

Экспериментальное исследование и математическое моделирование фильтрационных потоков в низкопроницаемых коллекторах: линейный и нелинейный законы фильтрации

В.А. Байков, О.С. Боршук, А.А. Гимазов, А.В. Колонских, А.К. Макастров, М.Е. Политов, Е.И. Сергеев, А.Г. Телин (ООО «РН-УфаНИПИнефть»), В.Е. Бобков (УГАТУ)

Одним из ярких примеров месторождений с трудноизвлекаемыми запасами является Приобское нефтяное месторождение, которое характеризуется низкопроницаемым коллектором (проницаемость 0,001-0,01 мкм²). Для неразбуренной части предполагаемая средняя проницаемость составляет около 0,001 мкм². На Приобском месторождении накоплен уникальный опыт разработки низкопроницаемых коллекторов, однако этого недостаточно, так как начинают разрабатываться участки месторождения, фильтрационно-емкостные характеристики которых мало изучены. Повысить эффективность их эксплуатации можно путем учета новых физических закономерностей, полученных в процессе математического моделирования разработки месторождения.

В ООО «РН-УфаНИПИнефть» были проведены многочисленные фильтрационные эксперименты на низкопроницаемых образцах керна (проницаемость для газа составляла 0,001; 0,025 и 0,25 мкм²) с определением зависимости скорости фильтрации от градиента давления при различной насыщенности водой и нефтью. В ходе экспериментов было установлено отклонение от линейного закона фильтрации Дарси при низких градиентах давления. Подобное отклонение получено даже при фильтрации через водонасыщенный керн воды, которая с точки зрения реологии относится к ньютоновским жидкостям.

В результате интерпретации данных лабораторных экспериментов подобрана эмпирическая зависимость нелинейного закона фильтрации, согласно которой степень нелинейности определяется эффективной проницаемостью при данной насыщенности фаз (фазовой проницаемостью). Данная зависимость выбрана таким образом, что при высоких значениях градиента давления или фазовой проницаемости закон фильтрации стремится к линейному закону фильтрации Дарси. В ходе интерпретации выявлено, что градиент давления, меньше которого закон фильтрации отклоняется от линейного (граничный градиент), зависит от фазовой проницаемости. С уменьшением фазовой проницаемости от 0,006 мкм² (проницаемость для газа 0,025 мкм²) до 0,002 10^{-3} мкм² (проницаемость для газа 0,001 мкм²) граничный градиент давления увеличивается от 0,01 до 1 МПа/м. С учетом технологического режима работы скважин данный эффект является значимым при разработке Приобского месторождения. Следует отметить, что схожее отклонение от линейного закона Дарси в низкопроницаемых коллекторах было получено в лабораторных экспериментах на образцах керна месторождений Daqing и Changqing в Китае (проницаемость 0,001 мкм²).

Для учета эффектов нелинейности закона фильтрации при моделировании разработки месторождений эмпирическая зависимость интегрирована в Корпоративный гидродинамический симулятор NGT BOS. С целью проведения расчетов в гидродинамическом симуляторе дополнительно была модернизирована расчетная схема.

В качестве подтверждения точности расчетов на гидродинамическом симуляторе были повторены лабораторные эксперименты на керне. В результате проведенных математических экспериментов были определены недостающие параметры в эмпирической зависимости, а результаты математического эксперимента показали высокую сходимость с лабораторными данными. Тем самым была подготовлена основа для математического моделирования разработки низкопроницаемых коллекторов.