

ОТ ИННОВАЦИЙ В НАУКЕ К ИННОВАЦИОННЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ

В.М. Максимов, Н.М. Дмитриев
ИПНГ РАН

Существующие многообразные методы активного воздействия на пласт унифицированы с гидродинамической точки зрения и основаны на теории многофазной многокомпонентной фильтрации, оснащенной современными информационными технологиями и программными продуктами. Принципиальной составляющей этих методов является классическая теория фильтрации флюидов в изотропной среде, в основе которой лежат закон Дарси и гипотеза о капиллярном давлении и относительных фазовых проницаемостях (ОФП) как универсальных равновесных функций локальной насыщенности. Таким образом, значительного продвижения в теории разработки месторождений углеводородов за последние 40-50 лет не произошло. Вместе с тем в последние десятилетия появились новые результаты, показывающие, что основные допущения классической теории на практике не реализуются. Прежде всего, речь идет о месторождениях с падающей добычей, с большой степенью обводненности; с трудноизвлекаемыми запасами в низкопроницаемых, неоднородных, анизотропных коллекторах: о высоковязких тяжелых нефтях; техногенно измененных пластах; месторождениях на больших глубинах и др. В статье дается обобщение классических моделей фильтрации для случаев анизотропных коллекторов (пористых, трещиноватых, трещиновато-пористых). Рассматривается процедура комплексных лабораторных исследований керна для определения фильтрационно-емкостных свойств анизотропных пористых сред, основанных на тензорном представлении абсолютной и относительной фазовой проницаемости. Проведен анализ эффектов, возникающих при двухфазных фильтрационных течениях в анизотропных коллекторах. Даны примеры технологических инноваций.

I. Научные инновации

1. Теоретические основы новой методики исследования анизотропного керна

1.1. Определение типа анизотропии

Для установления факта анизотропии фильтрационно-емкостных свойств и определения типа анизотропии (симметрии фильтрационных свойств) реальных коллекторов углеводородного сырья используются такие эффективные методы, как измерение скорости

прохождения ультразвуковых волн в различных сечениях образца или измерение упругих свойств кернового материала. Здесь будет использован ультразвуковой метод.

Однофазная фильтрация флюида в анизотропных средах описывается законом Дарси в виде:

$$w_i = -\frac{k_{ij}}{\mu} \nabla_j p,$$

где k_{ij} – абсолютная проницаемость, представленная симметричным тензором 2-го ранга. Известно, что любой тензор такого типа может быть приведен к главным осям, в которых он принимает диагональный вид. Однако в сложно построенных коллекторах не всегда известны главные оси k_{ij} . Поэтому сначала по данным измерений скоростей ультразвуковых волн определяются направления экстремальных свойств (максимум и минимум) (рис. 1 а, б).

Далее строятся поверхности величин направленной проницаемости, устанавливается факт анизотропии симметрии фильтрационных свойств и определяется ее тип.

1.2. Типы симметрии фильтрационных свойств

После установления факта анизотропии симметрии фильтрационно-емкостных свойств и определения ее типа требуется выпилить некоторое число образцов для проведения на них гидродинамических исследований. Количество образцов определяется типом симметрии исходного керна. Ниже рассмотрены все четыре возможных случая.

Для **трансверсально-изотропного** материала, где

$$k_{ij} = \begin{pmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_1 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 \end{pmatrix},$$

задача наиболее простая: необходимо определить лишь два главных значения тензора коэффициентов проницаемости. Минимальное число образцов равно двум. Измерения проводятся в плоскости изотропии фильтрационных свойств и в перпендикулярном к ней направлении. На рис. 2а приведена типичная поверхность фильтрационных свойств, характерная для этого случая. В сечениях плоскостью, проходящей через начало

координат и ось OZ , получается «восьмерка», меньший диаметр которой одинаков во всех сечениях.

Для *ортотропной* по фильтрационным свойствам пористой среды известно положение всех трех главных осей. Здесь

$$k_{ij} = \begin{pmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 \end{pmatrix}.$$

Поэтому для задания фильтрационных свойств достаточно определить три главных значения тензора коэффициентов проницаемости. Для решения задачи необходимо иметь три образца, выпиленных вдоль главных направлений. Типичная поверхность фильтрационных свойств, характерная для этого случая, приведена на рис. 2б. В сечениях плоскостью, проходящей через начало координат и ось OZ , получается «восьмерка», меньший диаметр которой изменяется от сечения к сечению.

В случае *моноклинной симметрии*, где

$$k_{ij} = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & 0 \\ k_{12} & k_{22} & 0 \\ 0 & 0 & k_{33} \end{pmatrix},$$

когда известно положение одной из главных осей (полагается, что это ось OZ), требуется определить четыре компоненты тензора коэффициентов проницаемости. Следовательно, минимально необходимое число образцов равно четырем. Направления выпиливания образцов удобно выбрать следующим образом: одно – по направлению главной оси, два других – взаимно перпендикулярно в плоскости, перпендикулярной главной оси, и последнее – в той же плоскости, под углом 45° между двумя предыдущими. Типичная поверхность фильтрационных свойств, характерная для этого случая, приведена на рис. 2в. В сечениях плоскостью, проходящей через начало координат и ось OZ , получают все те же «восьмерки», меньший диаметр которой изменяется от сечения к сечению, но теперь положения главных осей неизвестны и «восьмерки» произвольно ориентированы относительно лабораторной системы координат. Поэтому при прозвучивании ортотропный и моноклинный случаи симметрии не различимы. Однако данный факт при использовании только линейных законов фильтрации (закон Дарси) и кусочно-линейных (закон фильтрации с предельным градиентом) не является принципиальным. Более того, по данной методике после прозвучивания производится необходимое число измерений, для того чтобы определить положение главных осей.

В самом общем случае (*триклинная симметрия*) неизвестно положение всех главных осей тензора коэффициентов проницаемости, и задача состоит в определении шести компонент. Здесь

$$k_{ij} = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{12} & k_{22} & k_{23} \\ k_{13} & k_{23} & k_{33} \end{pmatrix}.$$

Типичная поверхность фильтрационных свойств, характерная для этого случая, приведена на рис. 2г. Минимальное число образцов равно шести. Данный случай по приведенной методике не исследуется, для него необходимо привлечение более сложной системы измерений.

1.3. Обобщенные законы фильтрации высоковязких нефтей

В настоящее время большая доля месторождений обладает трудно извлекаемыми запасами углеводородного сырья. Существенная часть этих запасов (около 30% мировых нефтяных запасов) приходится на месторождения высоковязких нефтей и битумов. Как правило, такие нефти обладают неньютоновской реологией и требуют обобщения законов фильтрации и применения нетрадиционной технологии их извлечения. Во многих случаях в качестве реологической модели высоковязких нефтей может быть использована модель вязкопластичных жидкостей, течение которых возникает только после превышения некоторого предельного (начального) градиента давления.

В то же время реальные породы-коллекторы обычно обладают анизотропией фильтрационно-емкостных свойств, и поэтому для описания фильтрационных течений аномальных нефтей в этих коллекторах необходимо использовать законы, учитывающие как тензор предельных градиентов давления, так и тензоры фильтрационно-емкостных свойств. В предыдущих исследованиях [1, 2] даны обобщения закона фильтрации с предельным градиентом в анизотропных средах, одно из которых может быть представлено в виде:

$$w_i = \frac{k_{ij}}{\mu} \left[\delta_{ij} - \frac{\gamma_{ij}}{|\nabla p|} \right] \nabla_j p \quad (1)$$

при условии $|\nabla p| > \gamma_{ij} n_i n_j$, которое задает возможность начала течения жидкости. Здесь w_i — компоненты вектора скорости фильтрации, k_{ij} и γ_{ij} — компоненты тензоров абсо-

лютной проницаемости и предельных градиентов соответственно; $\nabla_j p$ – компоненты вектора градиента давления, а $|\nabla p|$ – его модуль. Поскольку в качестве «движущей силы» могут выступать не только градиенты давления, но и его проекция на какое-либо направление, возможны случаи, когда фильтрационное течение имеет место и при невыполнении неравенства $|\nabla p| > \gamma_{ij} n_i n_j$. Все возможные случаи начала течения исследованы в работе [2]. Здесь же эти законы фильтрации будут протестированы лабораторными экспериментальными исследованиями. В частности, будут экспериментально подтверждены тензорный характер предельных градиентов и многовариантность закона фильтрации с предельным градиентом в анизотропных средах, имеющих важное значение при выборе технологий разработки месторождений.

Поскольку абсолютная проницаемость и тензор предельных градиентов задаются симметричными тензорами второго ранга с одинаковой симметрией, то поверхность тензора предельных градиентов имеет аналогичный вид (рис. 2). Следовательно, набор кернового материала для определения компонент тензора абсолютной проницаемости k_{ij} и предельных градиентов γ_{ij} в формуле (1) должен быть идентичен.

Для гидродинамических исследований из исходного образца были выпилены керны диаметром 25 мм: два – по направлению главных осей, один – под углом 45° между осями и еще один – в направлении вертикальной оси, перпендикулярно плоскости напластования. Теоретическое (линия) и экспериментальное (синие точки) распределения скоростей представлены на рис. 1б, а фотография выпиленных кернов – на рис. 3.

Таким образом, был получен набор кернового материала для исследования процесса фильтрации вязкопластичной жидкости с проявлением предельного градиента давления.

Исследования по определению проницаемости подготовленных образцов кернового материала проводились на установке AP-608, рассчитанной для измерения проницаемости при горном давлении до 69 МПа. Проницаемость измерялась по методике Клинкенберга, эксперименты проводились при фильтрации гелия в атмосферных условиях.

В результате экспериментов получены следующие результаты: $k_1 = 968 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$, $k_2 = 753 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$, $k_3 = 778 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$, $k_4 = 907 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$, где k_1, k_2, k_3 – значения проницаемости вдоль главных направлений, при этом k_1 и k_2 – в плоскости напластования, k_3 –

перпендикулярно к ней, значение k_4 получено для контрольного образца, среднее значение пористости $m = 0,208$.

Контрольный образец был изготовлен для проверки тензорного характера проницаемости. Согласно теории

$$k_4 = k_1 \cos^2 \alpha + k_2 \sin^2 \alpha = 0.5(k_1 + k_2) = 860.5 \text{ мД}$$

Полученное экспериментальное значение отличается от теоретического менее чем на 6%, что подтверждает тензорную природу проницаемости и дает оценку погрешности проводимым экспериментальным исследованиям.

Экспериментальное подтверждение тензорной природы предельного градиента [3] выполнено на том же наборе реального кернового материала. Экспериментальные исследования природы предельного градиента заключаются в серии опытов на реальном керновом материале. Образцы были выпилены по той же схеме (см. рис.1а), то есть в направлениях главных осей тензора абсолютной проницаемости, полученных при использовании ультразвукового метода.

Эксперименты проводились на 85%-ном растворе глицерина с вязкостью $\mu = 154$ мПа·с и начальным напряжением сдвига $\tau_0 = 0.019$ Па. Фильтрационное течение моделировалось в условиях, аналогичных пластовым. Для создания течения раствора глицерина через образцы было необходимо создать депрессию не менее 0,7 МПа. Для этого на входе в кернодержатель было установлено давление 12,0 МПа, а на выходе оно варьировалось в зависимости от условий эксперимента. Во избежание проскальзывания жидкости между образцом и манжетой давление обжима в кернодержателе создавалось равным 16,8 МПа, то есть на 25% выше, чем внутреннее (поровое) давление в образце.

Экспериментальные значения проницаемости и предельного градиента определялись после наступления стационарного режима фильтрации. Результаты проведенных экспериментов представлены в табл. 1. Заметим, что большим значениям проницаемости ($k_1 > k_2 > k_3$) соответствуют меньшие значения предельного градиента давления, что соответствует теории. Полученные экспериментальные значения для контрольного образца отличаются от теоретического менее чем на 7%. Данное обстоятельство является экспериментальным подтверждением тензорной природы как предельного градиента давления, так и абсолютной проницаемости.

Таблица 1

Сравнение результатов экспериментов, проведенных для жидкости и газа

Образец	m , % (пов. усл.)	k , 10^{-15} м ² (пов. усл.)	k , 10^{-15} м ² (пл. усл.)	γ , атм/м (пл. усл.)
Maximum	21,6	968	310	0,028
Minimum	20,3	753	68	0,099
Z	20,5	777	110	0,074
45 ⁰	21	907	175	0,058

2. Эффекты анизотропии при двухфазных течениях [4, 5]

При совместном течении двух несмешивающихся жидкостей (например, нефти и воды) в пористой среде принимается, что закон Дарси выполняется для каждой из фаз и имеет вид:

$$w_i^\alpha = -\frac{k_{ij}^\alpha}{\mu_\alpha} \nabla_j p^\alpha, \quad \alpha = 1, 2, \quad (2)$$

где w_i^α – компоненты векторов скорости фильтрации фаз, k_{ij}^α – компоненты симметричных тензоров второго ранга, μ^α – коэффициенты динамической вязкости, p^α – давление в фазах.

В (2) и далее греческие индексы обозначают номер фазы, а латинские – компоненты векторов и тензоров, по повторяющимся латинским индексам подразумевается суммирование, по греческим индексам суммирование не производится, для удобства обозначения тензоры и векторы выписаны в декартовой системе координат.

Соотношение (2) вводит новые материальные характеристики k_{ij}^α , которые называются фазовыми проницаемостями.

Поскольку фазовая проницаемость зависит от геометрии пустотного пространства и характера распределения фаз по порам, то есть от насыщенности, то изначально разделение этих свойств представлялось в виде линейной связи между k_{ij}^α и тензором абсолютной проницаемости k_{ij} :

$$k_{ij}^\alpha = f^\alpha(s) k_{ij},$$

где относительные фазовые проницаемости $f^\alpha(s)$ считались универсальными функциями насыщенности, а симметрия тензоров полагалась одинаковой.

Позже было показано теоретически [6, 7] и подтверждено экспериментально [8], что относительные фазовые проницаемости зависят не только от насыщенности, но и от направления течения, а наиболее общая связь между фазовыми и абсолютными проницаемостями задается тензором четвертого ранга:

$$k_{ij}^\varepsilon = F_{ijkl}^\alpha k_{kl}, \quad (3)$$

где F_{ijkl}^α – тензор коэффициентов относительных фазовых проницаемостей, симметричный по первой и второй парам индексов, а также их перестановке.

Равенство (3) можно записать в главных осях тензора абсолютной проницаемости:

$$\begin{aligned} k_{11}^\alpha &= \varepsilon_{11}^\alpha k_1 + \varepsilon_{12}^\alpha k_2 + \varepsilon_{13}^\alpha k_3 \\ k_{22}^\alpha &= \varepsilon_{21}^\alpha k_1 + \varepsilon_{22}^\alpha k_2 + \varepsilon_{23}^\alpha k_3 \\ k_{33}^\alpha &= \varepsilon_{31}^\alpha k_1 + \varepsilon_{32}^\alpha k_2 + \varepsilon_{33}^\alpha k_3 \\ k_{23}^\alpha &= \varepsilon_{41}^\alpha k_1 + \varepsilon_{42}^\alpha k_2 + \varepsilon_{43}^\alpha k_3 \\ k_{13}^\alpha &= \varepsilon_{51}^\alpha k_1 + \varepsilon_{52}^\alpha k_2 + \varepsilon_{53}^\alpha k_3 \\ k_{12}^\alpha &= \varepsilon_{61}^\alpha k_1 + \varepsilon_{62}^\alpha k_2 + \varepsilon_{63}^\alpha k_3, \end{aligned} \quad (4)$$

где ε_{mn}^α – значения компонент тензора коэффициентов относительных фазовых проницаемостей в системе координат, совпадающей с главными осями тензора абсолютной проницаемости, k_l – главные значения тензора абсолютной проницаемости.

Считая, что в соотношениях (4) компоненты ε_{mn}^α одного порядка, можно дать следующую аппроксимацию связи компонент тензоров абсолютных и фазовых проницаемостей (для двух фаз):

$$\begin{aligned} k_{ij}^1 &= \left[a_{ij} + \left(\frac{I_1(k)}{3k_l} - 1 \right) (s_{(ij)^*}^* - s) \right] \left(\frac{s - s_{(ij)^*}}{s_{(ij)^*}^* - s_{(ij)^*}} \right)^{\gamma_{ij}} k_l \\ k_{ij}^2 &= \left[b_{ij} + \left(\frac{I_1(k)}{3k_l} - 1 \right) (s - s_{(ij)^*}) \right] \left(\frac{s_{(ij)^*}^* - s}{s_{(ij)^*}^* - s_{(ij)^*}} \right)^{\beta_{ij}} k_l \end{aligned} \quad (5)$$

где при $i \neq j$ индексы i, j, l образуют циклическую перестановку из чисел 1, 2, 3, а при $i = j$ все индексы одинаковы ($i = j = l$), но суммирование по i не производится. Формулы (5) задают фазовые проницаемости для триклинной симметрии фильтрационных

свойств, поэтому они являются наиболее общими и из них можно получить фазовые проницаемости для всех типов анизотропии (классов симметрии). Для моноклинной симметрии в равенствах (5) нужно положить $k_{13}^\alpha = k_{23}^\alpha = 0$, для ортотропной симметрии $k_{13}^\alpha = k_{23}^\alpha = k_{12}^\alpha = 0$, для трансверсально-изотропной – к последнему условию необходимо добавить равенство $k_{11}^\alpha = k_{22}^\alpha$.

Показана [5] зависимость положения главных осей тензора фазовых проницаемостей от насыщенности, что имеет принципиальное значение при разработке численных разностных схем. Как известно, любой симметричный тензор второго ранга может быть приведен к главным осям, в которых он принимает диагональный вид. В частности, при моноклинной симметрии фильтрационных свойств известно положение одной главной оси, и приведение к главным осям осуществляется путем поворота относительно этой главной оси. Положим, что главная ось совпадает с осью Z, тогда угол поворота φ^α определяется по формуле:

$$\operatorname{tg} 2\varphi^\alpha(s) = \frac{2k_{12}^\alpha(s)}{k_{11}^\alpha(s) - k_{22}^\alpha(s)} \quad (6)$$

В равенстве (6) значения компонент тензоров k_{ij}^α зависят от насыщенности и изменяются, поэтому и значения углов $\varphi^\alpha(s)$ также могут изменяться. Однако углы $\varphi^\alpha(s)$ не будут зависеть от насыщенности, только если в равенстве (6) все выражения, содержащие насыщенность, будут сокращаться. Но это невозможно, поскольку значения экспериментальных констант в (5) зависят от направления. Поэтому, если задать значения констант в выражении (5), то можно проанализировать изменения положения главных осей при двухфазных фильтрационных течениях в зависимости от насыщенности.

Для иллюстрации эффекта положим:

$$k_1 / k_2 / k_3 = 4 / 2 / 1,$$

$$\text{для воды: } \varepsilon_{11} = 1,4, \quad \varepsilon_{22} = 2, \quad \varepsilon_{12} = 1,8, \quad s_{(11)}^* = 0,1, \quad a_{11} = a_{22} = a_{12} = 1;$$

$$\text{для газа: } \beta_{11} = 2, \quad \beta_{22} = 2,5, \quad \beta_{12} = 2,2, \quad s_{(22)}^* = 0,9, \quad b_{11} = b_{22} = b_{12} = 1.$$

Результаты расчета представлены (рис. 4) в виде сечений указательных поверхностей фильтрационных свойств. С увеличением насыщенности поворот главных осей тензоров k_{ij}^α для воды и газа происходит в противоположных направлениях.

При нагнетании вытесняющего агента в пласт изменение положения главных осей тензоров фазовых проницаемостей приводит к невозможности выбора «удобного» положения системы координат и, как следствие, к усложнению расчетной схемы. Изменение фильтрационных свойств в моноклинных и триклинных коллекторах в отличие от коллекторов, обладающих ортотропными и трансверсально-изотропными свойствами, не дает возможности использовать стандартные расчетные методы как при интерпретации гидродинамических исследований скважин, так и при классическом моделировании. Для описания гидродинамических характеристик таких коллекторов необходимы дополнительные исследования кернового материала, которые позволяют определять тензорные характеристики коллекторов и их зависимость от давления и насыщенности.

II. Новые методические и технические решения

1. Последовательность проведения комплексных исследований [4]

Для проведения комплексных исследований по определению фильтрационно-емкостных свойств реальных кернов предлагается следующая методика.

А. По измерениям скоростей прохождения ультразвуковых волн устанавливается факт наличия анизотропии фильтрационно-емкостных свойств и ее тип.

В. В зависимости от типа симметрии определяется число и направления выпиливания образцов для лабораторных измерений.

С. Выпиливается необходимое количество образцов для определения компонент тензора абсолютной проницаемости и предельных градиентов.

Д. По гидродинамическим исследованиям для каждого из образцов определяются тензор проницаемости и тензор предельных градиентов.

Е. Для дальнейшей проверки результатов измерений вырезаются несколько контрольных образцов, результаты измерений на которых позволяют проверить тензорный характер определяемых величин и оценить погрешности измерений.

Подготовка исходного образца горной породы к определению типа анизотропии заключается в его экстрагировании, просушке и разметке. Размеченные образцы горных пород-коллекторов представлены на рис. 5.

2. Трехступенчатый конический сепаратор

Одной из важных задач является извлечение низконапорного газа на истощенных обводненных месторождениях углеводородов Западной Сибири (Медвежье, Уренгойское, Заполярное и др.). Предлагаемая конструкция сепаратора [9], будучи простой в изготовлении, оказывается эффективной при малых давлениях газовой фазы, которые наблюдаются на истощенных месторождениях. Математической основой конструкции является теория дисперсно-кольцевого течения двухфазных смесей в трубах переменного сечения.

Принципиальная схема ступени конического сепаратора показана на рис. 6. Газожидкостный поток, попадая из подводящего трубопровода в конфузорный канал, разгоняется в нем. Капли жидкости, вследствие своей инерционности, отстают от линий тока газа и частично выпадают на внутреннюю поверхность конфузора, образуя на ней жидкую пленку, которая и отбирается в конце канала через специальный щелевой отборник. Исследования показали, что для обеспечения достаточной величины коэффициента сепарации при сохранении удовлетворительных потерь давления в потоке в схему сепаратора должно быть заложено несколько ступеней, аналогичных по конструкции ступеням, описанным в [10].

Некоторые результаты исследования основных характеристик трехступенчатого конического сепаратора показаны на рис. 7 и 8 на примере течения реальной газоконденсатной смеси Имашевского газоконденсатного месторождения в Казахстане. В результате расчетов и анализа эффективности работы сепаратора были выбраны оптимальные геометрические размеры сепаратора и параметры потока на его входе, обеспечивающие максимально возможное значение коэффициента сепарации при минимально возможных потерях полного давления потока на его выходе.

Под коэффициентом сепарации k_c конического сепаратора понимается отношение расхода жидкой фазы, отобранной во всех его ступенях, к суммарному расходу жидкости m_{l0} в его начальном сечении:

$$k_c = \sum_{i=1}^n m_{li} / m_{l0},$$

где m_{li} – расход жидкости, отобранной в i -ой ступени сепаратора.

В качестве определяющего параметра двухфазного потока принималось его начальное газосодержание χ_0 , т.е. отношение начального расхода газа m_{g0} (который не из-

меняется по длине сепаратора) к суммарному расходу газа и жидкости в начальном сечении:

$$\chi_0 = m_{go} / (m_{go} + m_{lo}).$$

При расчетах течения реальной газоконденсатной смеси в исследуемых сепараторах были взяты параметры Имашевского газоконденсатного месторождения. Состав его газа в процентах: метан – 79,43; этан – 3,85; азот – 5,19; сероводород – 11,43. Состав конденсата в процентах: пропан – 60; бутан – 40. Физические свойства газовой и жидкостной смеси рассчитывались по модели реального газа.

На рис. 7 приведены зависимости коэффициента сепарации от начального газосодержания в потоке и от давления на входе. Из представленных зависимостей следует, что с ростом начального газосодержания в потоке коэффициент сепарации растет, а с увеличением давления – уменьшается. Усиленный рост коэффициента сепарации с ростом газосодержания в потоке наблюдается в области малых значений газосодержания, что объясняется появлением разрывов пленки на стенках конфузора и уменьшением площади контакта пленки с ядром потока, а следовательно, и уменьшением уноса с нее жидкости.

Уменьшение коэффициента сепарации с ростом давления на входе в сепаратор связано с увеличением плотности газовой фазы, приводящим к увеличению уноса жидкости с поверхности пленки.

На рис. 8 приведены зависимости относительных потерь полного давления газа в рассчитанных сепараторах от начального газосодержания χ_0 в потоке при различных давлениях p_0 на входе. Расчеты показывают, что потери полного давления в газе увеличиваются как с уменьшением χ_0 в потоке, так и с ростом давления p_0 . Это объясняется тем, что с уменьшением одного параметра и с ростом другого увеличивается толщина пленки, а следовательно, и ширина отборников пленки, что приводит к увеличению скорости потока в горле ступени сепаратора и к увеличению гидравлических потерь в следующих за ним диффузорах.

Показано, что трехступенчатый конический сепаратор эффективен при малых давлениях потока на его входе, не превышающих 8 МПа, и его экономично применять на обедненных газоконденсатных месторождениях, а также для выделения конденсата изпутного газа на нефтяных скважинах.

Заключение

1. Разработаны теоретические основы технологии воздействия на нефтегазовые месторождения в анизотропных структурах. Показано, что относительные фазовые проницаемости, в значительной степени определяющие коэффициент извлечения, зависят не только от насыщенности, но и от направления вытеснения.

2. Создана методика комплексного исследования анизотропного кернового материала для определения абсолютной и относительных фазовых проницаемостей.

3. Показано, что при воздействии на залежи высоковязкой нефти, обладающей неньютоновской реологией, в уравнение движения должен быть включен тензор предельных градиентов. Сформулированы новые условия начала течения.

4. Показано, что закон фильтрации с предельным градиентом в анизотропных пористых средах многовариантен и допускает одно-, двух- и трехмерное течение.

5. Проведены комплексные исследования фильтрационных течений с предельным градиентом давления на реальном керновом материале и обоснована тензорная природа предельного градиента.

6. Разработаны технологии, решающие проблему обводненности скважин и пескопроявлений.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Дмитриев Н.М., Максимов В.М., Рябчуков Е.А.* Законы фильтрации ВПЖ в анизотропных пористых и трещиноватых средах // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2006. № 4. С. 112-120.

2. *Дмитриев Н.М., Максимов В.М., Мамедов Т.М.* Законы фильтрации с предельным градиентом в анизотропных пористых средах // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2010. № 2. С. 65-72.

3. *Дмитриев Н.М., Максимов В.М., Мамедов Т.М.* Фильтрация с предельным градиентом в анизотропных средах. Теория и эксперимент // Вестн. Нижегород. ун-та им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4(3). С. 749-750.

4. *Дмитриев Н.М., Максимов В.М., Дмитриев М.Н., Семигласов Д.Ю.* Эффекты анизотропии при двухфазных фильтрационных течениях // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2010. № 3. С. 140-146.

5. *Максимов В.М., Семигласов Д.Ю.* Эффекты обобщенных законов фильтрации в многофазных течениях в сложнопостроенных коллекторах // Сборник материалов 3-го международного симпозиума "Теория и практика применения методов увеличения нефтеотдачи пластов", ВНИИНЕФТЬ, 20–21 сентября 2011 г.

6. *Дмитриев Н.М., Максимов В.М.* О структуре тензоров фазовых и относительных проницаемостей для анизотропных пористых сред // Докл. РАН. 1998. Т. 358, № 3. С. 337-339.

7. *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.

8. *Рассохин С.Г.* Относительные фазовые проницаемости при фильтрации углеводородов в гидрофильном и гидрофобном керне // Актуальные проблемы освоения, разработки и эксплуатации месторождений природного газа. М., 2003. С. 50-64.

9. *Бузов А.А., Максимов В.М.* Способ выделения жидкости из газожидкостного потока в трубопроводе и многоступенчатое устройство для его осуществления // Патент RU 2304015 С1. М.: 2007. Бюл. № 22. С. 361.

10. *Бузов А.А., Максимов В.М.* Численное исследование и анализ особенностей разделения фаз в газожидкостных системах при использовании трехступенчатых конических сепараторов // Наука и техника в газовой пром-сти. 2010. № 3(43). С. 93-101.

ПРИЛОЖЕНИЕ

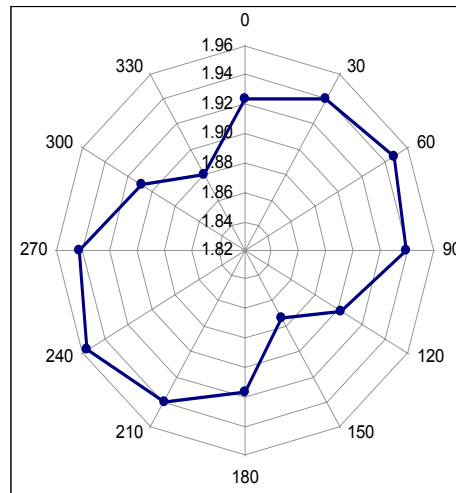


Рис. 1а. Распределения скоростей прохождения ультразвуковых волн в различных сечениях образца

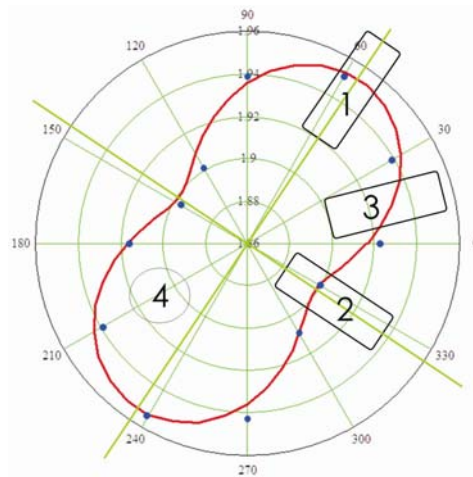


Рис. 1б. Аппроксимированное распределение скоростей прохождения ультразвуковых волн в сечении исходного образца

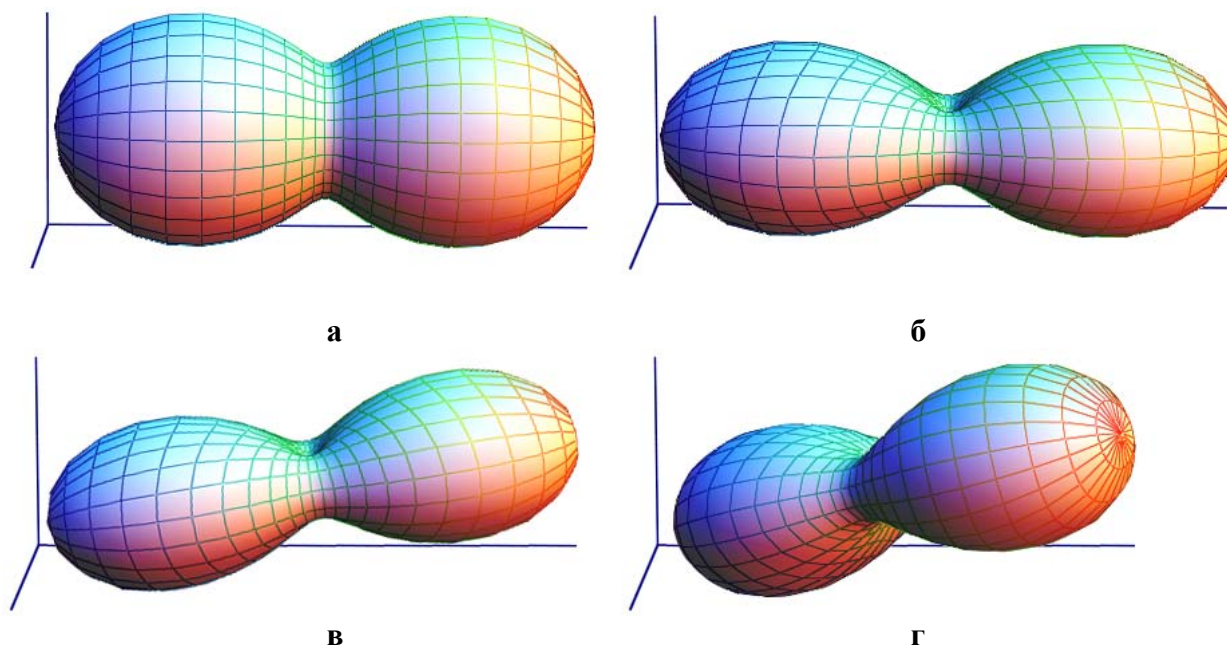


Рис. 2. Поверхности величин направленной проницаемости для различных типов симметрии в декартовой системе координат

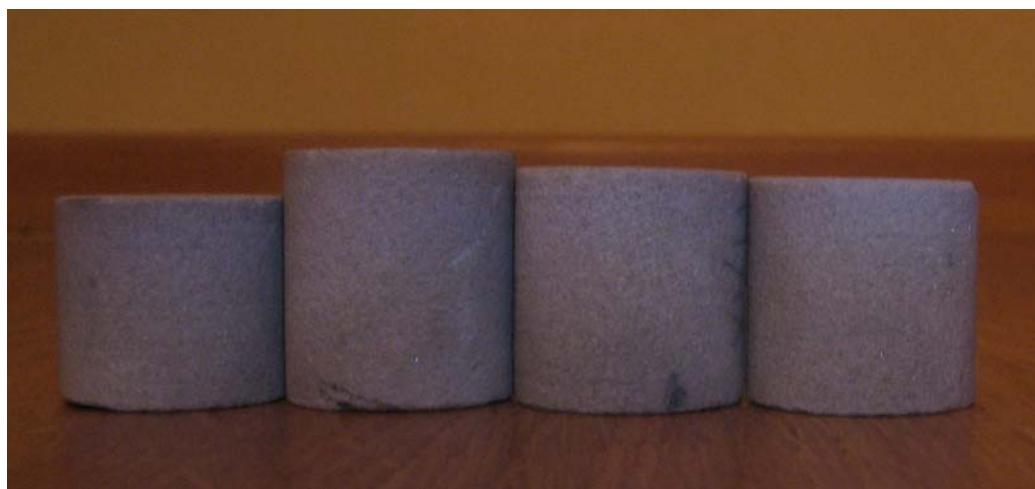


Рис. 3. Керны, выпиленные из бокового сечения исходного образца

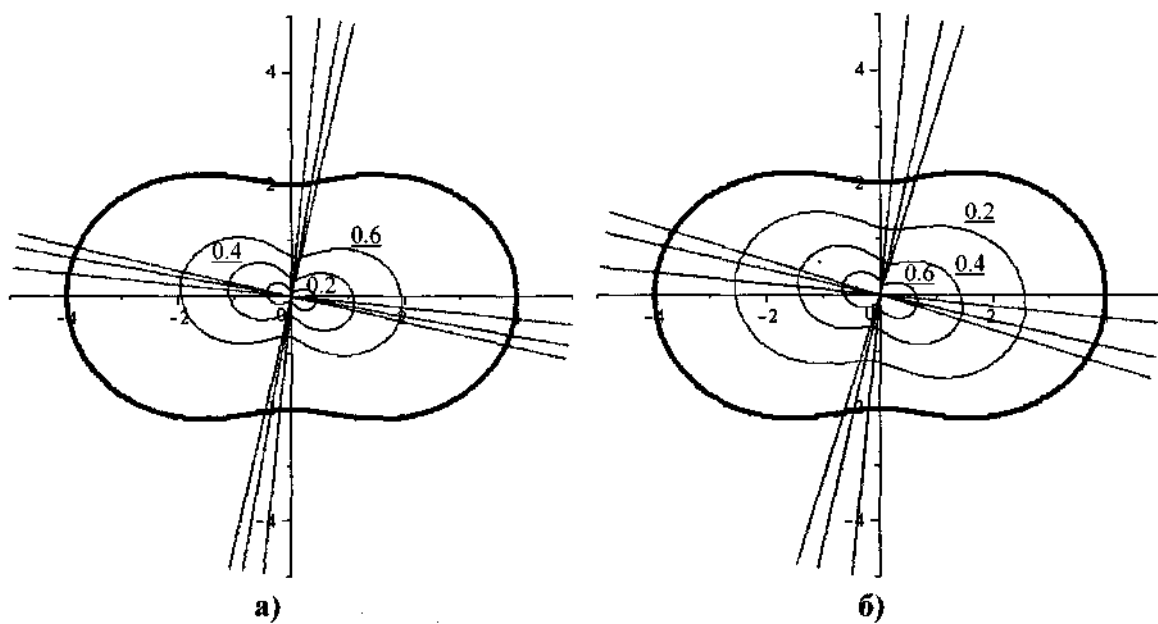


Рис. 4. Сечение указательных поверхностей тензоров абсолютной и фазовых проницаемостей

а – для воды, б – для нефти, для насыщенности 0,2, 0,4 и 0,6



Рис. 5. Размеченные и подготовленные к исследованиям образцы кернов

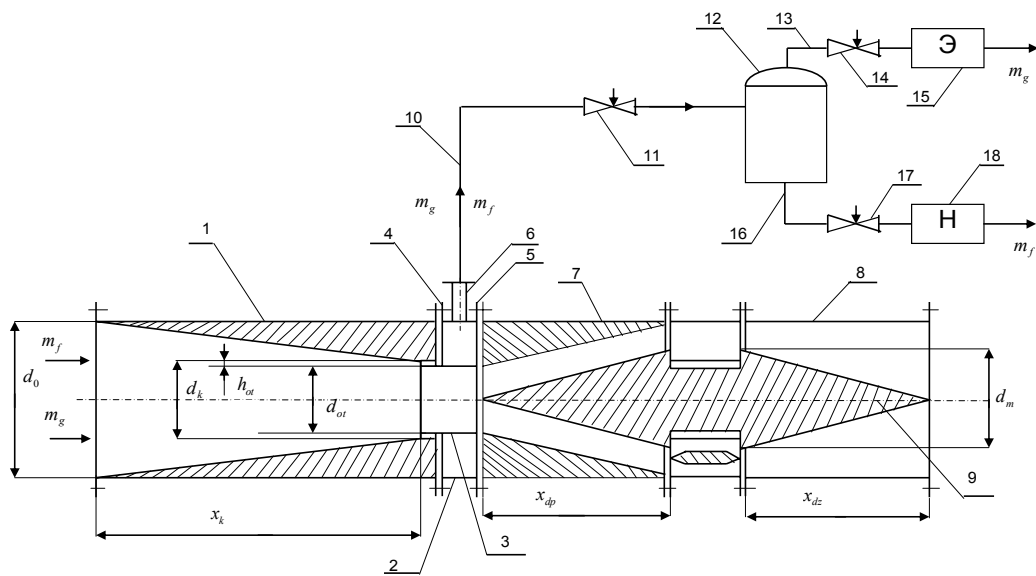


Рис. 6. Принципиальная схема ступени трехступенчатого конического сепаратора

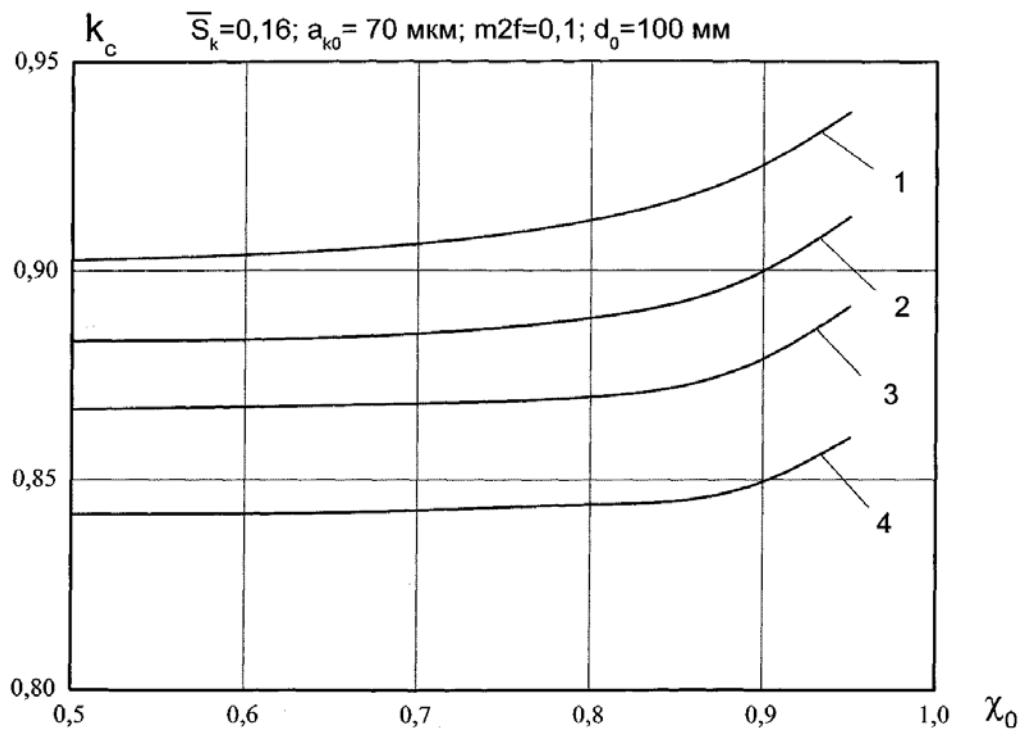


Рис. 7. Зависимости коэффициентов сепарации трехступенчатого конического сепаратора от начального газосодержания в потоке и от давления на входе (ρ_0 [МПА]: 1-2; 2-3,5; 3-5; 4-8)

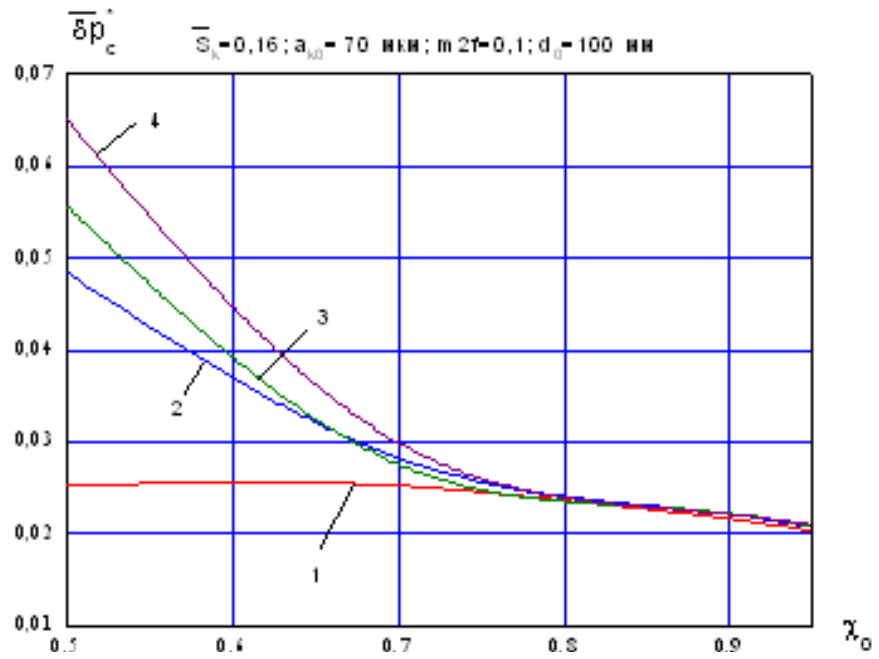


Рис. 8. Зависимости относительных потерь полного давления газа в трехступенчатом коническом сепараторе от начального газосодержания в потоке и от давления на входе (ρ_0 [МПА]: 1-2; 2-3,5; 3-5; 4-8)