

РАЗВИТИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ НЕФТЕГАЗОВОЙ МЕХАНИКИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕФТИ И ГАЗА

А.М. Свалов

Направленность теоретических исследований лаборатории нефтегазовой механики ИПНГ РАН определяется практическими задачами повышения нефте- и газоотдачи продуктивных пластов, развития и совершенствования научных основ проектирования разработки месторождений и строительства скважин, повышения эффективности процесса бурения глубоких скважин.

Д.т.н. А.М. Сваловым разработана теория, описывающая механизм проявления площадных эффектов при волновом воздействии на продуктивные пласты. Согласно этой теории эффекты дальнего действия при волновом воздействии на продуктивные пласты объясняются тем, что упругие импульсы не воздействуют непосредственно на удаленные участки пласта, а инициируют и ускоряют процессы разгрузки упругих напряжений в пласте и в окружающей горной породе, накапливающихся в процессе изменения порового давления в залежи при ее разработке.

Таким образом, эффект ударно-волнового (вибросейсмического) воздействия, подобно «эффекту домино», обусловлен последовательным развитием в пространстве процесса высвобождения накопившейся упругой энергии в массиве горных пород. Происходящее при этой разгрузке перераспределение напряжений в пласте, явление ползучести горной породы приводят к изменению направлений локальных фильтрационных потоков и к вовлечению в фильтрационное движение неподвижных или малоподвижных целиков нефти на площади, охватываемой процессом перераспределения напряжений, что и обуславливает повышение нефтеотдачи продуктивного пласта (Свалов А.М. Механика процессов бурения и нефтегазодобычи. М.: Кн. дом «Либроком», 2009.256 с.).

Описан механизм, объясняющий появление низкочастотных пиков в микросейсмическом фоне над нефтегазовыми залежами, наличие которых используется в геофизических методах поиска нефти и газа (АНЧАР и др.). Показано, что наличие зоны перехода от нефте(газо)насыщенной части пласта к водонасыщенной, характеризующейся другими величинами эффективных значений упругих модулей, обуславливает развитие упругих

колебаний в породе с длиной волны, соразмерной с длиной переходной зоны, что является причиной появления пиков в диапазоне первых герц в микросейсмическом фоне над залежью.

Проанализированы закономерности напряженно-деформированного состояния породы и ее разрушения на поздней стадии разработки газовых месторождений. Установлено, что при падении пластового давления в залежи зоной концентрации избыточных напряжений является призабойная зона газодобывающей скважины. Особенно интенсивно разрушение породы происходит в зоне опоры обсадных труб на забой скважины и в зоне продуктивного пласта, примыкающей к его кровле. После разрушения жесткой связи обсадных труб с цементным камнем и породой зоной концентрации напряжений становится окрестность перфорационных каналов, разрушение которых приводит к образованию непрерывно растущих каверн, заполняемых частицами разрушенной породы. Показано, что для снижения интенсивности разрушения коллектора на поздней стадии разработки залежи целесообразно еще на стадии строительства скважины укреплять зоны, инициирующие начальную стадию процесса разрушения породы в призабойной зоне.

Установлено, что в процессе снижения пластового давления в разрабатываемой газовой залежи происходит изменение направленности массообменных процессов в призабойной зоне добывающей скважины. На начальной стадии разработки влагосодержание газа в призабойной зоне понижается и происходит осаждение воды в пористой среде. При снижении пластового давления ниже некоторого предельного значения, наоборот, происходит осушение породы в призабойной зоне движущимся газом. Установленные особенности процессов массообмена позволяют рекомендовать для снижения выноса песка из газодобывающей скважины на поздней стадии разработки залежи обрабатывать призабойные зоны добывающих скважин реагентами, связывающими частицы разрушенной породы при ее осушении.

Методами математического моделирования установлено, что трещиноватость, являющаяся свойством, присущим всем породам-коллекторам, как терригенным, так и карбонатным, сложным образом влияет на фильтрационные процессы в продуктивных пластах. Показано, что при обтекании фильтрационным потоком изолированной трещины даже в случае однофазной фильтрации в окрестности трещины в зоне контакта потоков, входящих и выходящих из нее, градиенты давления близки к нулю, что является предпосылкой образования застойных зон в продуктивном пласте. Таким образом, трещинова-

тость породы может препятствовать эффективному вытеснению пластового флюида, влияя на фильтрационное течение аналогично непроницаемым экранам.

Двухфазность фильтрационного потока, взаимодействующего с трещинами, приводит к проявлению еще более сложных гидродинамических механизмов, обусловленных действием капиллярных сил в окрестности трещин. Действительно, при раскрытии трещины на ширину, значительно превышающую средний размер пор, величина капиллярного давления в трещине, обратно пропорциональная ширине раскрытия, будет значительно меньше величины капиллярного давления в пористой среде, что является причиной формирования некоторой переходной зоны нефте(водо)насыщенности в окрестности трещины. Наличие таких переходных зон вблизи трещин приводит к увеличению остаточной нефтенасыщенности породы. Показано также, что если трещина не имеет достаточной протяженности в направлении потока, то формирование переходной зоны в ее окрестности приводит к увеличению фильтрационного сопротивления течению двухфазной жидкости. Отсюда, в частности, следует, что фазовые проницаемости, используемые при моделировании фильтрационных процессов в продуктивных пластах и определяемые на кернах, имеющих относительно малые размеры, не отражают влияния разномасштабных трещин, неизбежно присутствующих в реальных условиях, и их необходимо адаптировать к этим реальным пластовым условиям.

Капиллярные явления, обусловленные наличием поверхностей раздела жидких фаз в поровом пространстве, играют важную роль в распределении фаз по этому пространству, то есть определяют вид кривых фазовых проницаемостей и значения предельных величин насыщенности порового пространства несмешивающимися жидкостями.

Аналитически установлено, что для объяснения капиллярных эффектов, наблюдаемых в реальных горных породах, недостаточно представлений об образующихся менисках как о сферических или цилиндрических поверхностях, формирующихся в трубках кругового сечения или между двумя параллельными стенками.

Показано, что неправильная форма пустотного пространства и, в частности, наличие в нем острых углов, образуемых соприкасающимися зернами породы, обуславливает формирование устойчивых менисков вполне определенного вида, что, в свою очередь, определяет форму существования несвязных фаз. К такому несвязному состоянию фаза, насыщающая пористую среду, приходит в пределе при ее вытеснении другой фазой, и минимальное остаточное насыщение данной фазой при многофазной фильтрации определя-

ется формой образующегося устойчивого мениска. Кроме того, в процессах нефтенакпления предельная устойчивая форма менисков, при отсутствии вытесняющего перепада давления, определяет и характер вертикального движения нефти сквозь гидрофильные породы как всплывание микрокапель нефти, отделяющихся от неподвижных капель, находящихся в порах нижележащих пород.

Проведенный анализ возможной устойчивой формы существования несмачивающей фазы в пористой среде позволяет также более адекватно интерпретировать данные измерения капиллярного давления, получаемых с помощью традиционно используемых капилляриметров и центрифуг.

Аналитически установлено, что при анизотропии горных пород, обусловленной их слоистой неоднородностью, при фильтрационном движении поперек слоев капиллярные силы обуславливают более высокий уровень остаточной насыщенности смачивающей фазой, сравнительно с движением вдоль слоев. Этот вывод позволяет, в частности, раскрыть физический механизм эффектов гидрофобизации призабойных зон добывающих скважин.

Д.т.н. В.А. Черных разработаны теоретические основы гидрогазодинамики горизонтальных газовых и газоконденсатных скважин. Реализован системный подход к анализу процессов течения газа и конденсата в пласте, горизонтальном стволе и вертикальном участке скважины, что позволяет учесть взаимовлияние и взаимозависимость этих процессов. Этот подход составляет основное достоинство и отличие разработанной автором методики проектирования разработки газовых месторождений от методик, применяемых в настоящее время.

Наиболее сложной проблемой проектирования разработки газовых месторождений с применением горизонтальных скважин является обоснование системы размещения, длин, направлений и дебитов горизонтальных стволов. Проблема становится практически неразрешимой, если пытаться оптимизировать эту систему исходя из технологических параметров каждой отдельной скважины. Наличие большого количества независимых и неизвестных параметров делает эту цель недостижимой даже с помощью самой современной вычислительной техники. Показано, что более перспективным является другой путь решения этой проблемы, а именно, «от общего к частному», когда система размещения, длин, направлений и дебитов горизонтальных скважин определяется исходя из определенных общих принципов гидродинамики.

Разработаны вариационные принципы обоснования систем разработки газовых месторождений с применением горизонтальных скважин, изложенные в монографиях: *Черных В.А.* Гидрогазодинамика горизонтальных газовых скважин. М.: Вниигаз, 1999. 189 с.; *Черных В.А., Черных В.В.* Математические модели горизонтальных и наклонных газовых скважин. М: Нефть и газ, 2008. 460 с.; *Черных В.А., Черных В.В.* Методы функциональных итераций в математической физике и моделировании добычи газа. М.: Нефть и газ, 2009. 258 с.; *Черных В.А., Черных В.В.* Аналитические методы моделирования продуктивности горизонтальных скважин. М.: Нефть и газ, 2011. 350 с.).

Разработана концепция динамического анализа разработки залежей нефти и газа, в основе которой лежит аналогия между эволюцией технологических параметров разработки месторождения и движением материальных объектов. Автором обобщен кинематический подход на случай эволюции разработки залежей нефти и газа.

Разработанный метод позволяет выявлять взаимосвязи между технологическими параметрами, выраженные в виде дифференциальных уравнений, которые не могут быть получены традиционными методами. Динамический метод анализа разработки залежей нефти и газа позволяет, в отличие от существующих геолого-математических моделей, учитывать влияние тех процессов в пласте, которые не могут быть адекватно выявлены при традиционном подходе к анализу разработки.

Так, например, традиционные методы расчётов, основанные на использовании разностной модели залежи, не позволяют адекватно оценить влияние водоносного бассейна на разработку залежи в силу того, что информация о его размерах и коллекторских свойствах пород обычно недостаточно достоверна. Метод динамического анализа позволяет использовать, хотя и в неявной форме, именно реальную информацию о свойствах пласта. Этот метод позволяет более адекватно, по сравнению с традиционными методами, прогнозировать изменение технологических параметров разработки и более обоснованно выбирать технологический режим разработки.

Проанализированы физические основы применения концепции дробного исчисления в теории разработки нефтяных и газовых месторождений. Полученные результаты позволяют сделать выводы, имеющие практическое значение для разработки нефтяных и газовых месторождений (*Летников А.В., Черных В.А.* Основы дробного исчисления. (С приложениями в теории разработки нефтяных и газовых залежей, подземной гидродинамике и динамике биологических систем). М.: Нефть и газ, 2011. 429 с.).

Разработана новая концепция моделирования газовой залежи как динамической системы, в соответствии с которой процесс разработки залежи описан с использованием понятий и терминов нелинейной динамики.

В настоящее время при составлении математической модели газовой залежи используется уравнение фильтрации газа с учётом большого количества скважин в виде источников (при закачке) или стоков (при отборе) газа. Применение современных компьютеров и методов прикладной математики позволяет успешно выполнять расчёты гидродинамических параметров разработки газовой залежи, однако не гарантирует получение реальных, т.е. соответствующих действительности, результатов. В первую очередь это связано с тем, что в уравнение фильтрации входят параметры (пористость, проницаемость, толщина и т.д.) пласта, которые могут быть известны только в отдельных точках, а не во всём объёме пласта-коллектора. Более того, значения этих параметров, даже осреднённые по толщине пласта, невозможно оценить с достаточной точностью по данным гидродинамических и геофизических исследований скважин.

Наиболее рациональным путём решения этой проблемы является использование агрегированных параметров газовой залежи, осреднённых по зонам дренирования. При этом разбиение пласта на зоны дренирования производится в соответствии с геологическим строением пласта; вместо обычных параметров фильтрации (пористость, проницаемость, толщина пласта) используются коэффициенты перетока газа между зонами дренирования, а вместо текущих (поточечных) значений давления (плотности) газа – их средневзвешенные по объёму зоны дренирования величины. Конкретные примеры применения разработанной концепции моделирования приведены в монографии: *Черных В.А., Черных В.В. Теория и практика динамического анализа разработки залежей нефти и газа. М.: Нефть и газ, 2010. 276 с.*

Д.т.н. Е.К. Юниным разработана математическая модель бурильной колонны, необходимая для совершенствования процессов проектирования бурения глубоких скважин. Работа породоразрушающего инструмента в разработанной модели описана с помощью специального граничного условия на забое скважины, учитывающего изменение момента на долоте в результате его износа в процессе углубления забоя, что непосредственным образом влияет на динамику колонны в силу эволюции граничного условия на забое бурящейся скважины.

Предложен алгоритм отработки породоразрушающего инструмента при бурении вертикальных скважин, учитывающий влияние динамики бурильной колонны на процесс углубления забоя. Подобный подход позволяет разработать методы проектирования режимов бурения с учётом влияния механических свойств компоновок колонны и указать пути решения задач, связанных с прогнозированием результатов эффективности разрушения горной породы и надлежащего выбора параметров режима бурения.

Разработан метод расчета усилий, возникающих при работе бурильной колонны в режиме крутильных автоколебаний, для компоновки, включающей разнородные участки бурильных труб. Результаты этих исследований необходимы для усовершенствования оценки силовых нагрузок в бурильной колонне, возникающих в случае крутильных автоколебаний колонны при бурении скважин роторным способом. Результаты работы отражены в следующих монографиях: *Юнин Е.К., Хегай В.К.* Динамика глубокого бурения. М.: Недра, 2004. 288 с.; *Юнин Е.К.* Введение в динамику глубокого бурения. М.: Кн. дом «ЛИБРОКОМ», URSS, 2009.168 с.; *Юнин Е.К., Хегай В.К.* Основы механики глубокого бурения. М.: Недра, 2010.168 с.).

К.т.н. А.А. Бузовым разработана математическая модель для описания процессов разделения газожидкостных потоков в конических сепараторах. Результаты проведенных численных исследований стали основой трех патентов, полученных в соавторстве с В.А. Максимовым.

Способ и устройство, соответствующие патенту РФ №2319111 "Способ и устройство для измерения расходов фаз газожидкостного потока в трубопроводе с последующим измерением расходов составляющих компонент жидкой фазы", отличаются от аналогов малыми габаритами устройства и возможностью с достаточной для практики точностью измерять расходы отдельных составляющих компонент жидкой фазы.

Способ реализуется следующим образом. В цилиндрический трубопровод устанавливается навстречу потоку калиброванный отборник пробы. Представительность отбора пробы достигается как за счет формы отборника пробы, выполненного, например, в форме креста, так и за счет изокинетичности самого отбора, при сохранении неизменными линий тока газа и конденсата.

Изокинетичность отбора пробы и компенсация гидравлического сопротивления измерительной системы достигаются за счет установки специального регулирующего крана и установки эжектора на выходе из магистрали отбора, который может быть уста-

новлен в самом трубопроводе. Вместо эжектора на выходе из магистрали отбора может быть установлен эксгаустер. Отобранная проба сепарируется, и измеряются расходы газа и конденсата, а по известному соотношению площадей отборника и трубопровода устанавливается истинный расход фаз в трубопроводе. Способ может работать как при ручной регулировке, так и автоматически.

В соответствии с патентом "Способ выделения жидкости из газожидкостного потока в трубопроводе и многоступенчатое устройство для его осуществления" (патент РФ № 2304015) многоступенчатый конический сепаратор имеет несколько ступеней. Каждая ступень, в свою очередь, состоит из трех основных элементов: входного участка с внутренним сужающимся конусом (конфузора), щелевого отборника пленки и выходного диффузора. Газожидкостный поток, попадая из подводящего трубопровода в сужающийся канал сепаратора, начинает разгоняться, линии тока капель вследствие своей инерционности отстают от линий тока газа, и капли начинают выпадать на стенки конфузора, образуя жидкую пленку. В конце конфузора установлена втулка щелевого отборника, открытая со стороны потока и имеющая диаметр, несколько меньший диаметра на концевой проточке конфузора.

Таким образом, получается кольцевой отборник пленки, из которого жидкость по магистрали отбора через регулирующий кран поступает в емкость для сбора.

Экономичность многоступенчатого конического сепаратора обусловлена простотой его изготовления и обслуживания, малыми радиальными габаритами, сравнимыми с габаритами подводящего трубопровода и, следовательно, небольшой металлоемкостью. Предварительные численные исследования показали, что для удовлетворительной работы многоступенчатого конического сепаратора достаточно трех его ступеней.

Для улучшения работы конического сепаратора был предложен многоступенчатый конический сепаратор с закруткой потока (патент РФ № 2384358). Отличительной особенностью этого сепаратора является то, что на входе в первую ступень сепаратора установлен завихритель, состоящий из венца спрофилированных лопаток, которые создают закрутку потоку и придают каплям составляющую скорости, направленную к стенкам сепаратора.

В диффузорах в местах крепления спрофилированного центрального тела к корпусу сепаратора также установлены венцы спрофилированных лопаток, создающих завихрение потоку на входе в следующую ступень сепаратора.

Установка завихрителей в коническом сепараторе приводит к увеличению его коэффициента сепарации.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при проектировании трехступенчатых конических сепараторов, применяемых на поздней стадии разработки газовых месторождений.