

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПЛАСТОВ.

1. Введение. Особенности гидродинамических исследований пластов. Гидродинамическими называются методы, основанные на регистрации давления и расхода жидкости в скважине. Особая ценность этих исследований заключается в возможности зондирования пласта - в определении параметров пласта и призабойной зоны. Для этого исследуется связь между расходом жидкости в пласте Q и забойным давлением p :

$$Q = K \cdot (P_{пл} - p),$$

для установившихся режимов и

$$Q(t) = \int_0^t K(t - \tau) \cdot \frac{d(P_{пл} - p)}{d\tau} \cdot d\tau$$

- для нестационарных процессов.

Гидродинамическое зондирование пластов геофизиками традиционно выполняется с использованием испытателей пластов на трубах (ИПТ). Изменения здесь в последние годы произошли, в основном, в регистрации и обработке информации. Для регистрации кривых изменения давления используются автономные цифровые манометры (АЦМ-1,2; КСА-А2; ПМТГ и др.). Разработаны специальные системы автоматизированной обработки, реализующие классические алгоритмы ручной обработки и новые алгоритмы, основанные на оптимизации. Среди этих систем можно отметить такие, как FS-Гидродинамика (ЦГЭ, г.Москва), Гидрозонд (БашГУ, г.Уфа) и др. Считается, что исследования пластов ИПТ теоретически и методически достаточно обоснованы.

Наряду с данными ИПТ в практике геофизических исследований скважин (ГИС) в последние годы заметно увеличился объем информации, обрабатываемой как данные ГДИ. Речь идет о кривых изменения давления (КИД) во времени, зарегистрированных при освоении скважин компрессором, свабом или струйным насосом. Обычно с целью определения параметров пласта обрабатывается часть КИД, зависимость давления от времени после прекращения воздействия на пласт (после компрессирования, после свабования, после прекращения отбора из скважины струйным насосом).

Обрабатываемые данные часто представляют собой:

-изменение давления в течение времени, включающем весь период компрессирования, свабования скважины или работы УГИС, зарегистрированное автономным манометром, установленным на определенной глубине в стволе скважины;

-кривую изменения давления (КИД) во времени после прекращения компрессирования или свабования скважины, зарегистрированную автономным либо дистанционным манометром при открытом или закрытом устье скважины;

-несколько фрагментов КИД на определенной глубине во времени, зарегистрированных после компрессирования или свабования в перерывах между регистрацией данных другими геофизическими методами вдоль ствола скважины.

Следует отметить, что эти данные имеют некоторые особенности, которые важно учитывать при обработке:

-обычно отсутствует специальная подготовка скважины. При специальных гидродинамических исследованиях, например, скважина до остановки эксплуатируется с постоянным дебитом, а при компрессировании или свабировании скважины в течение нескольких часов происходит снижение забойного давления (и даже необязательно монотонное!), затем прекращение воздействия и восстановление при открытом или закрытом устье скважины. Цикл снижения и восстановления давления может быть повторен несколько раз. Часто исследованиям предшествуют различные технологические операции, связанные с ремонтом или воздействием на исследуемые пласты;

-КИД, полученные попутно с регистрацией других полей при решении основной задачи на скважине, носят подчиненный характер, и тогда их регистрация должна вписываться в технологию решения основной задачи. В итоге на КИД могут отсутствовать отдельные участки.

Принята такая формулировка относительно КИД:

-если идет восстановление давления в скважине и при этом устье скважины закрыто, то КИД называют КВД - кривой восстановления давления;

-если восстановление давления зарегистрировано при открытом устье скважины (исследование методом КВУ - кривых восстановления уровня), то такую КИД называют кривой притока (КП).

Такое деление, конечно же, условно. "Чистая" КВД представляет собой КВД при отсутствии притока жидкости из пласта в ствол скважины, на реальные КВД оказывает влияние продолжающийся приток жидкости из пласта, а на КП влияют и упругие свойства пласта. В принципе, всегда

можно говорить о КИД и добавлять информацию об условиях ее получения. Однако деление КИД на КВД и КП на сегодня целесообразно, оно характеризует условия проведения опыта и заранее свидетельствует о возможности использования тех или иных алгоритмов. Необходимо только иметь в виду, что КИД, зарегистрированная при закрытом устье скважины и только поэтому названная "КВД", необязательно содержит в себе участок чистой КВД и может быть обработана по алгоритмам обработки КВД. Например, значительная часть КВД, зарегистрированной после снижения уровня жидкости компрессированием или свабированием малодебитной скважины, практически совпадает с КП и не может быть обработана по алгоритмам обработки КВД.

Методом КВУ кроме КП можно получить информацию и о восстановлении самих уровней, непосредственно фиксируя в разные моменты времени глубину газожидкостного раздела (ДУ) и нефте-водораздела (НВР).

Естественно предположить, что не по любым данным ГДИ может быть определен весь комплекс параметров пласта. Для различных параметров пласта существуют свои оптимальные технологии исследований. Например, для определения коэффициента продуктивности лучше всего подойдет технология ГДИ, основанная на регистрации давления и дебита в установившихся режимах. Для зондирования пласта данные ГДИ должны максимально зависеть именно от параметров пласта и в минимальной степени от граничных условий, от процессов, происходящих, например, в стволе исследуемой скважины и в других скважинах. Гидродинамические исследования по зондированию пласта - это, прежде всего, ГДИ, специальным образом подготовленные и проведенные. Например, многоцикловое испытание пластов испытателями на трубах (ИПТ), регистрация КВД в скважине с одним перфорированным пластом (при обеспечении быстрого прекращения притока жидкости в ствол скважины), гидропрослушивание пластов.

2. Алгоритмы обработки данных ГДИ. Во всех случаях должна быть проведена количественная обработка любой КИД в более полном объеме, в том числе и с целью определения гидродинамических параметров пласта. Естественно, объем и достоверность информации, полученной из различных КИД, будут разными:

- по уровенным замерам (ДУ, НВР) метода КВУ в первую очередь определяют дебиты. Их можно использовать и для оценки коэффициента продуктивности и пластового давления. При этом во всех методиках явно или неявно присутствует пересчет уровней в забойные давления. На результаты обработки влияют плотность жидкости в стволе скважины, кривизна ствола скважины, площадь сечения потока жидкости в стволе;

- по кривым притока метода КВУ определяют дебит и оценивают гидродинамические параметры. Определение дебита практически сводится к "взвешиванию" объема поступившей жидкости, т.е. делается обратный пересчет забойного давления в динамические уровни, поэтому используются те же параметры: плотность, данные о кривизне ствола и площадь сечения потока. Для оценки гидродинамических параметров пласта используются различные математические модели, связывающие дебит (объем отобранной жидкости, некую функцию дебита или отобранного объема) с забойным давлением;

- по КВД обычно дебит не определяют, хотя такие алгоритмы имеются. Кривые восстановления давления, если они действительно таковыми являются, наиболее подходят для определения гидродинамических параметров пласта.

Практически везде обработка данных ГДИ автоматизирована. Используются как специальные автономные программы так и модули обработки данных ГДИ в автоматизированных системах обработки данных ГИС при контроле разработки [3-6]. Остановимся на алгоритмах автоматизированной обработки данных ГДИ, реализованных в разработанной в БашГУ системе "Гидрозонд". Система «Гидрозонд-3» предназначена для обработки данных гидродинамических исследований, полученных при промыслово-геофизических исследованиях нефтяных скважин в процессе эксплуатации и освоения. Она обеспечивает ввод и вывод разнородных данных, их хранение и обработку.

В качестве исходных данных для обработки могут быть:

- кривая изменения забойного давления во времени после остановки добывающих (КП и КВД) и нагнетательных скважин (КПД);

- данные прослеживания уровней (ДУ, НВР) во времени после остановки добывающих скважин, после компрессирования или свабирования скважины ;

- кривая изменения давления (КИД) или фрагменты КИД во времени, зарегистрированные на определенной глубине после компрессирования или свабирования скважины; КИД в этом случае может представлять собой КП или КВД.

Методика обработки зависит от вида исследований, а в случае возможности выбора определяется самим интерпретатором. В системе в алгоритмах обработки реализовано два подхода к решению обратных задач: метод линейной анаморфозы и метод подбора (еще называют методом наилучшего совмещения).

Метод линейной анаморфозы - способ обработки, когда данные перестраиваются в специальных линеаризующих координатах, выделяется прямолинейный участок и определяются параметры аппроксимирующей прямой.

Метод подбора - способ автоматизированной обработки данных, заключающийся в многократном решении некоторой прямой задачи, моделирующей исследуемый физический процесс для различных наборов параметров. Параметры, для которых расчетная модельная кривая наилучшим образом согласуется с фактической, запоминаются как результат обработки.

Каждый из этих подходов имеет свои преимущества и недостатки. Метод анаморфозы присущ ручной, «до машинной» обработке, основан на приближенных аналитических решениях. Преимущество метода в более обоснованном выборе интервала обработки, он позволяет из всего массива данных после анаморфозы по линейному участку выделить тот фрагмент, для которого модель наиболее адекватна реальному объекту. При использовании метода подбора интерпретатор сам должен выбрать интервал фактической КИД для совмещения с модельной КИД, метод не может использоваться в ручной обработке. Другой, более скрытый от глаз недостаток этого метода заключен в использовании численных алгоритмов минимизации, которые практически невозможно разработать одинаково пригодными на все случаи жизни. Основное преимущество метода подбора - возможность использования более сложных математических моделей исследуемого явления, для которых нет простых аналитических решений.

2.1.Обработка КВД. В системе "Гидрозонд" реализованы классические алгоритмы:

- ◆ по конечному участку ;
- ◆ по Хорнеру (для однородного и неоднородного пласта);

В первом алгоритме, который называют еще «метод МДХ», речь идет о конечном участке в координатах $\Delta p - \lg t$. Используется известная формула для забойного давления после остановки длительное время проработавшей скважины с постоянным дебитом (расходом) Q:

$$P(t) = P_0 + 0.183 \cdot \frac{Q}{\sigma} \cdot \lg \left[2.25 \cdot \left(\frac{\chi}{r_{c\text{пр}}^2} \right) \cdot (t - t_0) \right]$$

При обработке по Хорнеру (для модели однородного пласта) для анаморфозы КВД используется формула

$$P(t) = P_{\text{пл}} - 0.183 \cdot \frac{Q}{\sigma} \cdot \lg \left(\frac{t}{t - T} \right).$$

Здесь в качестве искомых параметров пласта выступают:

σ - гидропроводность пласта;
 $P_{\text{пл}}$ - пластовое давление;

χ/r_c^2 -отношение пьезопроводности пласта к квадрату приведенного радиуса скважины.

Для модели неоднородного по простиранию пласта применяется схожая с ней приближенная формула, учитывающая послеприток в ствол скважины при регистрации КВД, и на перестроенном графике выделяется не один линейный участок, а два, характеризующих ближнюю и удаленную зоны пласта.

2.2.Обработка кривых притока (КП). Первым делом после выбора любой методики обработки по кривой притока рассчитывается таблица изменения дебита во времени. Для определения параметров пласта реализовано несколько методик, основанных на модели жесткого пласта, и метод подбора для модели упругого однородного пласта. Пока в системе нет ни одного алгоритма, (например, трансформирующего кривую притока в КВД), который можно было бы использовать для зондирования пласта по КП малодобитных скважин.

Для модели жесткого пласта используется формула, связывающая постоянный дебит Q с постоянной депрессией на пласт $P = P_{\text{пл}} - P_{\text{заб}}$ при стационарной фильтрации флюида,

$$Q = K \Delta P.$$

Предполагается, что эта формула справедлива и для медленно изменяющегося во времени забойного давления в остановленной малодобитной скважине.

Тогда формула для метода индикаторной кривой имеет вид

$$p_{\text{заб}} = P_{\text{пл}} - Q / K$$

Если в этой формуле дебит Q заменить на скорость изменения забойного давления, получаем дифференциальное уравнение, описывающее в рамках модели жесткого пласта кривую притока

$$\frac{dp_{\text{заб}}}{dt} = \beta \cdot (P_{\text{пл}} - p_{\text{заб}}); \quad \beta = \frac{\gamma \cdot \cos \alpha}{S} \cdot K.$$

Для вертикальной скважины ($\alpha = 0$) или скважины с постоянным углом наклона в интервале перемещения уровня ($\alpha = \text{const}$) для описания КП используется известное аналитическое решение этой задачи (удельный вес жидкости γ и площадь сечения потока жидкости S если тоже постоянны)

$$p(r_c, t) = P_{\text{пл}} - (P_{\text{пл}} - P_0) \cdot e^{-\beta \cdot t}$$

известное в литературе как формула Яковлева или формула Маскета (для КВУ уровень жидкости и забойное давление в этом случае связаны линейно). Для переменных α , γ и S задача нелинейная и решается численно.

Модель жесткого пласта не позволяет обработать данные с целью зондирования, обработка модельных кривых притока показала, что обра-

ботка по алгоритмам модели жесткого пласта приводит к завышению коэффициента продуктивности пласта и занижает значение пластового давления,

Для модели упругого и неограниченного по простиранию пласта обработка КП производится методом подбора параметров (гидропроводность, пластовое давление и отношение пьезопроводности к квадрату приведенного радиуса скважины) модельной кривой. При моделировании КП используется дебит, определяемый уже всей предысторией изменения забойного давления и переменным коэффициентом продуктивности

$$Q(t) = \int_0^t K(t - \tau) \cdot \frac{d(P_{пл} - P_{заб}(\tau))}{d\tau} \cdot d\tau;$$

с коэффициентом продуктивности для однородного, упругого и неограниченного по простиранию пласта

$$K(t) = \frac{2\pi\sigma}{\ln(1 + \sqrt{\pi\chi t / r_c^2})}$$

Модель может быть использована при обработке КП с учетом предыстории изменения забойного давления ($p_{заб}(t)$), зарегистрированного в течение некоторого времени до остановки скважины для снятия КП, например, в процессе компрессирования или свабиования скважины.

2.3. Обработка уровней для оценки коэффициента продуктивности пласта осуществляется методом подбора или методом индикаторной кривой на модели жесткого пласта. Следует отметить, что при малом объеме данных погрешность будет достаточно высокой, например, из трех уровней можно получить два значения дебита и три забойных давления. При обработке их методом индикаторной кривой на экране получим две точки, через которые и пройдет аппроксимирующая прямая.

3. Заключение.

1. Для обработки данных гидродинамических исследований имеются автоматизированные системы для персональных компьютеров. Анализ реализованных в них алгоритмов показывает безусловную возможность их использования для обработки данных по стандартным классическим технологиям исследований. Это, прежде всего, КВД и КП после остановки длительного время проработавшей скважины.

2. Использование классических алгоритмов для обработки данных ГДИ, полученных по нестандартной технологии при освоении нефтяных скважин с помощью компрессора, сваба или струйного насоса, не всегда оправдано. Необходимо определить границы применимости этих алгоритмов и оценить погрешности определяемых параметров, например, путем обработки модельных, теоретических КИД.

3. Дальнейшее развитие алгоритмов обработки данных ГДИ видится в технологии, сочетающей преимущества методов линейной анаморфозы и подбора. Сейчас на стадии опробования находится такая гибридная технология, когда пластовое давление и гидропроводность пласта определяются методом линейной анаморфозы по аналитическим формулам Хорнера или "конечного участка", а параметры ближней зоны - методом подбора на основе численной модели.

4. Ошибочной представляется мысль о том, что по любой кривой изменения давления во времени можно определять параметры пласта, нужны лишь соответствующие математические модели. Для определения параметров пласта, т.е. для зондирования пласта оптимальными являются технологии исследований, когда на регистрируемые КИД наибольшее влияние оказывают искомые параметры пласта. КВД, зарегистрированная в скважине после быстрого перекрытия ствола скважины и с минимальным объемом подпакерного пространства (например, при использовании ИПТ или струйного насоса), гораздо предпочтительной (с точки зрения зондирования пласта) КИД, зарегистрированных после свабиования или компрессирования малодебитных скважин. Кривые притока и уровенные замеры в малодебитных скважинах больше подходят для расчета изменения дебита во времени и для приближенной оценки продуктивности пласта.

Литература

1. Басниев К.С., Кочина И.Н., Максимов В.М. Подземная гидромеханика: Учебник для вузов. - М.: Недра, 1993. - 416 с.
2. Шагиев Р.Г. Исследование скважин по КВД. - М.: 1996.
3. Рамазанов А.Ш., Ремеев И.С., Гумеров И.Р. и др. Автоматизированная система обработки данных гидродинамического зондирования пластов "Гидрозонд". - НТС "Каротажник", №30, 1997, с.74-77.
4. Медведев А.И., Боганик В.Н. и др. Программно-методический комплекс "FS-ГИДРОДИНАМИКА в среде MS Windows". (Описание программ и методическое руководство). - М.: 1996 г.
5. Швецова Л.Е., Аржиловская Н.Г. Автоматизированная обработка данных ГИС при контроле за разработкой нефтегазовых месторождений Западной Сибири. - НТС "Каротажник", №29, 1996, с.68-80.
6. Кременецкий М.И., Ипатов А.И. Принципы автоматизированной обработки и интерпретации материалов ГИС-Контроля в системе "ГЕKKОН". - НТС "Каротажник", №30, 1997, с.77-82.