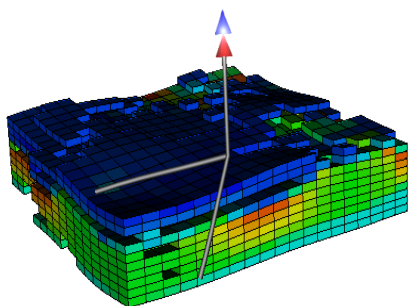


Интегрированное гидродинамическое моделирование системы «скважина-пласт»

Бураков И.М., Гарипов Т.Т., Шарипов Т.Р. (ООО «РН-УфаНИПИнефть»),
Зайдуллин Р.И. (УГАТУ).



Введение

Объем бурения «сложных» скважин (горизонтальных, многоствольных, скважин с управляющими устройствами) растет с каждым годом.

Оценка продуктивности «сложных» скважин требует применения усовершенствованных математических моделей. Так, увеличение длины скважины приводит к необходимости учета перераспределения скоростей в стволе и сил

трения.

Традиционно для описания совместной работы скважины и пласта используется метод узлового анализа, с помощью которого успешно решается большинство возникающих задач. Однако такой подход не применим в случаях продолжительного неустановившегося течения многофазной жидкости в скважине.

Наиболее общая постановка задачи для данной системы основывается на универсальных законах сохранения массы, импульса и энергии. Такая постановка задачи обеспечивает детальное описание потока, позволяет учесть падение давления по стволу скважины, а также изменение газосодержания в процессе движения жидкости. Однако применение общей постановки значительно увеличивает трудоемкость задачи.

Традиционно такие сложные модели используют для описания запуска/остановки скважины, нестабильных режимов добычи, кратковременных исследований скважин на восстановление и падение давления, оптимизация операции газлифта, а также химического воздействия.

Математическая модель нестационарного многофазного потока в системе пласт-скважина

В современных пакетах моделирования систем «пласт-скважина» получил распространение так называемый сквозной численный счет. При этом уравнения фильтрации в пласте и уравнения сохранения в скважине образуют совместную систему при наличии условия согласования в призабойной области скважины.

Для процессов нефтедобычи интерес представляют многофазные течения в скважинах, в процессе которых возможно выделение газа из нефти, сопровождающееся изменениями характера течения. Это приводит к дифференциальным уравнениям Навье-Стокса для смеси [1]:

$$\begin{aligned} \frac{D\rho v}{Dt} + (\rho v \nabla v) &= -\nabla p + F \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v) &= q \end{aligned} \quad (1)$$

где

- $\rho(t, x)$ – плотность фазы в пластовых условиях;
- $v(t, x)$ – скорость фазы в пластовых условиях;
- $q(t, x), F(t, x)$ – внешние силы.

Уравнения (1) должны быть дополнены уравнениями, описывающими фазовые переходы и некоторыми корреляционными соотношениями, описывающими совместное течение газа и жидкости. В качестве таких уравнений была рассмотрена модель “дрейфа потока” (DriftFlux) [2].

Модель, сформулированная таким образом, уже достаточно сложна, в связи с этим используются некоторые упрощения, а именно:

1. трехфазная нестационарная модель течения многофазной жидкости в скважине (насосно – компрессорная труба, затрубное пространство, область обсадной колонны) и упрощенная модель пласта, на базе уравнений пьезопроводности с учетом выделения газа;
2. полностью нестационарная модель движения многофазной жидкости в пласте, сопряженная с упрощенной моделью скважины.

Первая постановка рассматривается в контексте анализа нестационарных эффектов в самой скважине. К таким эффектам, безусловно, относятся период заполнения ствола скважины жидкостью или газом, взаимодействие затрубного пространства и насосно-компрессорной трубы (НКТ).

Задача второго типа возникает при комплексном анализе большого фонда скважин, эксплуатируемых на месторождении, и характерна для полномасштабного гидродинамического моделирования месторождений. К данному классу задач могут быть отнесены задачи построения моделей месторождений эксплуатируемых большим количеством горизонтальных скважин.

Как отмечалось, математическая модель течения в скважине основана на одномерной модели “дрейфа потока”, в которой закон сохранения количества движения смеси решается совместно с законами сохранения массы для каждой фазы и соотношением вертикальных скоростей согласно модели DriftFlux. Рассматривается изотермическое, баротропное движение

трехфазной жидкости, законы сохранения массы и импульса записываются в нестационарной постановке, используемые корреляции модели “дрейфа потока” описывают пузырьковый и снарядный режим течения. Кроме того, естественным образом модель позволяет описывать течения однофазных жидкостей и газов. Приведем основную систему уравнений для двухфазного случая:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha_k \rho_k}{\partial t} + \frac{\partial (\alpha_k \rho_k v_k)}{\partial z} &= 0, \quad k = (l, g) \\ \sum_{k=l, g} \frac{\partial \alpha_k \rho_k v_k}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial z} &= -(q_f + q_g), \\ v_g &= C_0 \cdot v_m + v_d \end{aligned} \quad (2)$$

где q_g – гравитационные потери давления, q_f – потери давления за счет сил трения, v_m скорость смеси, α_k , ρ_k – соответствующие объемные доли и плотности, здесь индекс $k = (l, g)$ соответствует l – жидкости, g – газу. Величина C_0 – профильный параметр, получаемый из профилей скорости и газовой концентрации, а v_d – скорость дрейфа газа. Зависимость скоростей газа и жидкости определяется заданием корреляционного соотношения между C_0 и v_d . Система замыкается граничными условиями и законами состояния, описываемыми в рамках модели “BlackOil”.

Все дифференциальные уравнения решаются численно методом контрольных объемов. Полученная полностью неявная разностная схема на каждом временном шаге образует нелинейную систему и разрешается методом Ньютона-Рафсона. Такая схема является абсолютно устойчивой в плане сходимости относительно выбора шага по времени и по пространству. Однако, быстро меняющийся профиль течений, с характерным параметром равным скорости звука, накладывает ограничения на временной шаг для получения детальной картины происходящих процессов.

Результаты численных расчетов

Возможность учитывать наряду с течением в НКТ также течение в затрубном пространстве, позволило расширить области применимости модели. Так, для задача поддержания искусственного режима фонтанирования (газлифт) [3] оказывается возможным прогнозировать неустойчивые режимы работы системы.

Суть газлифта заключается в принудительной подаче газа в скважину, который, смешиваясь, облегчает вес газожидкостной смеси и интенсифицирует процесс естественного фонтанирования. В процессе численных расчетов источником газа служил пласт, соединенный перфорацией со скважиной на ее забое. Заданием начального распределения давления в пласте, превышающего давление на забое скважины, и поддержанием постоянного давления на внешних границах пласта, скважина была переведена на стационарный режим фонтанирования. В заданный

момент времени скорость притока газа в скважину была искусственно сокращена, что привело к возникновению неустойчивого режима работы, характеризуемого периодическим изменением забойного давления и, соответственно, добычи жидкости (Рисунок 1). В иностранной литературе такой механизм получил название “кризисное” течение (“casing heading”) [3]. Из названия становится понятно, что основной механизм такого режима работы обеспечивается взаимодействием затрубного пространства и НКТ.

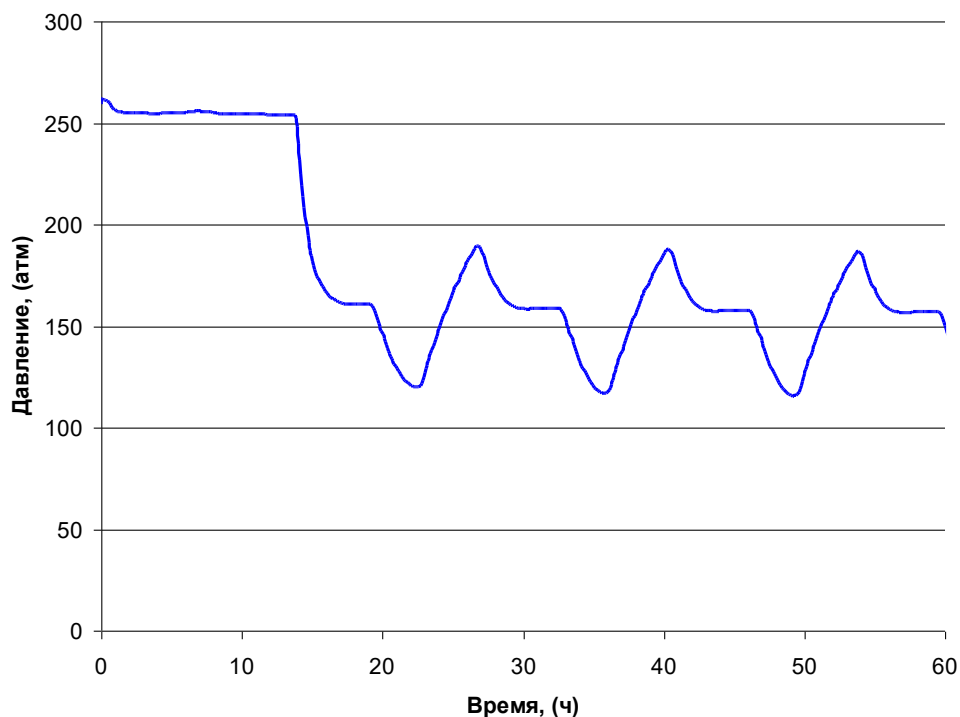


Рисунок 1. Изменение забойного давления.

Цель подобных расчетов найти практическое применение для оптимизации работы газлифтных скважин.

Модель также позволяет описывать нестационарные эффекты происходящие в скважине при процессах освоения. К таким технологиям относятся: освоение путем нагнетания газа в скважину (компрессирование, свабирование), химическое воздействие с выделением газа в скважине. При этом важно оценить необходимое количество газа и химических реагентов, необходимых для выноса жидкостей глушения и продуктов химической реакции.

Была рассмотрена задача газо-депресссионного освоения скважины (ГДО). Суть метода заключается в подаче химических реагентов на забой скважины. Взаимодействуя между собой, реагенты образуют газ, который под действием сил гравитации расширяется и всплывает, инициируя приток жидкости из пласта. Целью задачи является расчет динамики забойного давления и оценка объема притока жидкости в скважину.

Была рассмотрена задача газо-депресссионного освоения скважины (ГДО), заключающегося в подаче химических реагентов на забой скважины.

Взаимодействуя, реагенты образуют газ, который под действием сил гравитации расширяется и всплывает, инициируя приток жидкости из пласта.

Были проведены расчеты динамики забойного давления и оценка объема притока жидкости в скважину для различных типоразмеров (диаметр эксплуатационной колонны) и конструкций скважины (наличие или отсутствие пакеров на НКТ и затрубном пространстве) (Рисунок 2). В модели использовались PVT свойства флюидов, характерные для Приобского месторождения. Как видно, объем извлекаемой жидкости в процессе ГДО в поверхностных условиях составляет порядка $5-10 \text{ м}^3$ для газовой пачки объемом $200-300 \text{ м}^3$, конструкция скважины не имеет существенного значения.

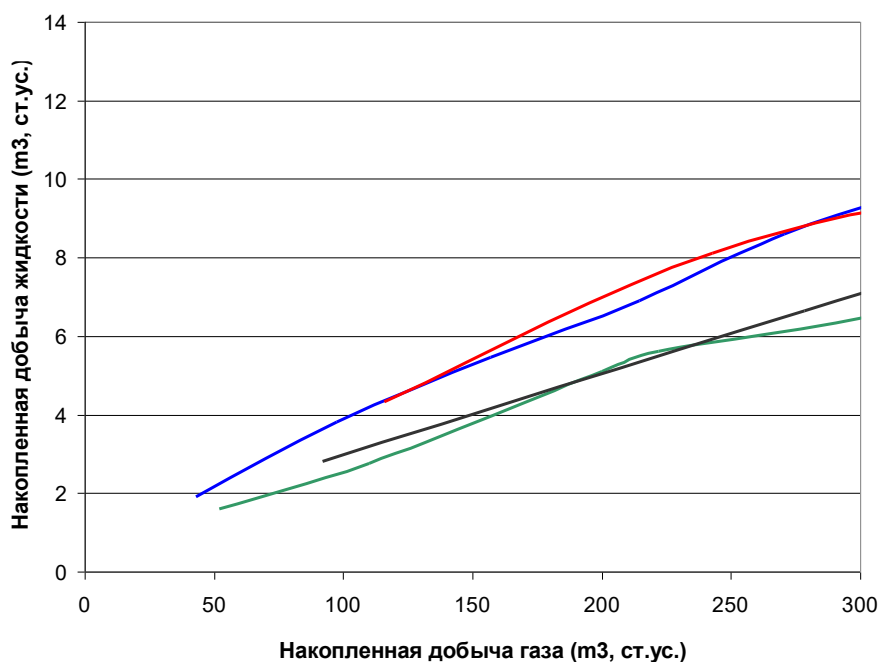


Рисунок 2. Зависимость объема добытой жидкости при различных конструкциях скважины.

При этом достигается депрессия на пласт порядка 80 атмосфер (Рисунок 3). Согласно графику минимальное значение забойного давления приходится на время около 2-х часов, что соответствует выходу газа на поверхность, далее забойное давление начинает восстанавливаться за счет притока из пласта.

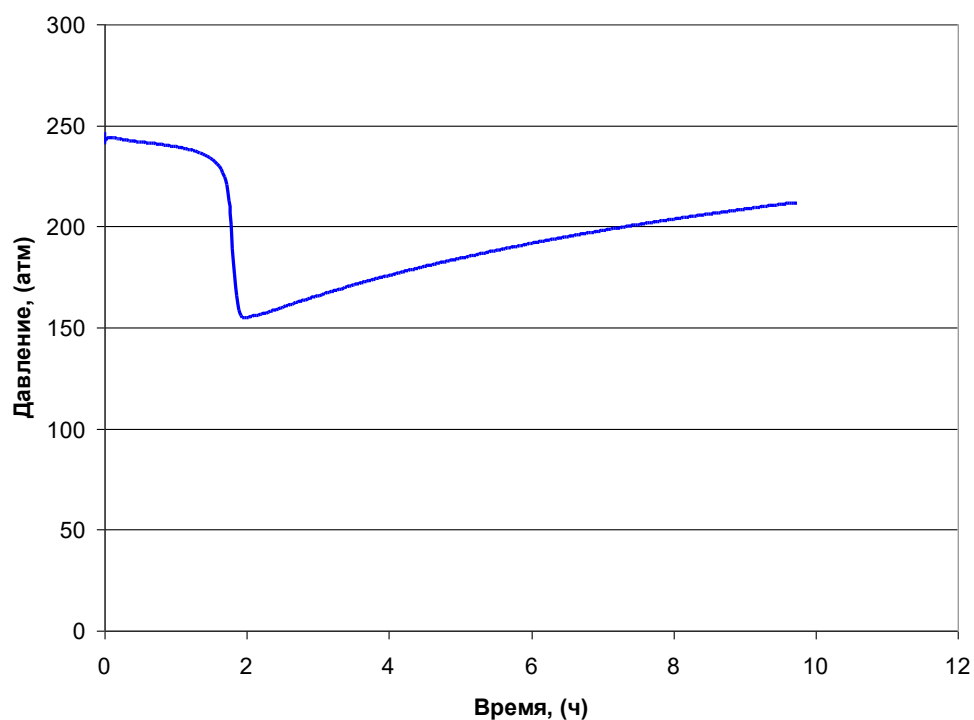


Рисунок 3. Изменение забойного давления.

Результаты проведенных расчетов носили практический характер и были предназначены для оценки эффективности использования газодепрессионного освоения для ряда скважин фонда механизированной добычи.

Заключение

Спектр задач, которые могут быть решены с использованием предложенной модели, велик. Так, кроме рассмотренных здесь примеров, отметим задачу вывода скважины на естественный фонтанирующий режим и задачу оценки потенциала фонтанирующего режима.

В качестве перспективы развития предлагается интеграция модели с пакетом гидродинамического моделирования NGT BOS, которая позволит строить гидродинамические модели, учитывающие особенности разработки сложными скважинами, оборудованными различными системами заканчивания. Такой подход увеличит надежность и точность результатов моделирования, позволит моделировать применение новых скважинных технологий.

Литература

1. Годунов С.К., Забродин А.В. и др., "Численное решение многомерных задач газовой динамики", издательство "Наука", Москва 1976.

2. Holmes, J. A.: “Application of a Multisegment Well Model to Simulate Flow in Advanced Wells,” paper SPE 50646, presentation at the 1998 SPE European Petroleum Conference – held in The Hague, The Netherlands, 20-22 October 1998.
3. W.L. Strum et. al., “Dynamic Reservoir Well Interaction,” paper SPE 90108, 2004.