ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОГЛОЩАЮЩЕГО ПЛАСТА ПРИ ПРОВОДКЕ СКВАЖИН

А.А.Сейдалиев

Каспийский государственный университет технологии и инжиниринга им. Ш.Есенова
130003, Республика Казахстан, г. Актау, 32 Микрорайон

Предлагается метод определения параметра поглощающего пласта в процессе проводки скважин. Получены зависимости, по которым могут быть определены параметры поглощающего пласта при спускоподъемных операциях бурильных труб и при промывке скважин.

1. Введение

Повышение эффективности процесса бурения и проводки скважин неразрывно связано с оперативным контролем за состоянием ствола скважин и взаимодействием бурового раствора с окружающими ствол породами, в связи с чем возникает необходимость исследования гидродинамических характеристик потока на основе нестационарных режимов движения бурового раствора.

Поэтому задачи определения некоторых практически важных параметров потока и состояния ствола скважин при различных нестационарных режимах движения бурового раствора представляет важный теоретический и практический интерес.

Как известно, в процессе бурения и проводки скважин часто происходит утечка среды в пласт, для предотвращения этого вида осложнений необходимо знать не только место поглощения, но и параметры фильтрационного сопротивления поглощающего пласта.

В статье предлагается метод определения параметра поглощающего пласта на основании информации об изменении во времени расхода и давления, полученных на устье скважины.

Метод основан на решении обратной задачи квазиодномерного нестационарного движения вязкопластичных жидкостей в скважинах, стенки которых идентифицируются упругими средами.

Обратные задачи нефтегазопромысловой механики были разработаны в (Баренблатт и др., 1957; 1984), некоторые частные случаи которых применительно к буровой гидравлике рассмотрены в (Гасанов и др., 1970; Сатаров, 1999; Мирзаджанзаде и др., 1977; Мирзаджанзаде, Ширинзаде, 1986) для вертикальных скважин, без учета гравитационных сил и наклонно-направленности скважин.

Для определения параметров поглощающего пласта в скважине (скважина в общем случае предполагается наклонно-направленной), рассматривается нестационарное движение бурового раствора, которое описывается моделью вязкопластичной жидкости, причем начало координат располагается на забое скважины.

2. Постановка задачи

2.1. Для определения фильтрационного сопротивления рассматривается случай спуска бурильных труб в скважину.

Принимается, что в начальный момент нет никакого движения, т.е.

$$W_i(x,0)=0.$$

При спуске с переменной скоростью бурильных труб в скважину глубиной l применяется закон изменения давления во времени, причем в сечении $x = l_0$ происходит частичное поглощение промывочной среды в пласт, подчиняющееся обобщенному закону Дарси.

Система приближенных дифференциальных уравнений при этом имеет вид (Сатаров, 1999):

$$\left.\begin{aligned} -\frac{\partial P_i}{\partial x} &= \rho\left(\frac{\partial W_i}{\partial t} + 2aW_i + b + g\sin\alpha_s\right), \\ -\frac{\partial P_i}{\partial t} &= \rho C^2 \frac{\partial W_i}{\partial x}, (i = 1,2). \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

Начальные и граничные условия пишутся в виде:

$$\left.\begin{aligned} & W_i(x,0) = 0, \\ & P_i(x,0) = -b\rho x - g\sin\alpha_s, \\ & W_1(0,t) = f(t), \\ & P_1(l_0,t) = P_2(l_0,t), \\ & P_2(l,t) = P_0, \quad P_1(0,t) = \varphi(t). \end{aligned}\right\} \quad (2)$$

Здесь $P_1\ (x,t)$ – среднее давление в скважине до поглощающего сечения;
$P_2\ (x,t)$ – среднее давление в скважине после поглощающего сечения;
$W_1\ (x,t)$ – скорость движения среды до поглощающего сечения;
$W_2\ (x,t)$ – скорость движения среды после поглощающего сечения;
ρ – плотность бурового раствора;
$2a = 8\mu_m/\rho R^{*2}$ – коэффициент гидравлического сопротивления;
$b = 2\tau_0/\rho R^*$ – коэффициент, характеризующий предельное напряжение сдвига;
μ_m – вязкость бурового раствора;
τ_0 – предельное напряжение сдвига бурового раствора;
R^* – приведенный радиус затрубного пространства;
g – ускорение свободного падения;
α_s – угол отклонения скважины от горизонтальной линии по часовой стрелке.

Дополнительное граничное условие задаётся в виде баланса расхода:

$$W_1(l_0,t) = W_2(l_0,t) - \alpha_f\,[P_1(l_0,\ t)],$$

$$\alpha_f[P_1(l_0,\ t)] = A - BP_1(l_0,t), \quad (3)$$

$$A = BP_k,\ B = \frac{k}{\mu R_0 \ln\dfrac{R_k}{R_0}},$$

где k – проницаемость пласта;
μ – эффективная вязкость поглощающейся жидкости;
R_k – радиус контура пласта;
R_0 – радиус скважины;
P_k – давление на контуре пласта.

Исключая давление $P_i(x,t)$ в системе (1), для определения скорости $W_i(x,t)$ получаются следующие дифференциальные уравнения:

$$\frac{\partial^2 W_i}{\partial t^2} + 2a\frac{\partial W_i}{\partial t} = C^2\frac{\partial^2 W_i}{\partial x^2}, \quad (4)$$

Введение безразмерных величин

$$x = l\bar{x}, \quad t = \frac{l}{C}\tau, \quad W_i = C\overline{W_i} \quad (5)$$

преобразует дифференциальные уравнения (4) в следующий вид

$$\frac{\partial^2 \overline{W}_i}{\partial \tau^2} + \frac{2al}{C}\frac{\partial \overline{W}_i}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \overline{W}_i}{\partial \bar{x}^2}. \quad (6)$$

Применяя преобразование Лапласа для решения дифференциальных уравнений (6), будем иметь следующие выражения в изображениях:

$$\frac{d^2\tilde{\overline{W}}_i}{d\bar{x}^2} - \left(s^2 + \frac{2al}{C}s\right)\tilde{\overline{W}}_i = 0. \quad (7)$$

Граничные условия в безразмерных переменных перейдут в следующие:

$$\left.\begin{aligned} & \tilde{\overline{W}}_1(0,s) = \tilde{\varphi}_0(s), \frac{d\tilde{\overline{W}}_1}{d\bar{x}}(0,s) = \tilde{f}_0(s), \\ & \frac{d\tilde{\overline{W}}_1}{d\bar{x}}(\bar{l}_0,s) = \frac{d\tilde{\overline{W}}_2}{d\bar{x}}(\bar{l}_0,s), \frac{d\tilde{\overline{W}}_2}{d\bar{x}}(1,s) = 0. \end{aligned}\right\} \quad (8)$$

Решение дифференциальных уравнений (7) при граничных условиях (8) имеет вид:

$$\widetilde{\widetilde{W}}_i = c_k e^{\alpha\bar{x}} + c_{k+1}{}^{-\alpha\bar{x}}, \qquad (9)$$

$$c_1 = \frac{\alpha\widetilde{\varphi}_0(s) + \widetilde{f}_0(s)}{2\alpha},$$

$$c_2 = \frac{\alpha\widetilde{\varphi}_0(s) - \widetilde{f}_0(s)}{2\alpha},$$

$$c_3 = \frac{c_1 - c_2 e^{-2\alpha\widetilde{l}_0}}{1 - e^{2\alpha(1-\widetilde{l}_0)}},$$

$$c_4 = \frac{c_1 e^{2\alpha} - c_2 e^{2\alpha\left(1-\widetilde{l}_0\right)}}{1 - e^{2\alpha(1-\widetilde{l}_0)}},$$

$$\alpha^2 = \left(s^2 + \frac{2al}{C}s\right), \quad (k = 1,3).$$

Для определения фильтрационного сопротивления используется дополнительное граничное условие (3), которое в безразмерном виде запишется в виде:

$$\overline{W_1}(\bar{l}_0, \tau) = \overline{W_2}(\bar{l}_0, \tau) - \overline{A} + \overline{B}\overline{P_1}(\bar{l}_0, \tau),$$

$$\overline{A} = \overline{B}\overline{P}_k, \quad \overline{B} = \frac{kP_0}{C\mu R_0 \ln\frac{R_k}{R_0}}, \qquad (10)$$

$$\overline{P}_k = \frac{P_k}{P_0}, \quad \overline{P}_1(\bar{l}_0, \tau) = \frac{P_1(l_0, t)}{P_0}.$$

Безразмерное давление $\overline{P_1}(\bar{l}_0, \tau)$ определяется из дифференциальных уравнений (1) и имеет вид:

$$\overline{P}_1(\bar{l}_0\tau) = \overline{P}_1(0,\tau) - \bar{k}_1\int_0^{\bar{l}_0}\frac{\partial}{\partial\tau}\overline{W}_1 d\bar{x} -$$

$$-\bar{k}_2\int_0^{\bar{l}_0}\overline{W}_1 d\bar{x} - \bar{k}_3\int_0^{\bar{l}_0} d\bar{x},$$

$$\overline{P}_1(\bar{l}_0\tau) = \overline{\varphi}(\tau) - \bar{k}_1\int_0^{\bar{l}_0}\frac{\partial}{\partial\tau}\overline{W}_1 d\bar{x} -$$

$$-\bar{k}_2\int_0^{\bar{l}_0}\overline{W}_1 d\bar{x} - \bar{k}_3\int_0^{\bar{l}_0} d\bar{x},$$

$$\bar{k}_1 = \frac{\rho c^2}{P_0}, \quad \bar{k}_2 = \frac{2a\rho cL}{P_0},$$

$$\bar{k}_3 = \frac{\rho b + \rho g\sin\alpha}{P_0}.$$

Переходя к изображениям, получается

$$\widetilde{\widetilde{P}}_1(\bar{l}_0, s) = \widetilde{\varphi}(s) - \bar{k}_1\int_0^{\bar{l}_0} s\widetilde{\widetilde{W}}_1 d\bar{x} -$$

$$-\bar{k}_2\int_0^{\bar{l}_0}\widetilde{\widetilde{W}}_1 d\bar{x} - \frac{\bar{k}_3}{s}\int_0^{\bar{l}} d\bar{x}. \qquad (11)$$

Подставляя значение $\widetilde{\widetilde{W}}_1$ из (9) в (11), после некоторых преобразований получаются следующие соотношения:

$$\widetilde{\widetilde{P}}_1(\bar{l}_0, s) = \varphi(s) + c_1\widetilde{\widetilde{P}}_{11}(\bar{l}_0, s) -$$

$$-c_2\widetilde{\widetilde{P}}_{12}(\bar{l}_0, s) + \frac{\bar{k}_3}{s}\bar{l}_0, \qquad (12)$$

$$\widetilde{\widetilde{P}}_{11} = \bar{k}_1\frac{1}{\alpha}s(e^{\alpha\bar{l}_0} - 1) + \frac{1}{\alpha}\bar{k}_2(e^{\alpha\bar{l}_0} - 1),$$

$$\widetilde{\widetilde{P}}_{12} = \bar{k}_1\frac{1}{\alpha}s(e^{-\alpha\bar{l}_0} - 1) + \frac{1}{\alpha}\bar{k}_2(e^{-\alpha\bar{l}_0} - 1).$$

Ввиду малости величины α из (12), после некоторых преобразований, можно получить

$$\Phi(t_0) = \frac{(1+a)\widetilde{\varphi}_0(t_0) - \widetilde{f}_0(t_0)(\bar{l}_0 - \frac{1}{a} - 1)}{\left[1 - \overline{P}_k + \bar{k}_3\bar{l}_0 + \frac{\widetilde{\varphi}_0(t_0)}{t_0}\widetilde{\widetilde{P}}_{11}(t_0)\right]2a(1-\bar{l}_0)} = \overline{B}t_0 \quad (13)$$

Соотношение (13) является основным для предлагаемого метода определения параметров пласта по устьевым информациям.

2.2. Рассматривается нестационарное движение промывочной жидкости, описываемой моделью вязкопластичной среды, в циркуляционной системе скважины бурильные трубы – затрубное пространство.

Принимается, что в начальный момент времени нет никакого движения, т. е. $W_i(x,0)=0$.

При нагнетании промывочной жидкости в скважину глубиной l, происходят изменения давления и расхода, которые записываются на устье скважины, причем в сечении $x = l_0$ происходит частичное поглощение среды в пласт, согласно закону Дарси.

Зная законы изменения давления и расхода при входе и воспользовавшись уравнением неразрывности, определяются параметры пласта.

Система приближенных дифференциальных уравнений при этом имеет вид (Сатаров, 1999):

$$\left.\begin{aligned} &-\frac{\partial P_i}{\partial x}=\rho_i\left(\frac{\partial W_i}{\partial t}+2a_iW_i+b_i+g\sin\alpha_s\right),\\ &\frac{\partial P_i}{\partial t}=\rho_iC\frac{\partial W_i}{\partial x},\qquad (i=1,2,3)\end{aligned}\right\} \tag{14}$$

Начальные и граничные условия запишутся:

$$\left.\begin{aligned} &W_i(x,0)=0,\ \ P_i(x,0)=P_0-\rho_ib_ix-\rho_igx\sin\alpha_s,\\ &P_1(l,t)=f(t),\ \ W_1(l,t)=\varphi(t),\ \ P_3(l,t)=0,\\ &P_1(0,t)=P_2(0,t),\ \ W_1(0,t)=\nu W_2(0,t),\\ &P_1(0,t)=P_2(0,t),\ \ \nu=\frac{S_2}{S_1}.\end{aligned}\right\} \tag{15}$$

Дополнительное граничное условие также задаётся в виде баланса расхода:

$$W_2(l_0,t) = W_3(l_0,t) - \alpha_f\,[P_2(l_0, t)],$$

$$\alpha_f[P_2(l_0, t)] = A - BP_2(l_0,t), \tag{16}$$

где W_1 – скорость движения среды в бурильных трубах;

W_2 – скорость движения среды в затрубном пространстве до поглощающего сечения;

W_3 – скорость движения среды в затрубном пространстве после поглощающего сечения.

Величины A и B те же, что и выше.

Для определения средних скоростей $W_i(x,t)$, с учетом безразмерных величин (5), можно записать следующие дифференциальные уравнения:

$$\frac{\partial^2\overline{W_i}}{\partial\tau^2}+\frac{2a_il}{C}\frac{\partial\overline{W_i}}{\partial\tau}=\frac{\partial^2\overline{W_i}}{\partial\overline{x}^2}, \tag{17}$$

Применяя преобразование Лапласа для решения дифференциальных уравнений (17), будем иметь следующие выражения:

$$\frac{d^2\tilde{\tilde{\overline{W}}}_i}{d\overline{x}^2}-\left(s^2+\frac{2a_il}{C}s\right)\tilde{\tilde{\overline{W}}}_i=0. \tag{18}$$

Граничные условия перейдут в следующие:

$$\left.\begin{aligned} &\tilde{\tilde{\overline{W}}}_1(1,s)=\tilde{\varphi}_0(s),\qquad \frac{d\tilde{\tilde{\overline{W}}}_1}{d\overline{x}}(1,s)=\tilde{f}_0(s),\\ &\tilde{\tilde{\overline{W}}}_1(0,s)=\nu\tilde{\tilde{\overline{W}}}_2(0,s),\ \ \frac{d\tilde{\tilde{\overline{W}}}_1}{d\overline{x}}(0,s)=\frac{d\tilde{\tilde{\overline{W}}}_2}{d\overline{x}}(0,s),\\ &\frac{d\tilde{\tilde{\overline{W}}}_2}{d\overline{x}}(\tilde{l}_0,s)=\frac{d\tilde{\tilde{\overline{W}}}_3}{d\overline{x}}(\bar{l}_0,s),\quad \frac{d\tilde{\tilde{\overline{W}}}_3}{d\overline{x}}(1,s)=0.\end{aligned}\right\} \tag{19}$$

Решение дифференциальных уравнений (18) при граничных условиях (19) имеют вид:

$$\tilde{\tilde{\overline{W}}}_i=c_ke^{\alpha_i\overline{x}}+c_{k+1}{}^{-\alpha_i\overline{x}}, \tag{20}$$

$$\alpha_i{}^2=\left(s^2+\frac{2a_il}{C}s\right),$$

$$\alpha_2=\alpha_3,\quad (k=1,3,5).$$

$$c_1=\frac{\alpha_1\tilde{\varphi}_0(s)+\tilde{f}_0(s)}{2\alpha_1e^{\alpha_1}},$$

$$c_2=\frac{\alpha_1\tilde{\varphi}_0(s)-\tilde{f}_0(s)}{2\alpha_1e^{-\alpha_1}},$$

$$c_3 = \frac{c_1\left(1-\nu\dfrac{\alpha_1}{\alpha_2}\right)+c_2\left(1+\nu\dfrac{\alpha_1}{\alpha_2}\right)}{2\nu},$$

$$c_4 = \frac{c_1\left(1+\nu\dfrac{\alpha_1}{\alpha_2}\right)+c_2\left(1-\nu\dfrac{\alpha_1}{\alpha_2}\right)}{2\nu},$$

$$c_5 = \frac{c_3 - c_4 e^{-2\alpha_2 \tilde{l}_0}}{1-e^{2\alpha_2(1-\tilde{l}_0)}},$$

$$c_6 = \frac{c_3 e^{2\alpha_2} - c_4 e^{2\alpha_2\left(1-\tilde{l}_0\right)}}{1-e^{2\alpha_2(1-\tilde{l}_0)}}.$$

Для определения фильтрационного сопротивления используется дополнительное граничное условие (16), которое в безразмерном виде запишется в виде:

$$\bar{\tilde{\tilde{W}}}_2(\bar{l}_0,\tau) = \bar{\tilde{\tilde{W}}}_3(\bar{l}_0,\tau) - \frac{\bar{A}}{s} + \bar{B}\bar{\tilde{\tilde{P}}}_2(\bar{l}_0,\tau), \quad (21)$$

$$\bar{\tilde{\tilde{P}}}_2(\bar{l}_0,s) = \varphi(s) + c_3\bar{\tilde{\tilde{P}}}_{21}(\bar{l}_0,s) - c_4\bar{\tilde{\tilde{P}}}_{22}(\bar{l}_0,s) + \frac{\bar{k}_3}{s}\bar{l}_0,$$

$$\bar{\tilde{\tilde{P}}}_{21}(\bar{l}_0,s) = \frac{\bar{k}_1}{\alpha_2}s(e^{\alpha_2\bar{l}_0}-1) + \frac{\bar{k}_2}{\alpha}(e^{\alpha_2\bar{l}_0}-1),$$

$$\bar{\tilde{\tilde{P}}}_{22}(\bar{l}_0,s) = \frac{\bar{k}_1}{\alpha}s(e^{-\alpha_2\bar{l}_0}-1) + \frac{\bar{k}_2}{\alpha}(e^{-\alpha_2\bar{l}_0}-1),$$

$$\bar{k}_1 = \frac{\rho_2 C^2}{P_0},\ \bar{k}_2 = \frac{2a_2\rho_2 Cl}{P_0},\ k_3 = \frac{\rho_2\left(b_2 + g\sin\alpha\right)l}{P_0},$$

$$\bar{A} = \bar{B}\bar{P}_k, \quad \bar{B} = \frac{kP_0}{C\mu R_0 \ln\dfrac{R_k}{R_0}}.$$

Из условий (21) с учетом (20) ввиду малости величины α получается

$$\Phi(t_0) = \frac{\left(1+\dfrac{a_2}{\nu}\right)\tilde{\varphi}_0(t_0) - \tilde{f}_0(t_0)(1+\dfrac{1}{a_2}-\bar{l}_0)}{\left[1-\bar{P}_k+\bar{k}_3\bar{l}_0+\dfrac{\tilde{\varphi}_0(t_0)}{\nu t_0}\bar{\tilde{\tilde{P}}}_{21}(t_0)\right]a_2(1-\bar{l}_0)} = \bar{B}t_0. \quad (22)$$

Полученное соотношение (22) также является основным для предлагаемого метода определения параметров пласта по устьевым информациям.

3. Результаты исследований и обсуждение

Как было отмечено выше, соотношения (13) и (22) являются основными для предлагаемого метода определения параметров пласта по устьевым информациям, соответственно, при спускоподъемных операциях и при промывке скважин.

Видно, что в соотношениях (13) и (22) зависимость между *Φ(t₀)* и t_0 выражается прямой линией, проходящей через начало координат, угловой коэффициент которой зависит от величины, характеризующей фильтрационное сопротивление.

Имея данные об изменениях давления и скорости потока бурового раствора в скважине во времени *f(t)* и *φ(t)*, вычисляются величины $\tilde{f}_0(t_0)$ и $\tilde{\varphi}_0(t_0)$ для любого значения t_0.

Далее, подставляя найденные значения этих величин в соотношения (13) и (22), вычисляется необходимая величина $\dfrac{kP_0}{C\mu R_0 \ln\dfrac{R_k}{R_0}}$,

то есть фильтрационное сопротивление

$$\frac{k}{\mu R_0 \ln\dfrac{R_k}{R_0}}.$$

Известно, что при исследованиях, посвященных определению параметров пласта в процессе выполнения спускоподъемных операций и промывке скважин, пренебрегают рядом факторов:

- влияние высоких температур и давлений в стволе скважины на физико-механические свойства промывочной среды;
- нестационарное движение промывочной среды в кольцевом пространстве;
- сжимаемость промывочной среды и упругость ограничивающих поверхностей скважины;
- местные сопротивления, возникающие в замковых и муфтовых соединениях;
- непостоянность реологических параметров промывочной среды в стволе скважины с глубиной и т. д.

Все эти факторы очень сильно влияют на величину параметров поглощающего пласта и потому учитываются посредством поступающей замеренной информации об изменениях давления и скорости потока бурового раствора в скважине во времени $f(t)$ и $\varphi(t)$, что позволяет более надежно определять фильтрационное сопротивление пласта на основе предложенных соотношений (13) и (22).

4. Заключение

Таким образом, в результате вышеприведенных исследований представляется возможным сделать следующие выводы о том, что

- путем постановки и решения обратных задач на основе нестационарных процессов предложен метод определения некоторых гидродинамических характеристик потока бурового раствора в процессе бурения и проводки скважин;
- на основе информации об изменении во времени давления и расхода потока бурового раствора, полученной на устье скважины, предлагается метод определения параметра поглощающего пласта при спускоподъемных операциях и при промывке скважин.

В заключение автор приносит свою глубокую признательность профессору Р.М. Саттарову за постановку задачи и обсуждение полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

БАРЕНБЛАТТ, Г.И., БОРИСОВ, Ю.П., КАМЕНЕЦКИЙ, С.Г., КРЫЛОВ, А.П. 1957. Об определении параметров нефтеносного пласта по данным о восстановлении давления в остановленных скважинах. *Изв. АН СССР*, *ОТН*, 7, 84 – 91.

БАРЕНБЛАТТ, Г.И., ЕНТОВ, В.М., РЫЖИК, В.М. 1984. Движение жидкостей и газов в природных пластах. Недра. Москва. 211.

ГАСАНОВ, Г.Т., САТАРОВ, Р.М., АМЕТОВ, И.М. 1970. Постановка некоторых обратных задач буровой гидродинамики на основе нестационарных исследований. *ДАН Азерб. ССР*, 26, 5, 44 – 48.

САТАРОВ, Р.М. 1999. Неустановившееся движение реологически сложных жидкостей в трубах. Элм. Баку. 412.

МИРЗАДЖАНЗАДЕ, А.Х., КАРАЕВ, А.К., ШИРИНЗАДЕ, С.А. 1977. Гидравлика в бурении и цементировании нефтяных и газовых скважин. Недра. Москва. 230.

МИРЗАДЖАНЗАДЕ, А.Х., ШИРИНЗАДЕ, С.А. 1986. Повышение эффективности и качества бурения глубоких скважин. Недра. Москва. 278.

Рецензент: член-корр. НАН Азербайджана Г.М.Эфендиев