

DOI 10.5862/JEST.254.4

УДК 622.279.5.001.42

А.Д. Гиргидов

КВАЗИСТАЦИОНАРНАЯ МОДЕЛЬ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ В ГАЗОВОЙ СКВАЖИНЕ

A.D. Girgidov

QUASISTATIONARY MODEL OF PRESSURE RECOVERY IN A GAS WELL

Использование решений нестационарного дифференциального уравнения Дарси для бесконечного пласта с целью построения кривой восстановления давления (КВД) для газовой скважины включает ряд упрощающих допущений, погрешность от введения которых трудно оценить. Предлагается рассчитывать кривую восстановления давления, используя квазистационарную модель фильтрационного потока, основанную на интегральном уравнении Дарси. Эта модель под названием метода непрерывной последовательности стационарных состояний хорошо зарекомендовала себя при решении многих задач. Формулируется модель (допущения, расчетные уравнения, граничные условия) и предлагается метод вычислений. Модель позволяет рассчитывать КВД и в предположении, что горизонтальные размеры пласта не ограничены, и для условий конечных размеров пласта. Пример расчета подтверждает приемлемость допущений, на которых основывается модель.

ГИДРАВЛИКА; ГАЗОВАЯ СКВАЖИНА; КРИВАЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ; ЗАКОН ДАРСИ; ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ СТАЦИОНАРНЫХ СОСТОЯНИЙ; ПЛАСТ КОНЕЧНЫХ РАЗМЕРОВ.

Using the solutions of the nonstationary differential Darcy's equation for an infinite gas bed with the goal of constructing a pressure recovery curve (PRC) for a gas well includes some simplifying assumptions; it is difficult to estimate the error from introducing these assumptions. It is proposed to calculate the PRC using the quasi-stationary model of gas motion through soil. The model is based on integral Darcy's equation and is well-known as a continuous sequence of stationary states. Basic assumptions, equations and boundary conditions are formulated. The model proposed makes it possible to calculate the PRC for finite as well as finite horizontal sizes of the gas bed. An example of the calculation confirms the validity of the model compared to natural conditions.

HYDRAULICS; GAS WELL; PRESSURE RECOVERY CURVE; SEQUENCE OF STATIONARY STATES; DARCY'S LAW; BED OF FINITE HORIZONTAL SIZES.

Введение

Кривая восстановления давления (КВД) в газовой скважине, вскрывшей однородный пласт, при мгновенном уменьшении дебита до нуля традиционно рассчитывается на основе решения дифференциального уравнения нестационарной фильтрации, которое в случае плоскорadiaльного движения имеет вид [1–5]:

$$\frac{\partial P}{\partial t} - \kappa(p) \left(\frac{\partial^2 P}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial r} \right) = 0, \quad (1)$$

где $P(r,t) = \frac{\rho_a g}{2 p_a} \frac{p^2}{2}$ – функция Лейбензона; p – гидродинамическое давление; ρ – плотность газа; g – ускорение силы тяжести; индекс a относит величину к нормальному атмосферному

давлению; $\kappa = \frac{k\rho}{m\eta}$ – коэффициент пьезопроводности; k – проницаемость пласта; η – динамический коэффициент вязкости газа; m – пористость пласта; r – расстояние от оси скважины; t – время.

При практических расчетах КВД обычно вводят следующие допущения [1–5]. Во-первых, уравнение (1) линеаризуют, полагая, что можно приближенно считать $\kappa = \text{const}$, хотя при этом уравнение (1) описывает фильтрацию не газа, а капельно-упругой жидкости (нефть). Во-вторых, изменение во времени давления в остановленной газовой скважине рассчитывают, используя аналитическое решение Маскета, полученное для бесконечного пласта. Однако, как известно, с одной стороны, горизонтальные размеры газовых пластов значительно меньше, чем размеры нефтяных пластов, и поэтому длительная промышленная эксплуатация газовой скважины с фиксированным дебитом может иметь место только в результате снижения пластового давления, а с другой стороны, использование модели бесконечного пласта (по его определению) не допускает снижения во времени пластового давления, и это ещё одна причина, ограничивающая область применимости решения Маскета. В-третьих, аналитическое решение Маскета упрощают, соразмеряя время эксплуатации скважины с постоянным дебитом (который обеспечивается снижением пластового давления) со временем восстановления давления при остановке скважины и при постоянном пластовом давлении, хотя оба эти интервала времени физически между собой не связаны. Перечисленные упрощения могут внести в результаты расчета КВД трудно оцениваемые погрешности. Несмотря на это, решение уравнения (1) для бесконечного пласта и для капельно-упругой жидкости эффективно используется на практике при обработке КВД газовых скважин [6–8].

На основании вышеизложенного автором предложен гидравлический расчет КВД, основанный на доказавшем свою эффективность методе непрерывной последовательности стационарных состояний [1–3, 9].

Описание предлагаемой модели расчёта КВД

Согласно методу непрерывной последовательности стационарных состояний приток газа к скважине в каждый момент времени подчиняется интегральному уравнению Дарси:

$$Q_m = \frac{\pi k T \rho_a}{\eta p_a} \frac{p_{\text{п}}^2 - p_c^2}{\ln \frac{R}{r_c}}, \quad (2)$$

где Q_m – массовый расход (дебит) газа в скважине; T – толщина пласта; $p_{\text{п}}$ – пластовое давление (точнее давление в пласте при $r = R$); p_c – забойное давление; R – радиус дренирования скважины; r_c – радиус скважины. Рассмотрим последовательность стационарных состояний при эксплуатации газовой скважины на оси круглоцилиндрического пласта толщиной T и радиусом $R_{\text{п}}$. При $R < R_{\text{п}}$ (как и в бесконечном пласте) при неизменном пластовом давлении $p_{\text{п}}$ постоянство дебита газа Q_m , необходимое при производственном режиме эксплуатации скважины, обеспечивается постепенным уменьшением забойного давления p_c и увеличением радиуса реперирования R в соответствии с уравнением (2). Пары значений (p_{c1}, R_1) и (p_{c2}, R_2) на рис. 1 при подстановке их в уравнение (2) дают одинаковый дебит Q_m . Так как R входит в уравнение (2) под логарифмом, то $R(t)$ возрастает с уменьшением $p_c(t)$ чрезвычайно быстро; при этом область $r < R(t)$ пласта, питающая скважину, непрерывно возрастает.

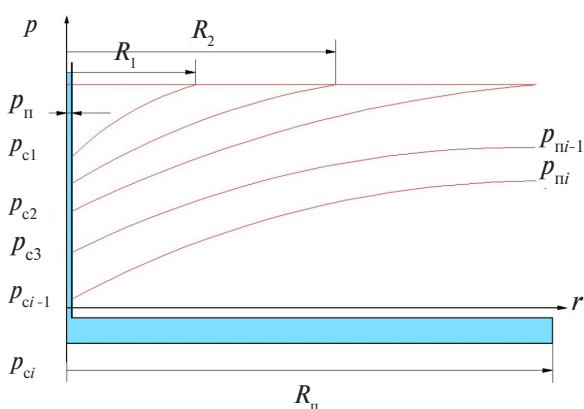


Рис. 1. Схема понижения давления в газовом пласте конечных размеров

Когда со временем радиус дренирования $R(t)$ станет равным радиусу пласта $R_{\text{п}}$ (см. рис. 1), дальнейшее поддержание постоянства дебита $Q_{\text{м}}$ может быть обеспечено только за счет снижения давления во всём пласте, например при понижении пьезометрической линии (p_{ci-1}, p_{ni-1}) до пьезометрической линии (p_{ci}, p_{ni}) . Вычисление пары (p_{ci}, p_{ni}) реализуется с помощью формулы (2) для заданных $Q_{\text{м}}$ и $R_{\text{п}}$, при этом роль пластового давления $R_{\text{п}}$ играет давление на границе пласта $p_{\text{п},i}$. Интервал Δt_i времени, прошедшего от стационарного состояния, задаваемого парой значений (p_{ci-1}, p_{ni-1}) , до состояния с парой (p_{ci}, p_{ni}) определяется из равенства объёма $Q_{\text{м}} \Delta t_i$ объёму газа, который выделился из пласта при снижении в нём давления между $(i-1)$ -м и i -м стационарными состояниями. Описанная выше схема извлечения газа из пласта обеспечивает время промышленной эксплуатации скважины, измеряемое месяцами и даже годами.

Рассмотрим алгоритм расчета КВД для условия, когда остановка скважины и восстановление давления произошли при $R < R_{\text{п}}$. Для простоты изложения будем считать процесс изотермическим, а также исключим возможные изменения условий в призабойной зоне (например, скин-эффект) [1, 7, 8]. Пусть в начальный момент времени $t = 0$ пьезометрическая линия фиксирует пластовое давление $p_{\text{п}}$ при значении радиуса питания $R(0)$, как показано на рис. 2, и в этот момент скважина остановлена. При условии, что расход, поступающий в скважину, равен нулю, из уравнения Дарси следует, что градиент давления при $r = r_c$ равен нулю. Будем полагать, что изменение давления в призабойной зоне происходит следующим образом. За время Δt градиент давления становится равным нулю не только при $r = r_c$, но и выравнивается во всем призабойном цилиндре с радиусом $r_c + \Delta r$. Это наиболее важное упрощение, используемое в предлагаемой модели. Уравнение пьезометрической линии получим из (2):

$$p(0, r) = \sqrt{p_c^2 + \frac{p_{\text{п}}^2 - p_c^2}{\ln \frac{R(0)}{r_c}} \ln \frac{r}{r_c}}. \quad (3)$$

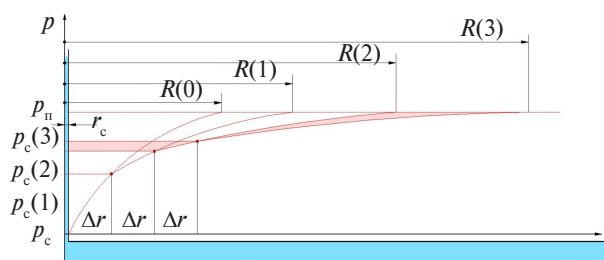


Рис. 2. Расчётная схема квазистационарной модели для бесконечного пласта

Из этого уравнения при $r(1) = r_c + \Delta r$ вычислим значение давления $p_c(1) = p(0, r_c + \Delta r)$. Через интервал времени Δt пьезометрическая линия приобретает вид, указанный на рис. 2, которому соответствует уравнение

$$p(1, r) = \sqrt{p_c^2(0, r_c + \Delta r) + \frac{p_{\text{п}}^2 - p_c^2(0, r_c + \Delta r)}{\ln \frac{R(1)}{r_c + \Delta r}} \ln \frac{r}{r_c + \Delta r}}. \quad (4)$$

Масса M_1 газа, которая поступает в призабойный цилиндр с радиусом $r_c + \Delta r$, благодаря чему в нем выравнивается давление до значения $p_c(1)$, равна массе M_2 газа, которая выделяется из кольцевого цилиндра с внутренним радиусом $r_c + \Delta r$ и внешним радиусом $R(1)$, за счет понижения давления от $p(0, r)$ до $p(1, r)$. Равенство этих масс дает уравнение для вычисления $R(1)$. Задавая Δr достаточно малым, можно считать, что расход $Q(t)$, поступающий из кольцевого цилиндра в призабойный, линейно изменяется со временем, и, следовательно, можно принять, что средний массовый расход за интервал Δt равен полусумме расходов, соответствующих моментам времени $t(0) = 0$ и $t(1) = \Delta t$. Разделив массу газа, который перешел в призабойный цилиндр, на средний массовый расход, вычислим $\Delta t = t(1)$.

Аналогичная последовательность вычислений используется для всех значений $r(i) = r_c + i \Delta r$, где $i = 1, 2, 3, \dots$.

В общем случае на i -м шаге пьезометрическая линия описывается уравнением

$$p(i, r) = \sqrt{p_{\text{п}}^2(i-1, r(i)) + \frac{p_{\text{п}}^2 - p_c^2(i-1, r(i))}{\ln \frac{R(i)}{r(i)}} \ln \frac{r}{r(i)}}. \quad (5)$$

Масса газа, поступающая в призабойный цилиндр на i -м шаге:

$$M_1(i) = \frac{\rho_a T}{p_a} \left\{ [p(i, r(i+1)) - p(i, r(i))] \pi [r^2(i) - r_c^2] + \int_{r(i)}^{r(i+1)} [p(i, r(i+1)) - p(i, r)] 2\pi r dr \right\}. \quad (6)$$

Масса газа, который выдавливается из кольцевого цилиндра в призабойный, равна

$$M_2(i) = \frac{\rho_a T}{p_a} \left\{ \int_{r(i+1)}^{R(i)} [p(i, r) - p(i+1, r)] 2\pi r dr + \int_{R(i)}^{R(i+1)} [p_{\text{п}} - p(i+1, r)] 2\pi r dr \right\}. \quad (7)$$

Приравняв эти две массы,

$$M_1(i) = M_2(i), \quad (8)$$

получим уравнение для вычисления $R(i+1)$.

Массовый расход, отвечающий i -й пьезометрической линии:

$$Q_m(i) = \frac{\pi k T \rho_a}{\eta p_a} \frac{p_{\text{п}}^2 - p^2(i, r(i))}{\ln \frac{R(i)}{r(i)}}. \quad (9)$$

Средний массовый расход за интервал времени $[t(i), t(i+1)]$:

$$\bar{Q}_m(i) = \frac{1}{2} [Q_m(i) + Q_m(i-1)].$$

Интервал времени $\Delta t(i)$ между переформированием $(i-1)$ -й пьезометрической линии в i -ю равен

$$\Delta t(i) = \frac{M_1(i)}{Q_m(i)}. \quad (10)$$

Время, за которое давление в скважине возрастёт от p_c до $p(i, r(i))$, равно

$$t(i) = t(0) + \sum_{k=1}^i \Delta t(k). \quad (11)$$

Построение КВД по приведенному выше алгоритму, т.е. установление зависимости

$$p(i, r_c) = p(i, r(i)) = f(t(i)), \quad (12)$$

не представляет никаких сложностей и сводится к элементарному расчёту по формулам.

Пример расчёта КВД на основе предлагаемой модели

Для того чтобы оценить эффективность предложенного метода расчёта КВД и приемлемость допущений, на которых он основан, по приведенным выше формулам и уравнениям была рассчитана КВД для натуральных условий, приведенных в [10]; их характеризуют следующие данные: эффективная толщина пласта $T = 29,1$ м; вязкость газа $\eta = 12 \cdot 10^{-6}$ Па·с; проницаемость грунта $k = 2,2 \cdot 10^{-14}$ м²; атмосферное давление $p_a = 0,1013$ МПа; радиус скважины $r_c = 0,11$ м.; радиус контура дренирования $R(0) = 50$ м; пластовое давление $p_{\text{п}} = 24,5$ МПа; забойное давление до остановки $r_c = 22,24$ МПа.

Результаты расчета приведены на рис. 3. Сравнение их с результатами расчетов КВД по общепринятым методам показало, что КВД, рассчитанная по предлагаемой модели, отличается от приведенных в статье [10] не более чем на 0,5–1 %, что меньше погрешности натуральных измерений пластового давления.

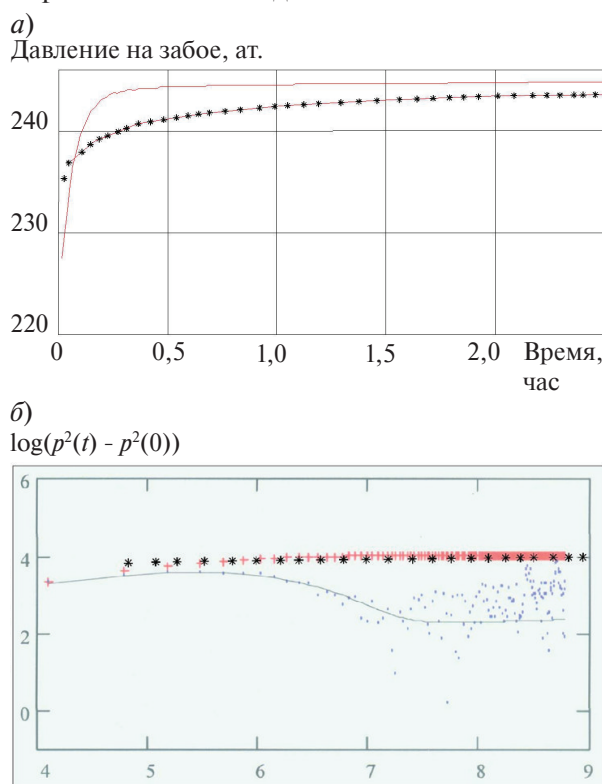


Рис. 3. Сравнение расчетов КВД по методике используемой в настоящее время (а — +++) и расчетов по предлагаемой модели в логарифмических шкалах (б — ***)

Заклучение

Благодаря простой и прозрачной схеме потока в газовом пласте предлагаемый метод расчёта КВД позволяет при несущественной переформулировке вычислять КВД в пласте с ограниченными горизонтальными размерами, а также снижение пластового давления при фиксированном дебите (для этого в (7) надо положить $R(i) = R(i + 1) = R_n = \text{const}$). Отметим ещё раз, что

используемый в настоящее время алгоритм расчёта КВД основан на решении уравнения (1) для бесконечного пласта и включает не вполне оцениваемые упрощения. Имея это в виду, следует признать существенные преимущества предлагаемой квазистационарной модели, основанной на хорошо зарекомендовавшем себя при решении многих задач методе непрерывной последовательности стационарных состояний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде. М.-Л.: Гостоптехиздат, 1949. 628 с.
2. Чарный И.А. Подземная гидродинамика. М.: Гостехиздат, 1963. 397 с.
3. Мищенко И.Г. Скважинная добыча нефти. М.: Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. 816 с.
4. Инструкция по комплексному исследованию газовых и газоконденсатных скважин / Под ред. З.С. Алиева и [др.]. М., 2008. 476 с.
5. Алиев З.С., Басниев К.С., Кузнецов О.Л., Мирзаджанзаде А.Х. Основы технологии добычи газа. М.: Недра, 2003. 880 с.
6. Шагиев Р.Г. Исследование скважин по КВД (кривые восстановления давления). М.: Наука, 1998. 304 с.
7. Гарифуллин Р.Н., Еникеев Р.Р., Хасанов М.М. Новый подход к интерпретации кривых восстановления давления // Вестн. инжинирингового центра «Юкос». 2001. № 2. С. 13–16.
8. Говорков Д.А. Анализ методов исследования гидродинамических состояний скважин и пластов // Вестник кибернетики. Тюмень: Изд-во ИПОС СО РАН, 2008. № 7. С. 33–42.
9. Гиргидов А.Д. Время понижения уровня грунтовой воды при строительстве котлована // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 4. С. 52–56.
10. Гребенников В.Т. Методика обработки кривых восстановления давления, полученных при исследовании газовой скважины. [Электронный ресурс] // Портал REFdb.ru. URL: <<http://refdb.ru/look/2928959.html>>

REFERENCES

1. Masket M. Tcheniye odnorodnykh zhidkostey v poristoy srede. M.-L.: Gostoptekhizdat, 1949. 628 s. (rus.)
2. Charnyy I.A. Podzemnaya gidrodinamika. M.: Gostekhizdat, 1963. 397 s. (rus.)
3. Mishchenko I.G. Skvazhinnaya dobycha nefiti. M.: Izd-vo «Nefit i gaz» RGU nefiti i gaza im. I.M.Gubkina, 2003. 816 s.
4. Instruksiya po kompleksnomu issledovaniyu gazovykh i gazokondensatnykh skvazhin / Pod red. Z.S. Aliyeva [i dr.]. M., 2008. 476 s. (rus.)
5. Aliyev Z.S., Basniyev K.S., Kuznetsov O.L., Mirzadzhanzade A.Kh. Osnovy tekhnologii dobychi gaza. M.: Nedra, 2003. 880 s. (rus.)
6. Shagiyeu R.G. Issledovaniye skvazhin po KVD (krivyie vosstanovleniya davleniya). M.: Nauka, 1998. 304 s. (rus.)
7. Garifullin R.N., Yenikeuev R.R., Khasanov M.M. Novyy podkhod k interpretatsii krivykh vosstanovleniya davleniya. Vestn. inzhiniringovogo tsentra «Yukos». 2001. № 2. S. 13–16. (rus.)
8. Govorkov D.A. Analiz metodov issledovaniya gidrodinamicheskikh sostoyaniy skvazhin i plastov. Vestnik kibernetiki. Tyumen.: Izd-vo IPOS SO RAN, 2008. № 7. S. 33–42. (rus.)
9. Girgidov A.D. Vremya ponizheniya urovnya gruntovoy vody pri stroitelstve kotlovana. Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal. 2012. № 4. S. 52–56. (rus.)
10. Grebennikov V.T. Metodika v obrabotki krivykh vosstanovleniya davleniya, poluchennykh pri issledovanii gazovoy skvazhini. [Elektronnyy resurs]/Portal REFdb.ru. URL: <<http://refdb.ru/look/2928959.html>>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

ГИРГИДОВ Артур Давидович – доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

E-mail: ardgir@mail.ru

GIRGIDOV Artur D. – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

E-mail: ardgir@mail.ru