

# СОВМЕЩЕННОЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ НЕФТЕНАСЫЩЕННОГО ПЛАСТА В SIMULIA ABAQUS

С.В. Лукин<sup>1,а</sup>, главный специалист, Н.В. Дубиня<sup>1,2,б</sup>, главный специалист

<sup>1</sup> ООО «Газпромнефть-НТЦ»,

<sup>2</sup> Московский Физико-Технический Институт (Государственный Университет),

Данная работа посвящена использованию геомеханического моделирования при разработке нефтяных и нефтегазовых месторождений, характеризующихся сильно выраженной трещиноватостью нефтенасыщенной породы. В ходе работы было обнаружено, что стандартные подходы, уже реализованные в коммерческих пакетах, использующихся в нефтяном инжиниринге, не могут в полной мере описать процессы, связанные с влиянием динамики поля напряжений на фильтрационно-емкостные свойства пород. Для корректного описания поведения пласта в ходе разработки были использованы возможности SIMULIA Abaqus для описания напряженно-деформированного состояния пласта и возможности Schlumberger ECLIPSE для анализа многофазной фильтрации. Взаимодействие между используемыми продуктами осуществлялось с помощью дополнительного модуля. По результатам гидродинамического и геомеханического моделирования была уточнена динамика добычи и были предложены оптимальные депрессии для разработки месторождения

## Введение

В настоящее время ряд объектов, разрабатываемых нефтяными компаниями, характеризуется значительной степенью трещиноватости вмещающей породы. Трещиноватые коллектора обладают рядом особенностей, в числе которых сложная зависимость фильтрационно-емкостных свойств породы от локального напряженно-деформированного состояния. Несмотря на то, что подобная зависимость наблюдается и в других случаях, она, как правило, не носит анизотропный характер. Проницаемость же трещины зависит не только от давления жидкости, находящейся в ней, и первого инварианта тензора напряжений, действующих во вмещающей породе, но и от разницы между напряжениями, действующими в плоскости трещины, и нормальными напряжениями. Как было обнаружено в ходе экспериментов по фильтрации жидкости через керны с исследуемого месторождения, влиянием контраста напряжений на проницаемость породы пренебрегать нельзя, что приводит к необходимости детального анализа напряженно-деформированного состояния и его динамики в ходе разработки месторождения. Следует отметить, что изменение проницаемости за счет изменения напряженного состояния, в свою очередь, влияет на распределение в пласте порового давления, что, в свою очередь, влияет на перераспределение эффективных напряжений. Таким образом, встает задача организации процесса моделирования, в котором учитывается взаимное влияние гидродинамических и геомеханических процессов друг на друга

Как было обнаружено в ходе анализа методов, использующихся при геомеханическом анализе процесса разработки месторождений, им присуща ограниченная функциональность при учете сложного влияния напряженного состояния на фильтрационные свойства породы. Для корректного описания поля напряжений было решено воспользоваться возможностями SIMULIA Abaqus. Из-за того, что исследуемое месторождение характеризуется не только трещиноватостью породы, но и наличием газовой шапки, для моделирования процессов фильтрации использовались возможности гидродинамического симулятора Schlumberger ECLIPSE. Для осуществления взаимосвязи между двумя программами был создан дополнительный программный модуль, реализующий передачу данных, а также использующийся для интеграции в расчет тех или иных результатов лабораторных исследований.

В ходе работы была создана принципиальная рабочая схема, позволившая провести ряд расчетов и в дальнейшем использовавшаяся для уточнения ожидаемого профиля добычи. На основе результатов моделирования были определены оптимальные режимы работы добывающих скважин.

## **Общий подход к геомеханическому моделированию**

Работа посвящена построению трехмерной динамической геомеханической модели нефтегазового месторождения. Такая модель позволяет анализировать напряженно-деформированное состояние и поле поровых давлений, действующих в пласте, на различных этапах разработки. Одним из ключевых факторов, существенно усложняющих создание модели, является тот факт, что коллектор отличается существенной трещиноватостью, что необходимо корректно учесть при моделировании.

Геомеханическая модель должна давать возможность анализировать два основных типа процессов, происходящих в разрабатываемом пласте в ходе разработки: фильтрационные потоки, вызванные неоднородностью поля поровых давлений, и сопутствующее изменение напряженно-деформированного состояния. Результаты расчетов на геомеханической модели дают возможность уточнять динамику разработки с учетом эффектов геомеханического характера. В частности, изменение напряженно-деформированного состояния может существенно повлиять на фильтрационно-емкостные свойства среды. В свою очередь, это позволяет оптимизировать систему разработки месторождения: уточнить значения депрессий, с которыми работают добывающие скважины, определить места, в которых бурение следует проводить в первую очередь.

Создание геомеханической модели месторождения характеризуется большим количеством используемых данных наблюдения. К ним можно отнести:

1. Геологические особенности строения месторождения. Геологические модели позволяют с достаточно высокой точностью построить геометрическую модель и расчетную область.
2. Сейсмические, керновые и геофизические исследования. С помощью информации, полученной с помощью этих исследований, можно распределить по ячейкам расчетной области важнейшие параметры для последующего анализа: фильтрационно-емкостные свойства породы для расчета процессов фильтрации и упругие и прочностные свойства, необходимые при геомеханическом моделировании. Кроме того, дополнительные исследования могут быть использованы для того, чтобы определить степень влияния напряженно-деформированного состояния на фильтрационно-емкостные свойства.
3. Одномерные геомеханические модели. С помощью специальных исследований можно определить точные распределения главных напряжений вдоль уже разбуренных скважин. Эти данные используются для задания корректных граничных и начальных условий при моделировании разработки.

После создания расчетной области и заполнения ячеек информацией о свойствах породы проводится анализ начального напряженно-деформированного состояния. Исходное состояние формируется под действием двух факторов: силы тяжести вышележащих слоев и влияния горизонтально направленных тектонических сил. Корректность задания нагрузок, действующих на рассматриваемый объект, регулируется совпадением напряжений в окрестности уже пробуренных скважин. Сформированное поле напряжений и порового давления используется как начальное условие для дальнейшего динамического расчета.

После задания начальных условий производится динамический расчет фильтрационных процессов и совмещенный с ним расчет напряженно-деформированного состояния. В данной работе для осуществления этого расчета использовались возможности SIMULIA Abaqus по механическому моделированию, тогда как гидродинамическое моделирование осуществлялось с помощью алгоритмов ECLIPSE.

## **Математическая постановка**

Поведение пласта в ходе разработки рассматривалось в рамках предположений теории пороупругости. Основные соотношения, определяющие динамические процессы в насыщенной пористой среде, есть: уравнение неразрывности, записанное для скелета и для флюида; уравнения движения и закон сохранения энергии.

Система уравнений замыкается с добавлением определяющих соотношений – уравнений, определяющих свойства среды и не являющихся универсальными.

Как показали специальные исследования, проведенные на образцах с рассматриваемого месторождения, и предварительные оценки, диапазон изменения ключевых параметров напряженно-деформированного состояния позволяет воспользоваться приближением теории пороупругости – линеаризованными определяющими соотношениями.

При численном моделировании реализуется расчет описанной системы уравнений в области, построенной на основании геологической модели (рис. 1):

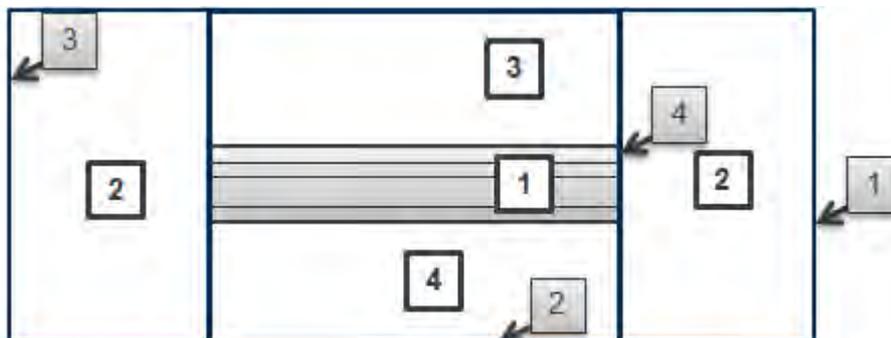


Рис. 1 – схема расчетной области

Рассматривается нефтенасыщенный коллектор (область 1) и вмещающее ее пространство (области 2, 3 и 4). Наиболее важной из частей вмещающего пространства является область вышележащих пород 3 – именно она в значительной степени формирует начальное напряженно-деформированное состояние в коллекторе за счет действия силы тяжести. К этой области также предъявляются определенные требования: для корректного геомеханического анализа необходимо задать распределение плотности породы по ячейкам с высокой точностью. В рамках задачи моделирования разработки для оптимизации работы скважин упруго-прочностные свойства материала ячеек этой области не являются критичными, в отличие от задач о проседании земной поверхности в ходе разработки.

Боковые зоны 2 используются для того, чтобы не допустить сильных боковых деформаций под действием собственного веса в окрестности рассматриваемого коллектора. Горизонтальные размеры этих зон должны существенно превышать размеры рассматриваемой области месторождения.

Нижележащая зона 4 также используется для уменьшения влияния краевых эффектов и играет роль слоя между коллектором и жесткой границей на большой глубине.

При решении задачи на определение напряженно-деформированного состояния ставятся следующие граничные условия: условия нулевых горизонтальных смещений на отдаленных границах 1 и 3; условие равенства нулю всех перемещений на нижней границе 2 и условие равенства нормальных смещений на границе между коллектором и вмещающей областью 4.

Гидродинамическая задача решается только в нефтенасыщенной области 1. В качестве граничного условия ставится условие неперетока жидкости из-за границы пласта 4. Кроме него в ряде расчетных узлов ставится условие постоянного порового давления или утечек жидкости с постоянной скоростью – таким образом, моделируется работа добывающей скважины.

Результатом расчета является определение поля напряжений и деформаций во всей расчетной области 1, 2, 3, 4, а также поле поровых давлений в области коллектора 1.

### **Особенности объекта исследования**

Как было указано выше, объектом проведенного исследования являлось месторождение с ярко выраженной естественной трещиноватостью, обуславливающей в значительной степени проницаемость коллектора. С точки зрения гидродинамического и геомеханического моделирования эта особенность заключается в наличии сложной связи между локальным напряженно-деформированным состоянием и фильтрационными свойствами породы.

Так как проницаемость обусловлена трещиноватостью, максимальное воздействие на ее изменение оказывают напряжения, действующие ортогонально трещинам. В ходе работы был

проведен ряд экспериментов по определению проницаемости образца при различных нагрузках (рис. 2).

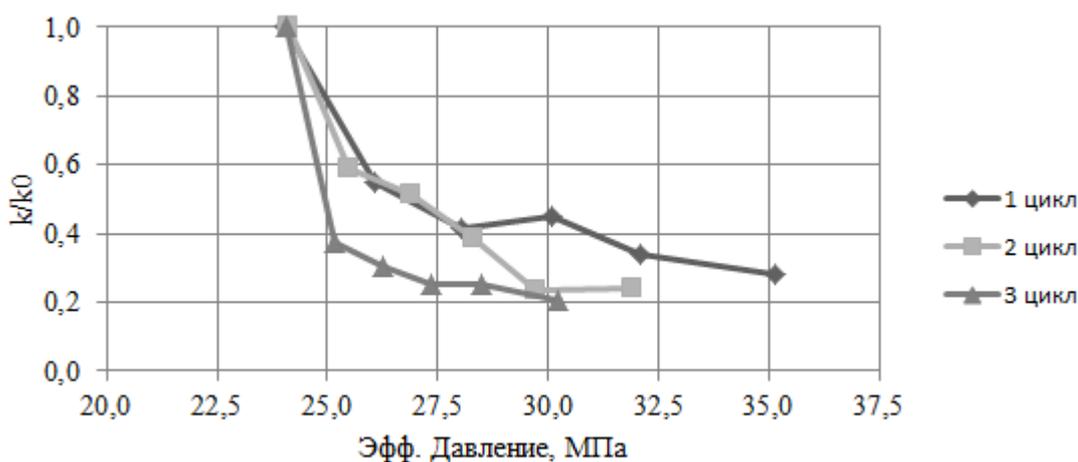


Рис. 2 – пример фильтрационного эксперимента

На графике показаны результаты интерпретации фильтрационного эксперимента: по оси ординат отложены значения отношения проницаемости при данной нагрузке к начальному значению; по оси абсцисс отложены значения эффективного давления – разницы между первым инвариантом тензора напряжений, соответствующего условиям нагрузки, и поровым давлением в образце. На одном образце проводилось несколько экспериментальных циклов, различающихся соотношением между главными напряжениями.

В случае отсутствия трещиноватости следовало бы ожидать, что характер падения проницаемости с увеличением эффективного давления не должен зависеть от соотношения между горизонтальными напряжениями. В рассматриваемом же случае видно, насколько сильно напряженное состояние влияет на изменение проницаемости.

Обнаруженная связь между напряженным состоянием и фильтрационными свойствами среды приводит к тому, что стандартные гидродинамические модели, не рассматривающие детально изменение напряженно-деформированного состояния, могут давать существенно неверные результаты. Именно этим была вызвана необходимость совмещенного гидродинамического и геомеханического расчета, причем в этом расчете должны использоваться тем или иным образом задаваемые связи между напряжениями и проницаемостью, полученные из эксперимента.

### Схема расчета

Для выполнения численного моделирования использовались возможности двух программных пакетов: SIMULIA Abaqus для расчета напряженного состояния и Schlumberger ECLIPSE для расчета фильтрационных потоков.

Расчетная модель в Abaqus включала в себя все области, изображенные на рис. 1. При этом для внутренней области было решено использовать элементы C3D6P, а для внешней области – элементы C3D6. Соответственно, для всех элементов задавались плотность и упругие модули, а для элементов коллектора также задавались фильтрационно-емкостные свойства. Упругие модули распределялись по пространству для различных литотипов с использованием дополнительных алгоритмов, реализованных в специализированном геологическом ПО.

На начальном этапе моделирования реализовывался расчет начального поля напряжений с помощью стандартной процедуры – шага Geostatic. После проведения этого расчета было получено начальное распределение напряжений, которое не должно было противоречить профилям напряжений, построенным вдоль уже пробуренных скважин. Простые расчеты показали существенное несовпадение этих профилей напряжений с полученным после расчета, что объясняется действием в регионе тектонических сил, вызывающих значительную анизотропию горизонтальных напряжений. Чтобы смоделировать действие этих сил, к отдаленным вертикальным границам области (1 и 3 на рис. 1), были приложены дополнительные нагрузки, сложным образом распределенные по азимутальному углу. Значения и распределения этих

нагрузок подбирались методом последовательных приближений к профилям напряжений вдоль пробуренных скважин. В результате было получено некоторое поле напряжений, которое использовалось в качестве начального условия при дальнейшем моделировании.

Общая схема расчета, используемая при динамическом анализе, показана на рис. 3. В ходе работы было обнаружено, что функционала используемых продуктов недостаточно для того, чтобы учесть и наличие на месторождении газа, и сложную связь между напряжением и проницаемостью. Для того чтобы корректным образом учесть эти особенности, была реализована следующая схема расчета:

На каждом временном шаге в качестве начального условия является полученное на предыдущем шаге (или на предварительном расчете Geostatic для первого шага) поле поровых давлений и поле напряжений. С помощью гидродинамического симулятора рассчитываются поровые давления в каждой ячейке расчетной области, пористость и проницаемость. Используемый симулятор рассчитывает гидродинамику с помощью метода конечных объемов, поэтому для корректной интерпретации полученные результаты нужно перенести на конечно-элементную сетку, используемую в Abaqus. Полученное поле порового давления экспортируется в Abaqus и используется в качестве начального условия на шаге Transient Consolidation. В результате рассчитывается обновленное поле напряжений, которое оказывает влияние на проницаемость в соответствии с результатами эксперимента. Также напряженное состояние меняет распределение пористости в пространстве и геометрическое положение узлов расчетной сетки. Эти изменения рассчитываются в отдельном модуле и снова передаются в гидродинамический симулятор. Такой цикл повторяется несколько раз, до тех пор, пока изменение поля поровых давлений по сравнению с предыдущей итерацией не оказывается менее некоторого наперед заданного числа. После выполнения этого условия производится переход на следующий временной шаг, и цикл начинается снова.

Такая схема расчета позволяет с достаточной точностью определить динамику поля порового давления и изменение напряженно-деформированного состояния в процессе разработки месторождения.

Достоверность результатов проверялась на модельной синтетической задаче, допускающей аналитическое решение: коллектор представлялся вертикальным цилиндром, разработка велась с помощью одной вертикальной скважины, находящейся на оси симметрии.

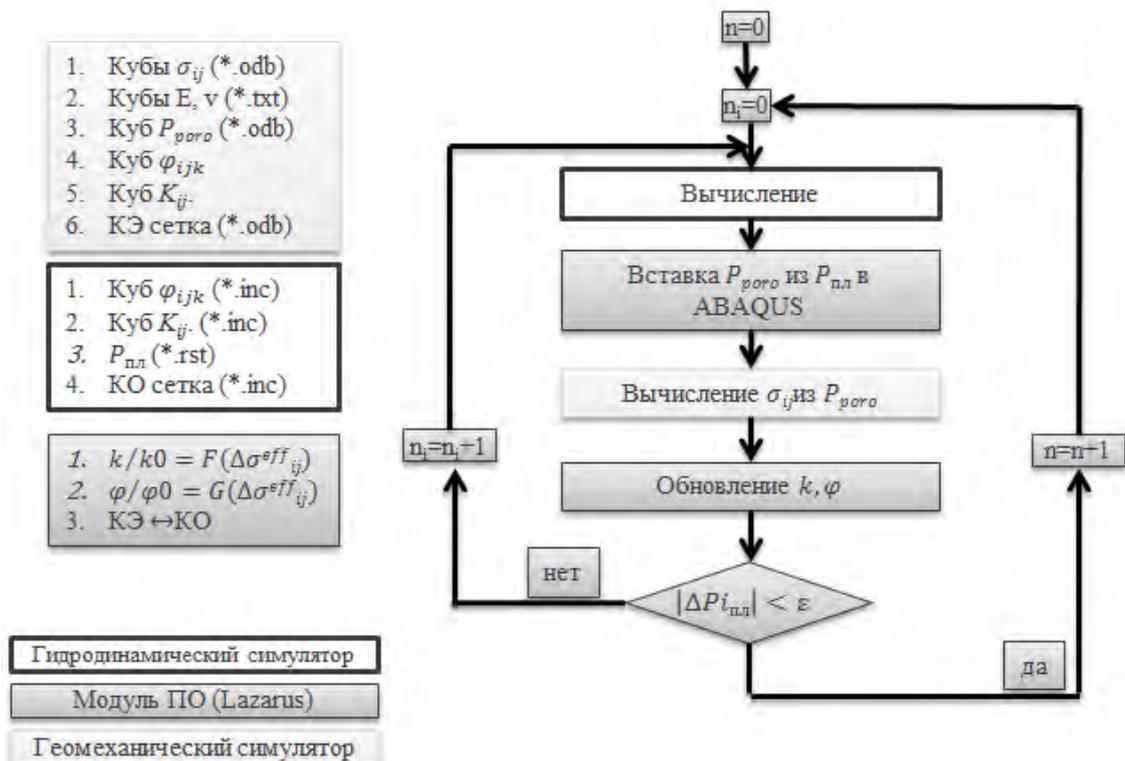


Рис. 3 – принципиальная схема расчета

## Проведенные расчеты

В ходе работы был проведен ряд расчетов на различных расчетных схемах.

В первую очередь был создан ряд синтетических геомеханических моделей, характеризующихся упрощенной геометрией месторождения, большими размерами элемента (порядка 25 на 25 на 0.2 м) и использованием элементов C3D8P при анализе геомеханического поведения коллектора. Всего расчетная область состояла примерно из 20 000 элементов, а расчет 10 лет разработки проводился за 5 – 10 минут. Эти модели использовались для настройки расчета и отладки написанного модуля.

К моделям следующего иерархического уровня можно отнести геомеханические модели, используемые для экспресс-оценки разработки. В них использовалась геометрия, построенная с помощью геологических карт, характерный размер элемента составлял 10 – 20 метров, расчетные элементы C3D6P, расчет продолжался 1-2 часа. Такие модели использовались для анализа различных параметров работы добывающих скважин.

Проведенные на этих моделях расчеты позволили спрогнозировать динамику добычи жидкости, нефти и газа при различных условиях разработки: различных депрессиях, с которыми работают скважины, различных их положениях и т.д. После проведения множественных расчетов были выбраны оптимальные значения депрессий и предложена стратегия разработки месторождения.

Полноценная геомеханическая модель содержала значительное (более 1 000 000) количество элементов и использовалась для прогноза добычи при параметрах работы добывающих скважин, оптимизированных на моделях предыдущего иерархического уровня.

Наглядным является результат моделирования накопленной добычи с течением времени (Рис. 4). Были рассмотрены два варианта: полноценное совмещенное гидродинамическое и геомеханическое моделирование по предложенной схеме и только гидродинамическое моделирование, обычно используемое при подобном анализе.

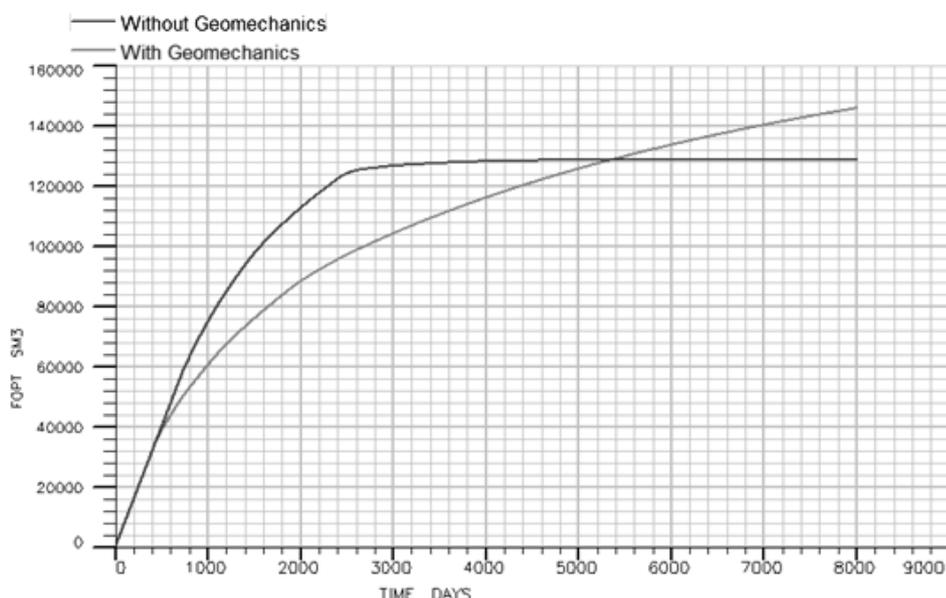


Рис. 4 – накопленная добыча с учетом и без учета геомеханики

Результат расчета показал следующую тенденцию: если не учитывать процессы, связанные с изменением напряженно-деформированного состояния, темпы возрастания накопленной добычи на начальном этапе разработки оказываются выше, чем в случае учета изменения напряжений. В то же время, темпы падения дебита в первом случае выше, чем во втором, в результате чего общая накопленная добыча спустя значительное время оказывается больше, если учитывать геомеханические процессы. При этом разница между накопленной добычей может составлять до 20%, что приводит к необходимости корректного учета изменения напряженно-деформированного состояния и его влияния на фильтрационно-емкостные свойства при проектировании разработки таких месторождений.

## **Заключение**

В ходе работы была реализована схема совмещенного гидродинамического и геомеханического расчета поведения нефтесодержащей породы в ходе разработки месторождения. Была создана полноценная модель конкретного участка месторождения и адаптирована под текущие условия разработки. На этой модели был проведен ряд расчетов, которые позволили определить динамику поля порового давления и напряженно-деформированного состояния при различных параметрах разработки месторождения. Интерпретация полученных результатов позволила создать рекомендации по оптимальным режимам работы добывающих скважин, разрабатывающих данный участок месторождения.

В дальнейшем предполагается расширить возможности созданной схемы по решаемым задачам: могут быть рассмотрены задачи проседания земной поверхности над разрабатываемым месторождением, задачи, связанные с проведением специальных мероприятий по повышению нефтеотдачи и другие.

## **Список литературы**

- Bostrøm B., Skomedal E.* Reservoir Geomechanics with ABAQUS, Proc. ABAQUS Users' Conference, 2004.
- Capasso G., Mantica S.* Numerical Simulation of Compaction and Subsidence using Abaqus, Proc. ABAQUS Users' Conference, 2006.