации углеводородов в гидрофильном и гидрофобном керне // Актуальные проблемы освоения, разработки и эксплуатации месторождений природного газа: Сб. науч. тр. М.: ВНИИГаз. 2003. С. 50–64.

6. *Максимов В.М., Дмитриев Н.М., Дмитриев М.Н.* Новый подход к определению групп симметрии фильтрационных свойств пористых сред в нелинейных законах фильтрации // Доклады РАН. 2017. Т. 473, № 4. С. 426–430. <https://doi.org/10.7868/S0869565217100085>

7. *Орлов Д.М., Рыжов А.Е., Савченко Н.В., Перунова Т.А.* Комплексное экспериментальное исследование двухфазного течения в коллекторах Чаяндинского нефтегазоконденсатного месторождения и разработка методики количественной оценки влияния условий фильтрации на относительные фазовые проницаемости // Научно-технический сборник Вести газовой науки. 2012. № 3(11). С. 130–145.

## Theoretical and experimental methods for identification of symmetry group (anisotropy type) of filtration properties in low-permeable media

**V.M. Maksimov**

Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow

E-mail: vmaks@ipng.ru

**Abstract.** The paper presents a systematization of the author's research on core anisotropy. The classification of anisotropy types and their tensor representation, the principal schemes of the component tensor permeability determination on core, theoretical analysis of filtration properties for orthotropic and monoclinic symmetry, the special laboratory studies and criteria to its distinction are given. The laboratory experimental results based on the nonlinear filtration law are presented.

**Keywords:** anisotropic medium, core, permeability tensor, anisotropy types, nonlinear filtration, orthotropic and monoclinic symmetry, filtration asymmetry.

**Citation:** *Maksimov V.M.* Theoretical and experimental methods for identification of symmetry group (anisotropy type) of filtration properties in low-permeable media // Actual Problems of Oil and Gas. 2019. Iss. 3(26). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2019-26.art3> (In Russ.).

### References

1. *Dmitriev N.M., Maksimov V.M.* Determining equations of two-phase filtration in anisotropic porous media // Fluid Dynamics. 1998. Vol. 3. No. 2. P. 87–94. <https://doi.org/10.1007/BF02698706>
2. *Dobrynin V.M., Kovalev A.G., Kuznetsov A.M.* Phase permeability of oil and gas reservoirs. Moscow: VNIIOENG. 1988. 56 p. (In Russ.).
3. OST 39-235-89. Oil. A method for determining phase permeabilities in laboratory conditions with joint stationary filtration. Moscow: Minnefteprom. 1989. 36 p. (In Russ.).
4. *Dmitriev N.N., Maksimov V.M.* On the structure of tensors of the coefficients of phase and relative permeabilities for anisotropic porous media // Doklady Akademii Nauk. 1998. Vol. 358, No. 3. P. 337–339. (In Russ.).
5. *Rassokhin S.G.* Relative permeability during filtration of hydrocarbons in the hydrophobic and hydrophilic core // Actual problems of exploration, development and exploitation of natural gas fields. Moscow: VNIIGAZ. 2003. P. 50–64. (In Russ.).
6. *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 // Doklady Physics. 2017. Vol. 62, No. 4. P. 190–193. <https://doi.org/10.1134/S1028335817040036>

7. *Orlov D.M., Ryzhov A.E., Savchenko N.V., Perunova T.A.* A comprehensive experimental study of the two-phase flow in the reservoirs of the Chayandinskoye oil and gas condensate field and the development of a method for the quantitative assessment of the influence of filtration conditions on relative phase permeabilities // Scientific and technical book *Vesti Ggazovoy Nauki*. 2012. No. 3(11). P. 130–145. (In Russ.).