УДК 622.276

Н.А.ШЕВКО
ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефть»

РЕГУЛИРОВАНИЕ РАЗРАБОТКИ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА ОСНОВЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПОТОКОВ СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИИ

Разработана методика прогнозирования технологической эффективности геолого-технологических воздействий, проводимых на скважинах с целью регулирования разработки нефтяных залежей. В основу прогнозирования показателей эффективности положен метод численного моделирования многофазных фильтрационных потоков сложной геометрии в околоскважинном пространстве, который базируется на использовании неортогональных нерегулярных несогласованных разностных сеток, детально описывающих особенности изменения гидродинамического состояния околоскважинной зоны пласта в результате воздействия.

В результате с использованием полученной модели возможна наиболее оптимальная разработка нефтяных и газовых месторождений в сложно построенных коллекторах и межблоковых пространствах. Достоинством является также возможность оптимизации процессов добычи пластового флюида с вводом дополнительно полученных данных, что позволяет оперативно реагировать на изменение фильтрационно-емкостных свойств продуктивных пластов.

The technique of forecasting of technological efficiency of geology-technological influences spent on wells with the purpose of regulation of mining of oil pools is developed. In a basis of forecasting of parameters of efficiency the method of numerical modeling multiphase filter of flows of complex(difficult) geometry in under well space is fixed which is based on use not orthogonal irregular unmatched minys of grids in details describing feature of change of a hydrodynamical condition under well of a zone of a seam as a result of influence.

In result with use of the received model the mining oil and gaseous deposits in the difficultly constructed collectors and MMP spaces is possible(probable) optimal. Advantage is also opportunity of optimization of processes of a mining of pore fluid with input of the in addition received data, that allows operatively to react to change of filtrational-capacitor properties of productive seams.

Основным инструментом управления разработкой и увеличения показателей нефтеизвлечения месторождений является применение различных геолого-технологических воздействий (ГТВ) на пласт и околоскважинную зону пласта (ОЗП). Планирование оптимальных ГТВ в конкретных геолого-физических и технологических условиях относится к важнейшим задачам управления разработкой нефтяных залежей. Большая разновидность существующих в ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефть» ГТВ на ОЗП определяет целесообразность использования комплексных подходов для прогнозирования показателей эффективности на конкретных объектах разработки.

Реализация такого подхода возможна на основе постоянно-действующих геолого-технологических моделей (ПДМ) залежей. ПДМ увеличивают уровень достоверности рекомендаций на стадии выбора и планирования технологий ГТВ за счет более полного учета имеющейся геолого-промысловой информации и использования набора инструментов математического моделирования различных технологических процессов нефтеизвлечения и нефтедобычи. Однако модели пластов в рамках существующих ПДМ,

основанных на традиционных конечно-разностных методах, не позволяют детально учесть геометрию ствола скважины, неоднородность ОЗП, сложность околоскважинных потоков и особенности изменения гидродинамического состояния ОЗП в результате ГТВ (появление перфорационных отверстий и щелей, зон уплотнений и разуплотнений, трещин гидроразрыва, зон и участков около стенок скважин с различными фильтрационно-емкостными свойствами). Это обусловлено математической сложностью совместного гидродинамического моделирования разномасштабных (динамически и геометрически) фильтрационных процессов в пласте и ОЗП с соответственно низкими и высокими скоростями фильтрации, для которого необходимо обычное описание границ пласта посредством крупных (50 м) ячеек сетки и детальное описание геометрии ствола скважины и ее особенностей посредством очень подробных (2 см) сеток. Все это требует моделирования скважины в блоке (узле) разностной сетки, используемой для моделирования внутрипластовых потоков. При этом параметры потока на стенке скважины определяются через параметры потока в блоке, интегрально характеризующим некоторую область возле скважины. Приток к «точечной» скважине через грани блоков (по ребрам сетки) при таком подходе неадекватно описывает приток к реальной скважине (не учитывается, например, радиальность притока), что существенно влияет на расчетные показатели ее режима работы. Для решения этой проблемы существует два основных подхода, учитывающих особенности течения возле «точечной» скважины: CCF-метод (Completion Connection Factor) с введением поправочных множителей в коэффициенты разностных уравнений, относящихся к скважине, и LGR-метод (Local Grid Refinement), основанный на предположении, что погрешность любой дискретной схемы прямо пропорциональна размеру использованных блоков, представляющих собой локальное (регулярное радиальное или декартовое) сгущение сетки в окрестности скважины.

Поскольку эти подходы не решают в полном объеме проблем детального моделирования околоскважинных особенностей, то для повышения прогностической способности гидродинамических моделей залежей и осуществления возможности детального моделирования ГТВ на ОЗП, необходимо использовать детальную численную гидродинамическую модель ОЗП, построенную на основе эффективных численных схем на нерегулярных разностных сетках, топологическая и геометрическая структуры которых практически не фиксированы. Это позволит согласовывать геометрию сетки, используемую для расчета, с ожидаемой конфигурацией течения, неоднородностью по фильтрационно-емкостным свойствам (ФЕС) и формой стенки скважины и пласта, т.е. меньшим числом блоков описать необходимые особенности фильтрации при заданной точности. Трудности решения задач с подобными сетками связаны со сгущением их в окрестности скважины, а также с произвольной их геометрией: более сложный метод дискретизации (получения потоковых коэффициентов) дифференциальных уравнений (ДУ) и нелинейных ДУ многофазной фильтрации, наличие нерегулярной структуры разряженной матрицы при решении системы линейных алгебраических уравнений и применение специальной схемы ее хранения. Это ограничивало широкое использование метода, однако он применялся многими исследователями для моделирования комплексных (сложных) резервуаров в двумерной двухфазной постановке, в однофазной трехмерной и трехмерной многофазной постановке. Возможность реализации эффективных численных методов позволили применить данный подход для создания модели ОЗП.

Консервативный разностный аналог ДУ для случая трехфазной фильтрации (модель «черной нефти») строится для модели ОЗП* на основе метода опорных операторов** с использованием так называемого смешанного конечно-элементного метода. В качестве

---

* Разностные схемы на нерегулярных сетках / А.А.Самарский, А.В.Колдоба, Ю.А.Повещенко и др. Минск, 1996.

** *Шевко Н.А.* Модель фильтрации флюидов в нефтяном пласте в областях со сложной геометрией фильтрационного потока // Тезисы докл. на VIII Всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике / Ин-т механики сплошных сред УрО РАН. Пермь, 2001.

опорного оператора выбран оператор GRAD, который аппроксимируется непосредственно. Для получения определяемого оператора DIV, а также условий на поверхности сопряжения несогласованных сеток используются соотношения векторного анализа. Схема пространственно-временной дискретизации математических уравнений модели ОЗП основана на специальной модификации явного (IMPES) и неявного последовательного (SEQ) методов.

Всю совокупность физико-химических воздействий на ОЗП в результате кратковременного ГТВ будем рассматривать как воздействия, приводящие, в конечном итоге, только к изменению ФЕС ОЗП и формы стенки скважины, которые непосредственно влияют на гидродинамическое состояние и продуктивные характеристики ОЗП. Величина этих изменений определяется из промысловых и экспериментальных исследований разработчиков конкретной технологии воздействия в конкретных геологических условиях либо по результатам оценки эффективности проведенных воздействий с помощью ретроспективного математического моделирования с настройкой неизвестных результатов воздействия.

Общая схема прогнозирования технологической эффективности ГТВ с применением моделей ОЗП и ПДМ может иметь несколько вариантов, различающихся требованиями к вычислительным мощностям, необходимым для проведения расчета в разумные сроки, и для детального учета изменения состояния ОЗП в результате воздействия.

В первом варианте схемы с повышенной вычислительной стоимостью получения решения предполагается совместное решение модели пласта и моделей ОЗП интересующих скважин. Математически это реализуется в виде неявных или явных объединений решений на основной сетке (пласта) и подсетке (ОЗП), как правило, несогласованных между собой. В этом случае изменение свойств в модели ОЗП в результате конкретной технологии ГТВ сразу позволит определить прогнозные показатели эффективности воздействия с учетом реакции залежи. Затем эти показатели для разных технологий сравниваются и выбирается максимально эффективное воздействие. Этот вариант целесообразно использовать для получения высокой точности оценки показателей или при незначительной детализации ОЗП отдельных скважин.

Во втором варианте модель ОЗП используется для численного получения корректирующих процесс фильтрации на основной сетке (в которой опущены некоторые детали ОЗП) коэффициентов и псевдофункций для проводимостей граней (ребер) ячеек основной сетки и ячеек со скважиной. Эти коэффициенты (модифицирующие абсолютную проницаемость, показатели скин-эффекта или продуктивности скважины) и псевдофункции (модифицированные фазовая проницаемость и капиллярное давление), учитывают особенности фильтрации у скважины (псевдорадиальный приток, конусообразование, наличие трещин, траектории ствола скважины, несовершенство вскрытия) на «упрощенной», менее детальной модели ОЗП. Этот вариант позволяет повысить точность прогноза показателей эффективности воздействия без увеличения размерности модели залежи и времени выполнения расчета.

В третьем варианте, используя корректирующие множители и псевдофункции, производится моделирование залежи без детализации ОЗП, затем выбирается конкретная скважина, ее ОЗП и участок модели пласта, на внешней границе которого задаются граничные условия для давлений или потоков, неизменность которых при замене околоскважинных блоков модели пласта на модель ОЗП гарантируется размерами выбранного участка. В этом случае возможно получение большей точности, чем во втором варианте, при значительно меньших вычислительных затратах, чем в первом варианте. В настоящее время в рассматриваемой методике практическое применение нашли только второй и третий варианты.

Общая схема оценки технологической эффективности проведенных ГТВ с использованием ПДМ и модели ОЗП также имеет три аналогичных варианта, но для опреде-

ления изменения состояния ОЗП необходимо выполнение ретроспективного моделирования залежи до проведения ГТВ, построение базового варианта динамики показателей разработки, последующее моделирование с настройкой неизвестных параметров результатов воздействия, сравнение показателей разработки и оценка эффективности ГТВ.

Рассматриваемая методика применялась для расчета эффективности различных видов ГТВ, применяемых в ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефть». Применение модели ОЗП для расчета эффективности различных видов перфорационных работ (пулевая, кумулятивная, сверлящая, щелевая перфорации скважины) позволило в рамках одной расчетной схемы притока учесть траекторию ствола скважины, расположение интервала перфорации относительно границ пласта, геометрию каждого перфорационного канала, неоднородность ФЕС коллектора возле стенок перфорационных каналов и скважины, а также рассчитать скин-эффект от каждого вида несовершенства скважины и ее продуктивность.

Для залежей Шумовского месторождения на основе детальной модели ОЗП для блоков с нагнетательными скважинами была проведена модификация фазовой проницаемости, необходимость которой была обусловлена значительным расхождением расчетных и фактических показателей режима работы скважины для залежей с повышенной вязкостью. По результатам перспективного многовариантного моделирования с максимизацией коэффициента извлечения нефти осуществлено распределение общего объема закачки воды по нагнетательным скважинам этих объектов.

Для оценки эффективности применения кислотных обработок на скважинах Шумовского месторождения проводилось моделирование ОЗП с адаптацией ее параметров (размеры области изменения проницаемости и диапазон ее изменения), что позволило определить динамику технологического эффекта во времени и конечную его величину, а также выяснить причину пониженной эффективности технологии на трех скважинах.

Использование разработанной методики позволит в конкретных геолого-физических условиях скважин определять эффективность новых типов технологий перфорации, применяемых на объектах территории Пермской области, осуществлять планирование гидроразрыва пласта, водоизоляционных работ и некоторых комплексных физико-химических воздействий, совершенствовать систему управления разработкой месторождений за счет более полного использования имеющейся информации и применения инструментов моделирования технологических процессов нефтеизвлечения.