

МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЭФФЕКТИВНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОЛЛЕКТОРОВ

И.О. Баюк

(Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта, РАН, Москва)

MULTIDISCIPLINE APPROACH TO DETERMINATION OF EFFECTIVE PHYSICAL PROPERTIES OF RESERVOIR ROCKS

I.O. Bayuk

(Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow)

Аннотация. Предлагается единый подход к описанию упругих и транспортных свойств коллекторов углеводородов на основе учета геометрии их порово-трещиноватого пространства. Транспортные свойства включают электро- и теплопроводность, гидравлическую и диэлектрическую проницаемость. Подход основан на использовании теории эффективных сред, которая позволяет связать макроскопические (эффективные) физические свойства коллектора с соответствующими свойствами минерального скелета, флюида, заполняющего поровое пространство, геометрией пор и трещин и степенью их связности. На основе этого подхода возможно решение ряда актуальных задач разведочной геофизики: (1) определение геометрии порового пространства по измерениям упругих и (или) транспортных свойств, (2) прогноз свойств одного типа через свойства другого типа, (3) прогноз физических свойств коллекторов на других масштабах, (4) обнаружение зон трещиноватости коллекторов и определение формы и емкости трещин, (5) построение скоростной модели глинистых сланцев с учетом их анизотропии по данным ГИС для надежного мониторинга гидроразрыва. Основное внимание в докладе уделяется последней задаче, которая рассмотрена более подробно на примере газоносных глинистых сланцев возраста Миссисипского периода.

Abstract. A unified approach has been proposed for simultaneous determination of the elastic and transport properties of reservoir rocks. The transport properties include the electrical and heat conductivity, hydraulic permeability, and permittivity. The approach is based on the effective medium theory that makes it possible to relate the macroscopic (effective) properties of reservoir rocks with the respective properties of mineral skeleton, fluid filling the pore space, pore/crack geometry, and pore connectivity. This approach allows one to solve the following actual problems of prospecting geophysics: (1) determination of the pore space geometry from measurements of elastic or/and transport properties, (2) prediction of nonmeasurable properties from measurable ones, (3) upscaling of the physical properties, (4) detecting of fracture zone and determination of the crack shape and their density, (5) construction of the velocity model of shales from log data with allowance made for shale anisotropy, which is needed for reliable monitoring of hydrofracture. In this

work, the primary attention is given to the last problem solved for gas-bearing shales of the Mississippian age.

Коллектор можно представить как микронеоднородную многокомпонентную среду, составляющими (или включениями) которой являются минеральные зерна, поры и трещины, заполненные флюидом или иным веществом. Если принять гипотезу о статистически однородном распределении включений в объеме породы, то для определения макроскопических (эффективных) физических свойств коллектора можно применять методы теории эффективных сред (ТЭС). Эти методы позволяют определять эффективные физические свойства по свойствам включений, их форме, ориентации, особенностям распределения в объеме, степени связности. Форма включений моделируется при этом эллипсоидами. Как правило, для такого моделирования используют эллипсоиды вращения, форма которых определяется аспектным отношением.

Построение модели коллектора. При применении ТЭС для теоретического прогноза эффективных физических свойств необходимым этапом является создание модели коллектора и параметризация этой модели. Эти модели различны для различных типов коллекторов, что определяется различием их внутреннего строения. При наличии в коллекторе включений, сильно отличающихся по размеру (в несколько раз), модель коллектора строится последовательно, по принципу «от меньшего размера включений к большему».

Модель терригенного коллектора представляет собой среду, состоящую из зерен минерального вещества и пустот, заполненных флюидом или иным веществом (например, керогеном). Все эти компоненты находятся в некоторой матрице, называемой «телом сравнения» и отражающей характер связности компонент. Геометрия порово-трещиноватого пространства описывается функцией распределения объема пустот по аспектным отношениям. Предполагается, что аспектное отношение может меняться в широком диапазоне – от очень тонких трещин до сферических пор. Пустоты ориентированы хаотически, что приводит к изотропии физических свойств терригенного коллектора.

Модель карбонатного коллектора строится в два этапа. Первый этап аналогичен построению модели терригенного коллектора. Однако на первом этапе построения модели карбонатного коллектора, вследствие его генезиса, следует включать в рассмотрение и каналобразные трещины. Первым этапом обычно ограничиваются для построения модели на масштабе образцов. Для областей большего размера (десятки сантиметров) в карбонатных коллекторах наблюдаются субвертикальные трещины, характерный размер которых намного превышает характерный размер хаотических пустот. Поэтому на втором этапе в однородный изотропный Материал 1, полученный путем внесения в

минеральную матрицу хаотических пустот, вносятся субвертикальные трещины, геометрия которых описывается функцией распределения емкости трещин по аспектным отношениям. В результате внесения в Материал 1 субвертикальных трещин получается однородный анизотропный Материал 2. Упругая симметрия Материала 2 является гексагональной с горизонтальной осью симметрии (НТИ).

Модель газо- и нефтеносных глинистых сланцев строится в четыре этапа. Сначала в матрицу, образованную анизотропными глинистыми минералами, вносятся включения керогена. Затем рассчитываются эффективные свойства такой анизотропной среды (Материал 1). После этого в Материал 1 вносятся тонкие трещины, форма которых описывается одним аспектным отношением. Рассчитываются эффективные свойства такого материала, в результате чего получают однородный анизотропный Материал 2. После этого в Материал 2 вносятся зерна алевритистой фракции (кварца, полевого шпата, кальцита и др.) и квазиизометрические поры, форма которых также описывается одним аспектным отношением. В результате расчета эффективных свойств такого агрегата получается однородный анизотропный Материал 3. Затем составляется Материал 4, который представляет собой «поликристалл», состоящий из частиц Материала 3, которые рассматриваются как «монокристаллы». Эти «монокристаллы» ориентированы в Материале 4 согласно ориентации глинистых частиц в породе. Ориентация глинистых частиц задается некоторой функцией распределения, которая может быть определена, например, из анализа шлифов. Упругая симметрия Материала 4 является гексагональной с вертикальной осью симметрии (VTI).

Параметризация модели коллектора. После того, как модель коллектора построена, необходимо определить параметры модели.

Для терригенного коллектора параметрами модели являются: (1) свойства минерального вещества, (2) свойства флюида или иного вещества, находящегося в пустотах, (3) пористость, (4) параметры функции распределения, описывающей распределения объема пустот по аспектным отношениям, (5) параметр связности порового пространства. Как правило, пористость и свойства порозаполняющего вещества известны.

Для карбонатного коллектора к параметрам (1) – (5) добавляется емкость трещин и параметры функции распределения, описывающей распределения емкости субвертикальных трещин по аспектным отношениям.

Для глинистых сланцев параметры модели следующие: (1) свойства минерального вещества, (2) свойства флюида или иного вещества, находящегося в пустотах, (3) пористость, (4) аспектное отношение тонких трещин, прилегающих к глинистым частицам, (5) емкость тонких трещин, (6) аспектное отношение квазиизометрических пор, (7) параметр связности пустот.

Определение параметров моделей коллекторов. Для определения неизвестных параметров моделей коллекторов используются измерения

физических свойств (упругих и/или транспортных). Например, это могут быть лабораторные измерения на образцах или же данные ГИС. При этом модель коллектора должна соответствовать масштабу измерений физических свойств. Незвестные параметры модели определяются таким образом, чтобы обеспечить совпадение экспериментальных и теоретических значений соответствующих физических свойств с заданной точностью. Для этого можно использовать, например, методы нелинейной оптимизации с ограничениями на искомые параметры. Ограничения играют важную роль, поскольку часто число неизвестных параметров может быть больше, чем число измерений. Это, в свою очередь, увеличивает область возможных решений для искомых параметров. Поэтому следует использовать любую априорную информацию о неизвестных параметрах, что позволяет сузить эту область решений.

Определение «неизмеряемых» физических свойств по «измеряемым». После того, как параметры модели определены, с помощью методов ТЭС можно рассчитывать другие физические свойства. В докладе приводится пример определения теплопроводности образцов карбонатного коллектора по измерениям упругих свойств. Прогноз теплопроводности находится в хорошем согласии с данными эксперимента.

Построение скоростной модели глинистых сланцев с учетом их анизотропии по данным ГИС. Параметры модели глинистых сланцев возраста Миссисипского периода определялись по данным ГИС, включающим скорости продольной и поперечной волн, плотность, пористость и глинистость. Незвестные параметры определялись для каждой глубины акустического каротажа. Это дало возможность получить распределение по глубине всех пяти независимых компонент тензора упругости глинистых сланцев. После этого было применено масштабирование тензора упругости и плотности для частот межскважинной томографии (100—500 Герц), на которых производится мониторинг гидроразрыва в газоносном пласте глинистых сланцев. Для масштабирования тензора упругости применен анизотропный вариант метода Бэкуса. Продемонстрирована устойчивость полученного решения. Полученные значения тензора упругости и плотности дают возможность рассчитать скорость продольных и поперечных волн в любом направлении. Приведены примеры построения градиентной и блочной анизотропной модели глинистых сланцев. Показано, что тензор упругости, определенный для продуктивного слоя на частотах межскважинной томографии, находится в хорошем согласии с данными независимого эксперимента. Поскольку глинистые сланцы обладают значительной анизотропией физических свойств, то ее игнорирование при мониторинге гидроразрыва может привести к ошибкам локализации микроземлетрясений, достигающим нескольких сотен метров.