И. И. ДЖАНЗАКОВ

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГЛИНИСТОЙ КОРКИ В ЗОНЕ ПРИХВАТА НА ДИНАМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ КОЛОНН

При разбуривании цементного моста, как показывают опытные данные [1], параметры бурового раствора ухудшаются (рост водоотдачи и увеличение реологических показателей раствора, его плотность, а также содержание в нем твердой фазы) и создаются условия для прихвата под действием перепада давления в зонах проницаемых отложений. Приобретение смесью «буровой – цементный раствор» иных реологических свойств определяется степенью несовместимости бурового и цементного раствора, в результате которого образуется пастообразная пробка. Вязкость бурового раствора, содержащего 10% цементного составляющего, возрастает приблизительно в 40 раз по сравнению с исходным, вследствие чего повышается опасность прихвата труб при спуске без промывки.

Многие растворы, в том числе буровые и тампонажные, проявляют свойства, отличные от свойства ньютоновских жидкостей [1]. Вязкость таких неньютоновских жидкостей зависит не только от температуры и давления, но и от скорости сдвига, деформации, времени и характера движения. При этом реологическое уравнение (уравнение состояния) в наиболее общем виде может быть представлено в виде [2]:

$$F(\tau, \dot{\gamma}) = 0, \qquad (1)$$

где τ и $\dot{\gamma}$ – соответственно напряжение сдвига и скорости деформации сдвига. Получение уравнения состояния при различных условиях сопряжено со значительными трудностями, поэтому уравнение (1) обычно получается экспериментально. При этом используются различные варианты аппроксимации экспериментальных кривых [2, 3]. Наибольшее распространение получили двухпараметрические модели Шведова–Бингама и Освальда–Вейса, которые описываются единым степенным законом [3]:

$$\sigma_{rz} = k \cdot \dot{\gamma}^n,$$

где k – показатель консистенции; n – показатель неньютоновского поведения. При $n < 1$ жидкость псевдопластическая, а при $n > 1$ дилатантная. Если в формуле полагать:

$$k = \left(\tau_0 + \eta \dot{\gamma}_*\right) \dot{\gamma}_*^{-n}, \quad n = \eta \gamma_* \left(\tau_0 + \eta \dot{\gamma}_*\right)^{-1},$$

то получим модель Шведова–Бингама:

$$\dot{\gamma} = 0 \ \text{ при } \ \tau < \tau_0, \ \tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma} \ \text{ при } \ \tau > \tau_0,$$

где τ_0 – предельное (или динамическое) напряжение сдвига; η – пластическая (структурная) вязкость; $\dot{\gamma}_*$ – скорость деформации сдвига, выше которой зависимость τ от $\dot{\gamma}$ принимается линейной функцией.

Рассмотрим движение прихваченной в скважине колонны, которое сопровождается вытеснением неньютоновской жидкости Шведова–Бингама. При этом полагаем, что до приложения внешнего усилия колонна находится в неподвижном состоянии и суммарное трение со стороны неньютоновской жидкости на ее поверхности колонны определяется по формуле [3]:

$$P_{mp} = -D_{nk}[d\tau_0(L-l) + d_1\tau_1 l] -$$
$$-[c\eta(L-l) + c_1\eta_1 l]v,$$

где $c = \dfrac{2\pi[2a(1-\alpha^2)+1]}{\ln(1/\alpha)}$, $d = \dfrac{2\pi b(1-\alpha^2)}{3\alpha \ln(1/\alpha)}$,

$$a = \frac{\omega^2}{(1-\alpha^2)(1+\alpha^2-2\omega^2)+\alpha_0^4}; \qquad b: =$$

$$= \frac{1+\alpha^3-2\omega^3+\alpha_0^3}{(1-\alpha^2)(1+\alpha^2-2\omega^2)+\alpha_0^4}\ \omega^2 = \frac{1-\alpha^2}{2\ln(1/\alpha)},$$

где L – длина бурильной колонны; $\alpha = \dfrac{D_{nk}}{D_T}$, $\alpha_0 = \alpha \dfrac{D_{bk}}{D_{nk}}$ и D_T – диаметр скважины; D_{nk} и D_{bk} – наружный и внутренний диаметры бурильных труб, $(\tau_0,\ \eta)$ и $(\tau_1,\ \eta_1)$ – соответственно предельные напряжений сдвига, коэффициенты динамической вязкости жидкости в зоне прихвата длиной l и вне его зоны. Величины $(\tau_1,\ \eta_1)$ в момент прихвата принимают такие значения, при котором колонна находится в состоянии неподвижности, т.е. выполняется условие:

$$P_{mp} > m(1-\frac{\rho_{ж}}{\rho})g\,,$$

m, ρ – масса колонны и плотность ее материала; $\rho_{ж}$ – плотность пристеночного слоя породной среды.

Для освобождения колонны прихвата, как правило, на колонну прилагают усилие, необходимое для преодоления суммарной силы трения и ее веса, и если максимальная величина этого усилия ограничена (например, в связи с необходимостью соблюдения критерия прочности элементов бурильной компоновки), то используются различные методы воздействия на колонну или на окружающую ее среду, направленные для уменьшения величины контактной силы (трения). В частности, используются методы, влияющие на изменение физико-механических характеристик пристеночного слоя жидкости на поверхности колонны. Изучим характер движения колонны в скважине, в случае, когда характеристики бингамовской жидкости $(\tau_1,\ \eta_1)$ после приложения усилия на колонну проявляют временные свойства, причем параметр τ_1 меняется по закону $\tau_1 = \tau_1(t)$, а сила вязкого сопротивления по времени имеет наследственный характер:

$$P_v = c_1\eta_1 lv + c_1 l\int_0^t \eta_н(t-\tau)v(\tau)d\tau\,, \qquad (2)$$

где η_1 – мгновенный коэффициент динамической вязкости; $\eta_н(t)$ – наследственная функция. Для упрощения расчетов в дальнейшем полагаем $d_1 = d$, $c_1 = c$. При этом величина $\tau_1(0) = \tau_{10} < \tau_1$ выбирается из условия, чтобы приложенное на колонну усилие P_0 удовлетворяло при $t = 0$ неравенству (P_d – допустимая величина приложенного усилия):

$$D_{nk}d[\tau_0(L-l)+\tau_{10}l] + m(1-\rho_{ж}/\rho)g <$$
$$< P_0 < P_d\,. \qquad (3)$$

При выполнении условия (3) колонна начинает совершать движение вверх, характер которого зависит от видов функций $\tau_1(t)$ и $\eta_н(t)$. Уравнение движения колонны при $t > 0$ представим в виде:

$$m_1\dot{v} = -D_{nk}d[\tau_0(L-l)+\tau_1(t)l] - m_1 g -$$
$$-c[\eta(L-l)v + \eta_1 lv + l\int_0^t \eta_н(t-\tau)v(\tau)d\tau] +$$
$$+P_0 H(t)\,,$$

где $H(t)$ – единичная функция Хевисайда, $m_1 = m(1-\dfrac{\rho_{ж}}{\rho})g$.

Таким образом, из последнего равенства видно, что при известных функциях $\tau_1(t)$ и $\eta_н(t)$ для определения скорости колонны получим интегро-дифференциальное уравнение первого порядка, которое можно решить численно. В некоторых случаях решение этого уравнения можно получить в замкнутом виде. В связи с этим рассмотрим случай, когда эти функции зависят от времени по экспоненциальному закону:

$$\tau_1 = \tau_{10}\exp(-\beta t)\ \ \eta_н = \eta_{10}\exp(-\gamma t)\,, \qquad (4)$$

где τ_{10}, β, η_{10} и γ – постоянные параметры. С учетом выражений (4) для функций $\tau_1(t)$ и $\eta_н(t)$, применим к последнему уравнению одностороннее преобразование Лапласа по времени, тогда получаем:

$$m_1 p\hat{v}(p) = -D_{nk}d\left[\frac{\tau_0(L-l)}{p} + \frac{\tau_{10}l}{p+\beta}\right] - \qquad (5)$$

$$-\frac{m_1 g}{p} - c\left[[\eta(L-l)+\eta_1 l]\hat{v}(p) + l\frac{\eta_{10}\hat{v}(p)}{p+\gamma}\right] + \frac{P_0}{p},$$

где $\hat{v}(p) = \int_0^\infty v(t)\exp(-pt)dt$ – изображение по Лапласу функции $v(t)$, p – параметр преобразования. Разрешив (5) относительно $\hat{v}(p)$, получаем:

$$\hat{v}(p) = \frac{(P_0 - m_1 g)(p+\gamma)}{m_1 p(p^2 + 2m_0 p + n)} -$$
$$-D_{nk}d\frac{(a_1 + c_1 p)(p+\gamma)}{m_1 p(p^2+2m_0 p+n)(p+\beta)}, \qquad (6)$$

где $a_1 = \beta\tau_0(L-l)$, $c_1 = \tau_0(L-l) + l\tau_{10}$, $m_0 = 0.5(\gamma + b_1)$, $n = b_1\gamma + b_2$, $b_1 = c[\eta(L-l)+\eta_1 l]/m_1$, $b_2 = c\eta_{10}l/m_1$.

При этом изображение перемещения колонны $u = u(t)$ определяется по формуле:

$$\hat{u}(p) = \frac{\hat{v}(p)}{p}.$$

Как заметно из (6), вид функции $v(t)$ зависит от корней уравнения $p^2 + 2m_0 p + n = 0$.

Рассмотрим случай, когда корни этого уравнения действительные, т.е. параметры τ_{10}, β, η_{10} и γ таковы, что выполняется неравенство $m_0^2 > n$. Тогда оригинал изображения $\hat{u}(p)$ будет иметь вид:

$$u(t) = D_{nk} d\left[-\frac{a_1 \gamma t}{\beta p_1 p_2 m_1} + \frac{(a_1 - c_1\beta)(\gamma - \beta)[1 - \exp(-\beta t)]}{\beta^2 (p_1 - \beta)(p_2 - \beta) m_1} + \frac{(a_1 - c_1 p_1)(\gamma - p_1)[1 - \exp(-p_1 t)]}{p_1^2 (\beta - p_1)(p_2 - p_1) m_1}\right] +$$

$$D_{nk} d \frac{(a_1 - c_1 p_2)(\gamma - p_2)[1 - \exp(-p_2 t)]}{p_2^2 (\beta - p_2)(p_1 - p_2) m_1} +$$

$$+ \frac{P_0 - m_1 g}{m_1}\left[\frac{\gamma t}{p_1 p_2} - \frac{(\gamma - p_1)[1 - \exp(-p_1 t]}{p_1^2 (p_2 - p_1)}\right] - \frac{P_0 - m_1 g}{m_1}\frac{(\gamma - p_2)[1 - \exp(-p_2 t)]}{p_2^2 (p_1 - p_2)},$$

где $p_{1,2} = m_0 \pm \sqrt{m_0^2 - n}$.

Силу сопротивления пристеночного слоя жидкости определяем по формуле (2):

$$P_{mp} = D_{nk} d[\tau_0 (L - l) + \tau_{10} l \exp(-\beta t)] + c[\eta(L - l) + \eta_1 l]v(t) + c l \eta_{10} \frac{P_0 - m_1 g}{m_1} \times$$

$$\times \left[\frac{1}{p_1 p_2} - \frac{\exp(-p_1 t)}{p_1 (p_2 - p_1)} - \frac{\exp(-p_2 t)}{p_2 (p_1 - p_2)}\right] +$$

$$\frac{D_{nk}}{m_1}\left[\frac{a_1}{\beta p_1 p_2} - \frac{(a_1 - c_1\beta)\exp(-\beta t)}{\beta(p_1 - \beta)(p_2 - \beta)} - \frac{(a_1 - c_1 p_1)\exp(-p_1 t)}{p_1 (\beta - p_1)(p_2 - p_1)} - \frac{(a_1 - c_1 p_2)\exp(-p_2 t)}{p_2 (\beta - p_2)(p_1 - p_2)}\right].$$

Расчеты производились для следующих значений параметров: L = 1000 м, l = 50 м, ρ = 7800 кг/м³, $\rho_{ж}$ = 2000 кг/м³, τ_0 = 12 Па, τ_{10} = 10 Па, $\eta_1 = \eta$ = 0,00642 Па·с, η_{10} = –0,005 Па, γ = 2 (1/с).

На рис. 1 представлены графики изменения напряжения $\tau = tau$ (Па) от времени t (с) при различных значениях параметра β (1/с) для колонны D_{nk} = 0,1016 м, D_{bk} = 0,0836 м, m = 20 000 кг. Значение удерживающей колонну силы в неподвижном состоянии будет равно $P_{уд}$ = 1991243H. На колонну приложена внешняя сила величиной P_0 = 228992H.

На рис. 2 и 3 представлены графические зависимости силы трения P_{mp} (H) и перемещение u (м) от времени t (с) при различных значениях параметра β (1/с).

Из анализа кривых, представленных на рис. 2, видно, что сила сопротивления пристеночного слоя с ростом времени принимает постоянное

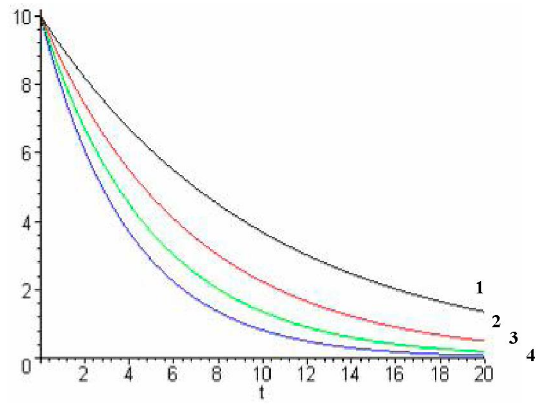

Рис. 1. Изменение напряжения $\tau = tau$ (Па) от времени t (с) при различных значениях параметра β (1/с): β = 0,1 (1), β = 0,15 (2), β =0,20 (3), β = 0,25 (4)

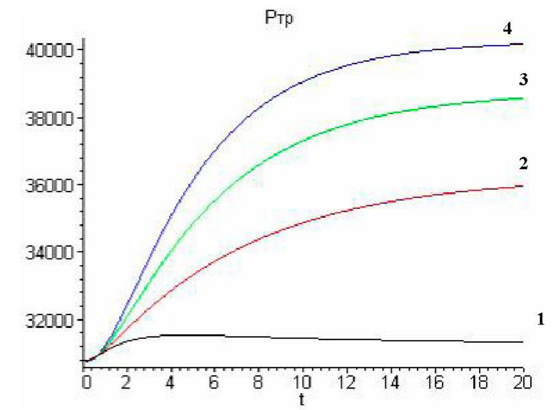

Рис. 2. Изменение напряжения P_{mp} (H) от времени t (с) при различных значениях параметра β (1/с): β = 0,1 (1), β = 0,15 (2), β =0,20 (3), β = 0,25 (4)

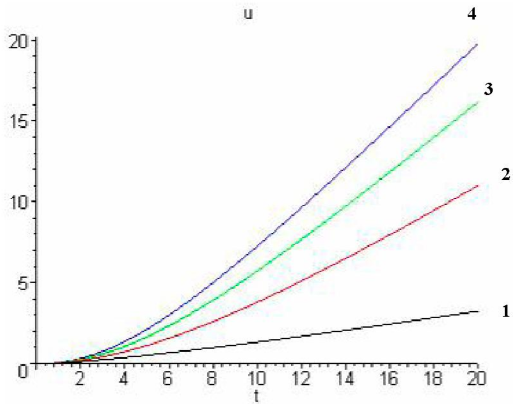

Рис. 3. Изменение перемещения колонны u (м) от времени t (с) при различных значениях параметра β (1/с): β = 0,1 (1), β = 0,15 (2), β =0,20 (3), β = 0,25 (4)

значение и увеличение параметра β приводит к росту предельной величины этой силы.

Из кривых, представленных на рис. 3, заметим, что перемещения колонны для малых значений времени меняются по закону, близкому к параболическому, и далее с ростом времени меняются по прямолинейному закону. Рост параметра β может привести к значительному увеличению перемещения колонны.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Галимов М.А.* Контакт труб с фильтрационной коркой при циркуляции раствора в скважине // Тр. ВНИИКРнефти. Вып. II, 1976). С. 7-71.

2. *Шестернев Н.М., Расизаде Я.М., Ширинзаде С.А.* Предупреждение и ликвидация осложнений в бурении. М.: Недра, 1979.

3. *Рабинович Н.Р.* Инженерные задачи механики сплошной среды в бурении. М.: Недра, 1989. 270 с.

Резюме

Бұрғылау ерітіндісінің кейбір қасиеттерінің бұрғылау тізбегі мен жар қабаты арасында туатын үйкеліс күшінің өлшеміне көрсететін әсері зерттелген.

УДК 624.131

Атырауский институт нефти и газа, г. Атырау

Поступила 2.07.06г.