УДК 622.276

ОЦЕНКА ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ СОЗДАНИЯ ТРЕХМЕРНОЙ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ С ЦЕЛЬЮ КОНТРОЛЯ ПЕСКОПРОЯВЛЕНИЯ

FEASIBILITY STUDY OF 3D GEOMECHANICAL MODEL CONSTRUCTION FOR SAND PRODUCTION CONTROL

И. И. Гурбанов, А. А. Хакимов
I. I. Gurbanov, A. A. Khakimov

Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень

Ключевые слова: ***пескопроявление; геомеханическая модель; разрушение призабойной зоны;***
Key words: ***sand production; geomechanical model; near-wellbore rock failure***

Перед нефтедобывающими компаниями при принятии решений о необходимости применения мер для контроля пескопроявления возникает проблема, связанная с экономической эффективностью. Наиболее экономически целесообразным является принятие таких решений по аналогии с соседними скважинами. Существует ряд статистических и математических моделей, позволяющих спрогнозировать условия пескопроявления для конкретной скважины. Недостатком таких решений является тот факт, что зачастую они привязаны к конкретному типу или расположению месторождения. К тому же в аналитических методах не всегда учитывается наличие второй фазы, уменьшение порового давления с течением разработки, учет геометрии перфорации, скин-эффекта в призабойной зоне и ряд других критических параметров [1].

Наиболее сложным и точным методом является создание геомеханической 3D-модели и предсказание вероятности пескопроявления на ее основании, этот метод является также и самым затратным. Для создания модели, помимо большого объема данных, необходимо также время на создание и калибровку модели.

Эффективность использования такого подхода неоспорима для некоторых задач, например для определения актуальных горизонтальных стрессов при прогнозе направления распространения трещин ГРП или авто-ГРП. В случае с прогнозированием пескопроявления нет однозначного ответа на вопрос о необходимости создания геомеханической модели.

В данной статье на примере синтетической модели проводится оценка целесообразности создания геомеханической 3D-модели для прогнозирования пескопроявления.

Для проверки целесообразности использования 3D-моделирования на основании данных, полученных при освоение месторождения, была создана синтетическая геомеханическая 3D-модель. Данные прочностных исследований керна взяты с реального отчета. Чтобы увидеть наличие или отсутствие эффекта от проведения предварительного связанного расчета, сравнение будет проводиться только по скважинам, на кото-

рых проводились исследования. Пластичные деформации учтены только для гидродинамической сетки, используется критерий пластичности Мора-Кулона.

Эксперимент был построен по следующей схеме:

1. Расчет вероятности пескопроявления по критерию Мора-Кулона на основании свойств в ячейках, вскрытых скважиной. Предполагается, что данные, использованные для создания геомеханической модели, были получены в 1990 году. Насыщенность и давление взяты из расчета гидродинамической модели на 2015 год. Назовем данную модель — Модель 1.

2. Запуск связанного расчета геомеханической и гидродинамической модели. Связанные шаги — один раз в 5 лет. На основании результатов расчета связанной модели на 2015 год проводится расчет вероятности пескопроявления по критерию Мора-Кулона. Назовем данную модель — Модель 2.

3. Расчет критического давления пескопроявления для всех ячеек гидродинамической сетки на основании полученных результатов.

4. Сравнение и анализ результатов.

5. Проверка теории на реальной модели месторождения в Северном море.

Параметры связанной геомеханической и гидродинамической модели (свойства ячеек указаны средние по пласту)

Размерность гидродинамической сетки	149 x 182 x 177
Шаг гидродинамической сетки по I,J	100 x 100 м
Средняя пористость	0,1484
Средняя проницаемость	137 мД
Модуль Юнга	15,25
Коэффициент Пуассона	0,27
Коэффициент Био	1
Одноосная прочность на сжатие	160 бар
Внутренний угол трения	36,79

Количество скважин: 6 добывающих, 5 нагнетательных. Данные по прочностным исследованиям керна есть для скважин A12 и B9.

Граничные условия:

Градиент минимального горизонтального стресса	0,120965 бар/м
Азимут минимального горизонтального стресса	90 градусов
Отношение максимального горизонтального стресса к минимальному	1,12

Алгоритм связанного расчета:

1) инициализация гидродинамической модели;
2) передача начальных давлений, насыщенностей и температуры в геомеханический симулятор;
3) инициализация геомеханической модели;
4) расчет гидродинамической модели до связанного отчетного шага;
5) передача измененных давлений, насыщенностей и температуры в геомеханический симулятор;
6) расчет геомеханической модели с обновленными данными;
7) передача обновленных пористости и проницаемости в гидродинамическую модель;
8) возврат к шагу 4, повторение вплоть до окончания расчета гидродинамической модели.

На рис. 1 можно увидеть внешний вид сетки связанной модели в разрезе по K.

Гидродинамическая сетка встроена в расширенную геомеханическую для более корректного учета граничных условий. Ячейки за пределами гидродинамической (встроенной) сетки закрыты для потока флюидов и используются только для учета геомеханических эффектов. Размер этих ячеек увеличивается по геометрической прогрессии с коэффициентом 1, 2 для отсутствия резких изменений свойств вблизи встро-

енной сетки, а также для улучшения сходимости на границах встроенной сетки. Укрупнение ячеек для удаленных областей незначительно влияет на точность расчета, но позволяет избежать его дополнительного замедления.

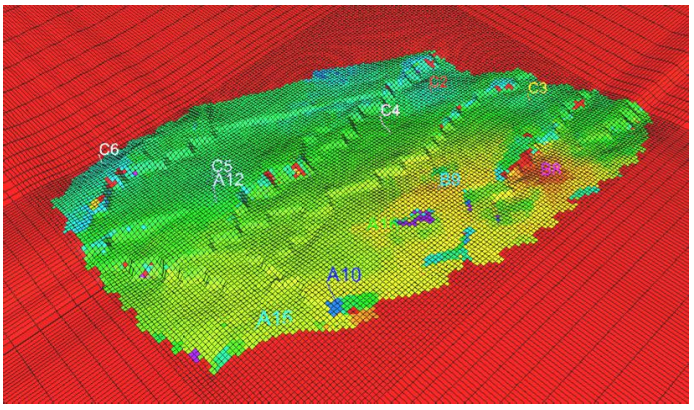

Рис. 1. ***Внешний вид связанной модели, разрез по К***

На рис. 2 можно увидеть изменение критического давления пескопроявления для вертикальной скважины с перфорацией диаметром 18 мм, для Моделей 1 и 2 вдоль ствола скв. А12 результаты отличаются, но незначительно.

Можно сделать вывод, что для данной скважины результат, полученный из Модели 1, достоверен. При эксплуатации пласта 1 (отметки 1 878–1 897) риска пескопроявления нет, при эксплуатации пласта 2 (1 935–1 990) при падении давления на забое ниже 209 бар (207,4 по результатам Модели 1) начнется разрушение призабойной зоны, и велик риск пескопроявления.

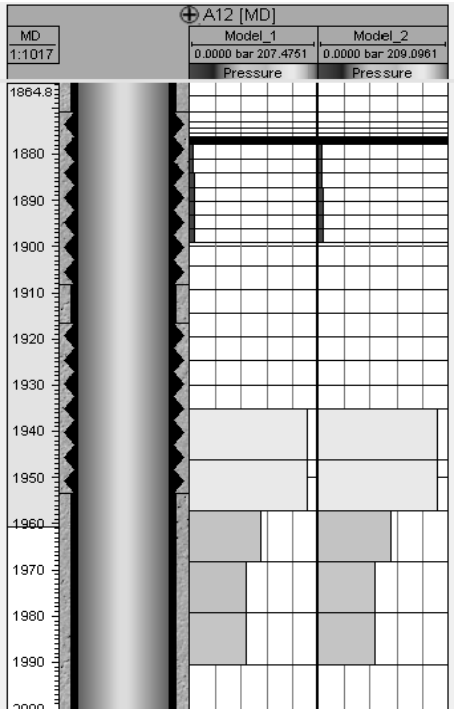

Рис. 2. ***Критическое давление пескопроявления вдоль ствола скв. А12, полученное из Модели 1 и Модели 2***

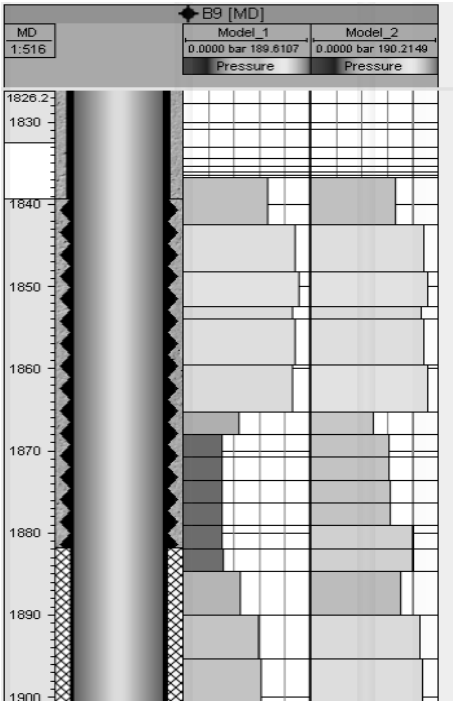

Рис. 3. ***Критическое давление пескопроявления вдоль ствола скв. В9, полученное из Модели 1 и Модели 2***

В данном случае использование результатов Модели 1 также является приемлемым, поскольку максимальное по пласту критическое давление пескопроявления практически не изменилось, изменилось его распределение вдоль ствола скважины. Это связано с изменившимся давлением и водонасыщенностью в призабойной зоне вследствие реактивации разлома скважиной С2, результатом чего стало появление гидродинамической связанности между скважинами С2 и В9. Исходя из сравнения результатов Модели 1 и Модели 2, можно сказать, что при наличии большого количества разломов или трещиноватого коллектора (учет двойной пористости/проницаемости в гидродинамической модели) можно рекомендовать построение связанной геомеханической модели. Поскольку проводился расчет с двусторонней связкой, поведение гидродинамической модели также изменилось вследствие реактивации разлома. Данное наблюдение может служить дополнительной причиной использования связанной модели для подобных месторождений. При отсутствии таких особенностей месторождения статическая модель или аналитические одномерные расчеты должны дать достаточно точный результат.

При попытке повторения данного эксперимента на модели реального месторождения в Северном море выяснилось, что данные по предельным давлениям пескопроявления, полученные из статической геомеханической модели, не всегда совпадают с результатами связанной модели, несмотря на то, что реактивации разломов/сети трещин в модели не происходит.

В ходе сравнения статической и связанной моделей можно было обнаружить различное распределение стрессов из-за пластичных деформаций породы. После анализа истории разработки был сделан вывод, что это вызвано динамикой изменения пластового давления в связанной модели. В процессе разработки месторождения был период, когда из-за задержки ввода скважин ППД пластовое давление сильно уменьшилось, а потом было восстановлено. В статическую модель подавалось просто значение давления на последнем временном шаге, перепады пластового давления не были учтены.

С целью воспроизведения поведения реальной модели была создана Модель 3. При создании геомеханической Модели 3 гидродинамический расчет был изменен таким образом, что нагнетательные скважины вводились через 6 лет после начала эксплуатации месторождения. Это привело к уменьшению пластового давления до 127 бар (рис. 4).

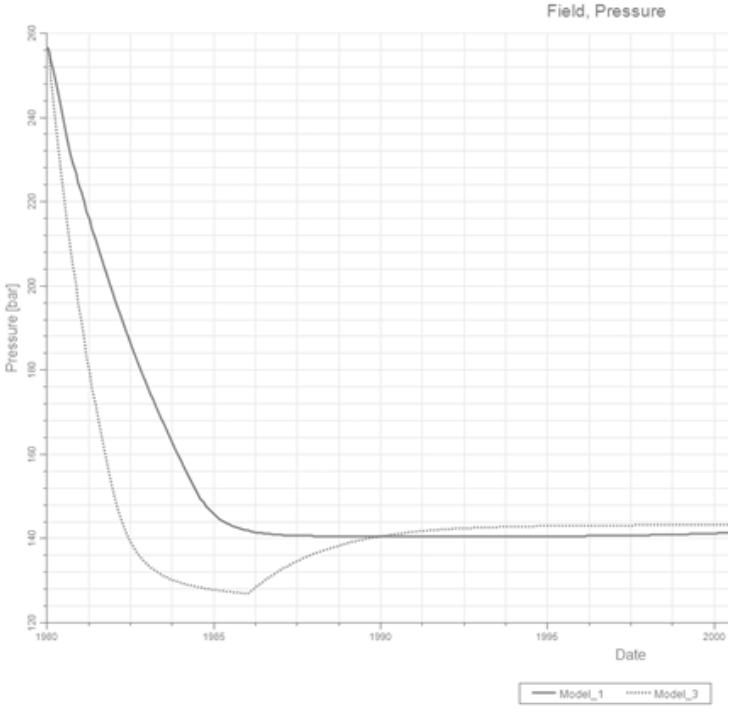

Рис. 4. ***Изменение пластового давления со временем для моделей 1 и 3***

На рис. 5. можно видеть изменение критического давления пескопроявления вдоль ствола скважины А12 для Моделей 1 и 3. Как и ожидалось, в Модели 3 критическое давление намного выше — 284 бар. Это вызвано пластичной деформацией коллектора вследствие уменьшения минимального пластового давления за период разработки скв. А12.

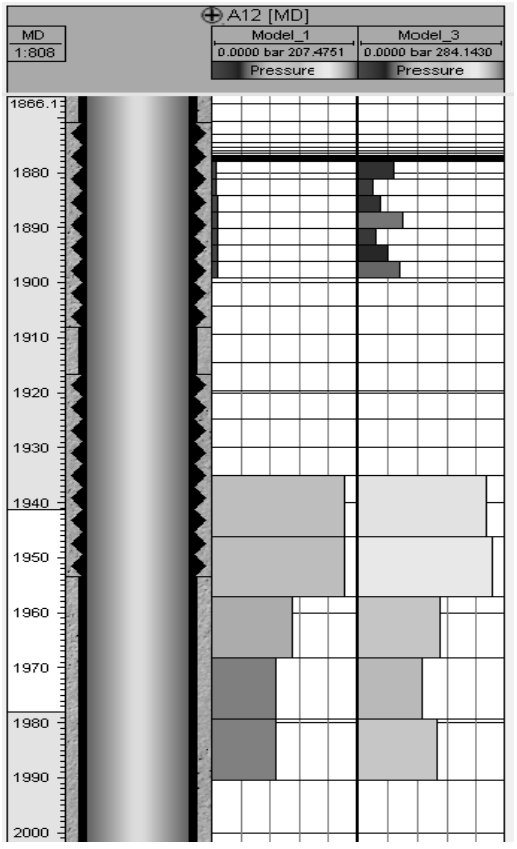

Рис. 5. ***Критическое давление пескопроявления вдоль ствола скв. А12, полученное из Модели 1 и Модели 3***

На основании данного результата можно рекомендовать использование геомеханической модели в случае, если за время разработки месторождения локальные изменения давления могли привести к пластическим деформациям коллектора.

Было также проведено исследование с целью выявить ситуации, не рассмотренные в эксперименте, при которых также можно рекомендовать использование связанной геомеханической модели.

Одним из методов снижения вероятности пескопроявления является проведение ориентированных перфораций вдоль максимального горизонтального стресса [2]. В случае если планируется использовать данный метод контроля пескопроявления, связанная модель необходима для корректного определения максимального горизонтального стресса.

Отдельно можно выделить случай, когда на основании лабораторных исследований керна было доказано ослабление породы при воздействии воды [3]. В то время как увеличение сжимаемости при увеличении водонасыщенности в ячейке можно смоделировать и в гидродинамическом симуляторе, для моделирования уменьшения прочности породы понадобится геомеханическое моделирование. В противном случае прогноз критического давления пескопроявления будет некорректным.

Таким образом, на основании проведенных экспериментов можно утверждать, что использование связки геомеханической и гидродинамической 3D-модели для прогноза вероятности пескопроявления актуально в следующих случаях:

- В период разработки месторождения наблюдаются достаточно сильные локальные изменения параметров, которые могут спровоцировать разрушение горной породы. В общем случае — давления, в некоторых [3] — водонасыщенности. Стоит отметить, что связанная модель в данном случае имеет смысл, если используемый геомеханический симулятор поддерживает пластичные деформации.
- В случае если создание связанной модели может изменить результаты гидродинамического расчета. Как правило, это осложненные геологические условия — большое количество разломов, трещиноватые и сильно сжимаемые коллекторы. При изменении результатов гидродинамического расчета будут меняться напряжения в пласте и, соответственно, условия пескопроявления.

В остальных случаях можно рекомендовать использование либо статической геомеханической модели — данный подход полезен тем, что можно получить данные по скважи-

нам, на которых не проводились исследования, а также выбрать оптимальную точку входа и азимут при бурении новых скважин; либо использование аналитических методов.

Список литературы

1. Morita, N. et al. Parametric Study of Sand Production Prediction: Analytical Approach, SPE Paper 16990, Dallas, 1987
2. Tronvoll, J. et al., The Effect of Oriented Perforations as a Sand-Control Method: A Field Case Study From the Varg Field, North Sea, SPE Paper 86470, Lafayette, 2004
3. Cook, C. et al., An Approach to Simulating the Effects of Water-Induced Compaction in a North Sea Reservoir, SPE Paper 71301, Dallas, 2001

Сведения об авторах

Гурбанов Илья Исламович, *аспирант, Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень, тел. 89220029962, e-mail: ilyagurbanov@gmail.com*

Хакимов Артур Альфредович, *аспирант очной формы обучения, Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень, тел. 89673829334, e-mail: ArtX1990@gmail.com*

Information about the authors

Gurbanov I. I., *postgraduate of Tyumen State Oil and Gas University, phone: 89220029962, e-mail: ilyagurbanov@gmail.com*

Khakimov A. A*., postgraduate of Tyumen State Oil and Gas University, phone: 89673829334, e-mail: ArtX1990@gmail.com*